

ISSN 1563-0218; eISSN 2617-7498

ӘЛ-ФАРАБИ атындағы ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ

# ХАБАРШЫ

Биология сериясы

---

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени АЛЬ-ФАРАБИ

# ВЕСТНИК

Серия биологическая

---

AL-FARABI KAZAKH NATIONAL UNIVERSITY

# EXPERIMENTAL BIOLOGY

---

№2 (107)

Алматы  
“Қазақ университеті”  
2026



# ХАБАРШЫ

БИОЛОГИЯ СЕРИЯСЫ №2 (107) маусым



04.05.2017 ж. Қазақстан Республикасының Ақпарат және коммуникация министрлігінде тіркелген

Қуәлік № 16494-Ж

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

## ЖАУАПТЫ РЕДАКТОР

Шокагаева Д.Х., PhD (Қазақстан)  
e-mail: bb.kaznu.kz@gmail.com

## РЕДАКЦИЯ АЛҚАСЫ:

Төлеуханов С.Т., б.ғ.д., профессор (бас редактор)  
(Қазақстан)

Бекманов Б.О., б.ғ.к., доцент (бас редактордың  
орынбасары) (Қазақстан)

Бисенбаев А.Қ., б.ғ.д., ҚР ҰҒА академигі (Қазақстан)

Савицкая И.С., б.ғ.д., профессор (Қазақстан)

Кистаубаева А.С., б.ғ.к., доцент (Қазақстан)

Конуспаева Г.С., PhD, профессор (Қазақстан)

Мухитдинов Н.М., б.ғ.д., профессор (Қазақстан)

Нургазин С.Т., б.ғ.д., профессор (Қазақстан)

Турусбеков Е.К., б.ғ.к., профессор (Қазақстан)

Берсимбаев Р.И., б.ғ.д., профессор (Қазақстан)

Искаков Б.К., б.ғ.д., профессор (Қазақстан)

Сарбасов Д., PhD, профессор (АҚШ)

Орынбаева З., PhD, профессор (АҚШ)

Қурмашева Р.Т., PhD (АҚШ)

Сапарбаев М., PhD, профессор (Франция)

Ищенко А., PhD (Франция)

Лось Д., б.ғ.д., профессор (Ресей)

Ташев А.Н., профессор (Болгария)

Құрманғалиев Е., PhD (США)

Ерохин М.М., б.ғ.д. (Ресей)

Тоқтарбай Ж., PhD (Қазақстан)

Тастамбек Қ.Т., PhD (Қазақстан)

## ТЕХНИКАЛЫҚ РЕДАКТОР

Смекинов Изат, PhD (Қазақстан)

Журнал материалдарында ауқымды биологиялық мәселелері – ғылыми шолу, теориялық және эксперименталдық зерттеулердің нәтижелері қарастырылады.

Мақалалар биологияның келесі бөлімдері бойынша жарияланады: ботаника, биотехнология, биохимия, өсімдіктер физиологиясы, генетика және молекулалық биология, клеткалық биология, биофизика, адам және жануарлар физиологиясы, зоология және ихтиология, цитология және гистология, микробиология және вирусология.



Жоба менеджері

Гульмира Шаккозова

Телефон: +7 701 724 2911

E-mail: Gulmira.Shakkozova@kaznu.kz

ИБ № 18084

Пішімі 60x84/8. Көлемі 17,6 б.т. Тапсырыс № 3568.

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  
**БОТАНИКА**

---

Section 1  
**BOTANY**

---

Раздел 1  
**БОТАНИКА**

МРНТИ 34.29.35

<https://doi.org/10.26577/bb107220261>

Т.Б. Рысқали \*, А.А. Аметов , С.С. Мауленова ,  
С.Т. Назарбекова , А.Ж. Чилдибаева , Ч.Ж. Алдасугурова 

Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан  
\*e-mail: [tolganay\\_0220@mail.ru](mailto:tolganay_0220@mail.ru)

## ОСОБЕННОСТИ ФЛОРИСТИЧЕСКОГО СОСТАВА ПЕРВОЙ ПОПУЛЯЦИИ ЭНДЕМИЧНОГО ВИДА *ROSA DSHARKENTI* CHRSHAN. В НИЖНЕМ ТЕЧЕНИ РЕКИ УСЕК

Исследование посвящено флористическому и геоботаническому анализу растительных сообществ с участием редкого эндемичного вида *Rosa dsharkenti* Chrshan., локализованного в долине реки Усек, в районе невысокого горного массива «Кызыл Еспе», расположенного в южной части Джунгарского Алатау. Актуальность работы обусловлена ограниченным распространением данного вида, недостаточной изученностью его местообитаний и необходимостью уточнения флористических особенностей растительных сообществ, в составе которых он встречается.

В ходе исследования был изучен видовой состав растений, произрастающих совместно с *Rosa dsharkenti* Chrshan., определены их жизненные формы, экологические типы, хозяйственно-полезные группы и географические элементы флоры. На основе проведённого флористического анализа приведён полный список видов растений, встречающихся совместно с данным видом, что позволяет охарактеризовать структуру и особенности растительного покрова исследуемого участка.

В связи с ограниченным ареалом распространения вида природные пожары и изменение условий местообитания могут представлять потенциальную угрозу для его сохранения. В этой связи с целью сохранения *R. dsharkenti* рекомендуется интродукция данного вида в Алматинский ботанический сад и Илийский экспериментальный ботанический сад. Интродукция позволит сохранить генофонд этого редкого эндемичного вида и создаст возможности для его дальнейшего изучения в научном и декоративно-селекционном направлениях. Возможности использования данного вида в качестве лекарственного, витаминного или промышленного сырья могут быть научно обоснованы только после проведения специальных химических и биологических исследований.

**Ключевые слова:** *Rosa dsharkenti* Chrshan., флористический состав, геоботаническое описание, эндемичный вид, долина реки Усек, Джунгарский Алатау.

T.B. Ryskali\*, A.A. Ametov, S.S. Maulenova, S.T. Nazarbekova,  
A.Zh. Childibayeva, Ch.Zh. Aldassugurova  
Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan  
\*e-mail: [tolganay\\_0220@mail.ru](mailto:tolganay_0220@mail.ru)

### Peculiarities of floristic composition of the first population of the endemic species *Rosa dsharkenti* Chrshan. in the lower reaches of the Usek river

The study is devoted to the floristic and geobotanical analysis of plant communities involving the rare endemic species *Rosa dsharkenti* Chrshan., localized in the valley of the Usek River, in the area of the low mountain massif "Kyzyl Espe", located in the southern part of the Dzungarian Alatau. The relevance of the work is determined by the restricted distribution range of this species, the insufficient study of its habitats, and the need to clarify the floristic features of the plant communities in which it occurs.

During the study, the species composition of plants growing together with *Rosa dsharkenti* Chrshan. was examined, and their life forms, ecological types, economically useful groups, and geographical elements of the flora were determined. Based on the floristic analysis, a complete list of plant species occurring together with this species is presented, which makes it possible to characterize the structure and features of the vegetation cover of the studied area.

Due to the restricted distribution range of the species, natural fires and changes in habitat conditions may pose a potential threat to its conservation. In this regard, in order to conserve *R. dsharkenti*, the introduction of this species into the Almaty Botanical Garden and the Ile Experimental Botanical Garden is recommended. Introduction will make it possible to preserve the gene pool of this rare endemic species

and create opportunities for its further study in scientific and ornamental breeding directions. The possibilities of using this species as medicinal, vitamin-rich, or industrial raw material can be scientifically substantiated only after special chemical and biological studies have been conducted.

**Keywords:** *Rosa dsharkenti* Chrshan., floristic composition, geobotanical description, endemic species, Usek River valley, Dzungarian Alatau.

Т.Б. Рысқали\*, А.А. Аметов, С.С. Мауленова, С.Т. Назарбекова,  
А.Ж. Чилдибаева, Ч.Ж. Алдасугурова

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

\*e-mail: tolganay\_0220@mail.ru

### **Өсек өзенінің төменгі ағысынан табылған эндемдік *Rosa dsharkenti* Chrshan. өсімдігінің бірінші популяциясының флоралық ерекшеліктері**

Зерттеу жұмысы Жоңғар Алатауының оңтүстік бөлігінде орналасқан «Қызыл Еспе» аласа таулы массиві маңындағы Өсек өзені аңғарында кездесетін сирек эндемдік түр *Rosa dsharkenti* Chrshan. қатысатын өсімдіктер қауымдастықтарының флористикалық және геоботаникалық талдауына арналған. Жұмыстың өзектілігі бұл түрдің таралу аймағының шектеулілігімен, оның мекен ету орындарының жеткіліксіз зерттелуімен және осы түр кездесетін өсімдіктер қауымдастықтарының флористикалық ерекшеліктерін нақтылау қажеттілігімен байланысты.

Зерттеу барысында *Rosa dsharkenti* Chrshan. түрімен бірге өсетін өсімдіктердің түрлік құрамы зерттеліп, олардың тіршілік формалары, экологиялық типтері, шаруашылық-пайдалы топтары және флораның географиялық элементтері анықталды. Жүргізілген флористикалық талдау негізінде осы түрмен бірге кездесетін өсімдік түрлерінің толық тізімі берілді, бұл зерттелген аумақтың өсімдіктер жабынының құрылымы мен ерекшеліктерін сипаттауға мүмкіндік береді.

Түрдің таралу аймағы шектеулі болғандықтан, табиғи өрттер мен мекен ету ортасы жағдайларының өзгеруі оның сақталуына ықтимал қауіп төндіруі мүмкін. Осыған байланысты *R. dsharkenti* түрін сақтау мақсатында оны Алматы ботаникалық бағына және Іле эксперименталдық ботаникалық бағына интродукциялау ұсынылады. Интродукция бұл сирек эндемдік түрдің генофондын сақтауға және оны келешекте ғылыми, сәндік-селекциялық бағытта зерттеуге мүмкіндік береді. Ал бұл түрді дәрілік, дәрумендік немесе өндірістік шикізат ретінде пайдалану мүмкіндіктері арнайы химиялық және биологиялық зерттеулер жүргізілгеннен кейін ғана ғылыми тұрғыдан негізделуі мүмкін.

**Түйін сөздер:** *Rosa dsharkenti* Chrshan., флористикалық құрам, геоботаникалық сипаттама, эндемдік түр, Өсек өзені аңғары, Жоңғар Алатауы.

## **Введение**

Изучение популяции эндемичного и редкого вида *Rosa dsharkenti* Chrshan., входящего в состав флоры Казахстана, а также вопросы сохранения биоразнообразия флоры представляют собой актуальное направление современных ботанических исследований. Традиционные морфологические критерии оценки видов иногда оказываются недостаточными, поэтому при изучении популяции *R. dsharkenti* важно опираться на геоботанические характеристики.

Джунгарский Алатау является значимой частью горной системы Тянь-Шаня. Большинство рек региона Семиречье берут начало в ледниках этого хребта.

Климат Джунгарского Алатау является переходным между горными районами Северного Тянь-Шаня и Алтая, с высокой солнечной радиацией, выраженной континентальностью и за-

сушливостью. Лето тёплое, зимы на предгорьях холодные и малоснежные, в горах наблюдается значительный снежный покров. Северные склоны получают больше осадков (500–600 мм, местами до 800 мм), а южные – меньше (300–450 мм в год) (Байтулин, 2006; Хржановский и др., 1986).

Джунгарский Алатау является одним из самых богатых флористических регионов Казахстана по количеству эндемичных видов (Голоскоков, 1969).

В мировой научной литературе последние десятилетия наблюдается рост интереса к редким видам рода *Rosa* в контексте: молекулярной филогении (Zhang et al., 2021; Wang et al., 2019), генетического разнообразия (Fang et al., 2020; Li et al., 2022), экологии ценопопуляций горных роз (Kong et al., 2018; Huang et al., 2021), криоконсервации редких видов (Ahmed et al., 2020), биотехнологии и микроразмножения *Rosa* spp. (Chen et al., 2023).

Однако *R. dsharkenti* практически не фигурирует в зарубежных публикациях, что подчёркивает её научную уникальность и необходимость локальных исследований.

В настоящее время охрана и изучение редких эндемичных видов является одним из актуальных вопросов. Род *Rosa* L. отличается наибольшим видовым разнообразием в семействе розоцветных (*Rosaceae* Juss.). (Хржановский, 1941).

Шиповник имеет несколько центров происхождения: Китайско-Японский флористический регион, прилегающие районы Средней Азии, а также Переднеазиатский центр (Жуковский, 1971). Распространен он исключительно в странах с умеренным климатом северного полушария. Согласно различным источникам, род *Rosa* L. насчитывает от 250 до 400 видов, а также примерно 25 000 декоративных форм и сортов. В странах СНГ зарегистрировано около 60 видов, при этом в Казахстане встречается 21 вид шиповника, а число культурных сортов значительно превышает это количество (Павлов, 1961; Иващенко, 2004). Среди диких шиповников Казахстана выделяют четыре эндемичных вида: джаркентский шиповник (*R. dsharkenti* Chrshan.), илийский шиповник (*R. iliensis* Chrshan.), лапчаткоцветный шиповник (*R. potentilliflora* Chrshan. et M. Pop.) и шиповник Павлова (*R. pavlovii* Chrshan.).

Джаркентский шиповник (*R. dsharkenti*) является эндемиком Казахстана. По данным одних справочников (1976), его ареал охватывает верхнее течение реки Или, тогда как по другим источникам (1969) он произрастает на сухих каменистых склонах в окрестностях города Панфилова («Полевая геоботаника», 1969-1976).

В 1958 году В.Г. Хржановский впервые описал этот вид, используя растения, выращенные из семян (Хржановский, 1958). В настоящее время охрана и рациональное использование генофонда растений, включая редкие, с ограниченным ареалом распространения, эндемичные и реликтовые виды, является одной из актуальных проблем. Для достижения этой цели необходимо изучение их на популяционном уровне и разработка меры их охраны (Курманбаева & Мухитдинов, 2023; Кашин и др., 2015).

Научная новизна исследования заключается в том, что впервые для нижнего течения реки Усек проведён флористический и геоботанический анализ растительных сообществ с участием редкого эндемичного вида *Rosa dsharkenti* Chrshan. Установлено, что исследуемое местообитание отличается высоким видовым разнообразием,

сочетанием мезофитных и ксерофитных элементов, а также наличием редких и эндемичных видов-спутников, включая *Berberis iliensis* M. Pop. и *Lonicera iliensis* Pojark. Полученные данные подчёркивают природоохранную значимость данного участка и необходимость его дальнейшего мониторинга.

Цель исследования – провести флористический и геоботанический анализ растительных сообществ с участием редкого эндемичного вида *Rosa dsharkenti* Chrshan. в нижнем течении реки Усек, определить их видовой состав, жизненные формы, экологические типы, хозяйственно-полезные группы, географические элементы флоры и природоохранную значимость исследуемого местообитания.

### Материалы и методы исследования

Объект исследования – *R. dsharkenti* Chrshan., являющийся крайне редким эндемичным видом флоры Казахстана.

Гербарные образцы редкого эндемичного вида *R. dsharkenti* Chrshan., произрастающего в южной части Джунгарского Алатау, в районе низкогорного хребта «Кызыл Еспе» и в долине реки Усек, были собраны и высушены по методике А.К. Скворцова (Скворцов, 1977).

Для определения высших растений использовались определительные ключи 9-томного издания «Флора Казахстана» («Флора Казахстана», 1956-1966) и 2-томного «Иллюстрированного определителя растений Казахстана» («Иллюстрированного определителя растений Казахстана», 1972). Названия определённых растений на казахском языке были проверены по ботаническим словарям С.А. Арыстанғалиева и Е.Р. Рамазанова (1977 г.) (Арыстанғалиев & Рамазанов, 1977).

Геоботанические методы исследования. Перед началом геоботанического изучения территории проводилось предварительное обследование, направленное на выявление особенностей распределения растительного покрова с учётом физико-географических условий участка. После этого в пределах первой популяции *Rosa dsharkenti* Chrshan., выявленной в долине реки Усек, были выделены три ценопопуляции, каждая из которых рассматривалась как отдельный участок геоботанического описания.

Геоботанические описания проводились на пробных площадках стандартного размера 10×10 м<sup>2</sup>. Всего в пределах первой популяции было заложено 3 пробные площадки, по одной в

каждой ценопопуляции. Площадь каждой пробной площадки составила 100 м<sup>2</sup>, а общая площадь геоботанического обследования – 300 м<sup>2</sup>.

Для описания растительности и условий её обитания использовались специальные геоботанические бланки. В ходе описания фиксировались видовой состав растений, жизненные формы, экологические типы, хозяйственно-полезные группы и географические элементы флоры. Обилие видов оценивалось по шкале О. Друде с одновременным указанием проективного покрытия растений в процентах.

Таким образом, отбор участков для закладки пробных площадей и последующего описания растительности на них с точки зрения статистики представляет собой обычную типичную выборку, которая при соблюдении определенных условий может достаточно полно отражать генеральную совокупность изучаемых объектов (Нешатаев, 1987).

Статистическая обработка данных. Статистическая обработка полученных флористических данных проводилась с использованием методов описательной статистики. Для анализа жизненных форм, экологических типов, хозяйственно-полезных групп и географических элементов определяли абсолютное число видов и их процентное соотношение от общего числа выявленных видов.

Процентная доля каждой группы рассчитывалась по формуле:

$$P = n / N \times 100,$$

где P – процентная доля группы, n – количество видов в соответствующей группе, N – общее число видов, выявленных в растительных со-

обществах с участием *Rosa dsharkenti* Chrshan. В данной работе общее число видов составило N = 79. Полученные результаты представлены в виде таблиц с указанием абсолютных значений и процентов.

### Результаты исследования и их обсуждение

Летом 2022 года была организована экспедиция в южный район Джунгарского Алатау с целью обнаружения популяции редкого эндемичного вида – джаркентского шиповника (*Rosa dsharkenti* Chrshan.), находящегося под угрозой исчезновения. Экспедиция увенчалась успехом: первую популяцию этого вида выявили в дельте реки Усек, вблизи низкогорного массива «Кызыл Еспе», который относится к южному отрогу Джунгарского Алатау. Административно этот участок относится к Панфиловскому району Жетысуской области. Восточный берег реки Усек обрывистый; вдоль него формируются густые кустарниковые заросли, перемежающиеся с широколиственными деревьями, создавая сплошной растительный покров. Именно в этих зарослях была зафиксирована первая популяция *R. dsharkenti*.

GPS-координаты: 44°19'28" с.ш., 79°53'51" в.д. Высота над уровнем моря – 970 м.

В рамках обнаруженной популяции нами выделены три ценопопуляции. Растительный покров всех трех ценопопуляции *R. dsharkenti* были описаны методом геоботанического описания с выделением проективного покрытия, ярусности и определением возрастного спектра. В этой статье мы ограничимся приведением списка растений первой популяции и проведением флористического анализа.

**Таблица 1**

*Флористический состав растительных сообществ с участием Rosa dsharkenti Chrshan.*

Отдел: <i>Gymnospermatophyta</i> – Ашықтүқымдылар (Голосеменные)			
Класс: <i>Chlamydospermatopsida</i> – Қабықтытүқымдылар (Оболочкосеменные)			
1 Семейство: <i>Ephedraceae</i> Dumort. – Қылшалар (Эфедровые)			
№	Название растений	Жизненная форма, экологические типы, географические элементы	Хозяйственные значения
1	2	3	4
1/1	<i>Ephedra distachya</i> L. – Қос масақшалы қылша (Эфедр двуколосковая)	кустарник, ксерофит, горносреднеазиатский-гималайский	лекарственное
Отдел: <i>Angiospermatophyta</i> – Жабықтүқымдылар (Покрытосеменные)			
Класс: <i>Monocotyledoneae</i> – Даражарнақтылар (Однодольные)			

2	Семейство: <i>Poaceae</i> Barnhart. – Астық (Злаки)		
2/1	<i>Bromus oxydon</i> Schrenk. – Тісті арпабас (Костёр острозубый)	однолетник, мезофит, горноцентральноазиатско-иранский	кормовое
3/2	<i>Bromus japonicus</i> Thunb. – Үлкен мортық (Костёр японский)	однолетник, мезофит, палеарктический	кормовое
4/3	<i>Bromus tectorum</i> L. – Тарақбоз арпабас (Костер кровельный)	однолетник, мезофит, голарктический	кормовое
5/4	<i>Festuca sulcata</i> (Hack.) Nym. p.p. – Кәдімгі бетеге (Овсяница бороздчатая, валлисская, Типчак)	многолетник, ксерофит, евразийский степной	кормовое
6/5	<i>Eremopyrum orientale</i> (L.) Jaub. & Spach. – Шығыс мортығы (Мортук восточный)	однолетник, ксерофит, турано-средиземноморский	кормовое
7/6	<i>Lasiagrostis splendens</i> (Trin.) Kunth. – Ақ ший (Чий блестящий)	многолетник, мезофит, горносибирско-иранский	кормовое, текстиль, целлюлозно-бумажные
8/7	<i>Poa stepposa</i> (Kryl.) Rochev. – Дала қоңырбасы (Мятлик степной)	многолетник, ксерофит, евразийский степной	кормовое
9/8	<i>Stipa orientalis</i> Trin. – Шығыс қау (Ковыль восточный)	многолетник, ксерофит, горносибирско-иранский	кормовое
3	Семейство: <i>Liliaceae</i> Juss. – Лалагүлдер (Лилейные)		
10/1	<i>Asparagus neglectus</i> Kar. & Kir. – Жүндіқара қасқыржем, Жаман қ (Спаржа незамеченная, пренебрежная)	многолетник, ксерофит, алтае-центральноказахстанско-тяньшаньский	кормовое
4	Семейство: <i>Iridaceae</i> Juss. – Құртқашағтар (Касатиковые)		
11/1	<i>Iris songarica</i> Schrenk. – Жоңғар құртқашаш (Касатик джунгарский)	многолетник, мезофит, туранский	лекарственное, декоративное
Класс: Dicotyledones – Қосжарнақтылар (Двудольные)			
5	Семейство: <i>Salicaceae</i> Mirb. – Талдар (Ивовые)		
12/1	<i>Populus talassica</i> Kom. ( <i>cathayana</i> ) – Талас терегі (Тополь таласский)	дерево, мезофит горноцентральноазиатский	декаративное
6	Семейство: <i>Ulmaceae</i> Mird. – Қарағаштар (Ильмовые)		
13/1	<i>Ulmus pumila</i> L. – Бұтақты қарағаш (Вяз перистоветвистый)	дерево, мезофит, голарктический	декаративное, дубильное
7	Семейство: <i>Polygonaceae</i> Juss. – Трандар (Гречишные)		
14/1	<i>Polygonum aviculare</i> L. – Қызыл таспа (Горец птичий)	однолетник, мезоксерофит, голарктический	кормовое, лекарственное
15/2	<i>Atraphaxis replicate</i> Lam. – Қайырма түйесіңір (Курчавка отогнутая)	кустарник, ксерофит, турано-средиземноморской	против эрозии
8	Семейство: <i>Chenopodiaceae</i> Vent. – Алабұталар (Маревые)		
16/1	<i>Chenopodium prostratum</i> Bunge. – Жатаған алабұта (Марь стелющаяся)	однолетник, мезофит горносибирско-горноцентральноазиатский	сорное
17/2	<i>Chenopodium strictum</i> Roth. – Қылтиған алабұта (Марь торчащая, прямая)	однолетник, восточноевропейско-азиатский.	кормовое, лекарственное
18/3	<i>Girgensohnia oppositiflora</i> (Pall.) Fenzl. – Қарсыгүл гиргенсония (Гиргенсония супротивнолистная)	многолетник, ксерофит ирано-туранский	кормовое
19/4	<i>Kochia prostrata</i> (L.) -Schrad. – Жатаған изен (Кохия стелющаяся)	полукустарник, ксерофит, палеарктический	кормовое, топливо
20/5	<i>Ceratocarpus utriculosus</i> Bluk. – Қалталы ебелек (Рогач сумчатый)	однолетник, ксерофит, турано-иранский	кормовое
21/6	<i>Krascheninnikovia ceratodes</i> (L.) Gueldenst. – Теріскен, мүйіз теріскен (Терескен роговидный)	кустарник, мезоксерофит палеарктический	кормовое, против эрозии, топливо

9	Семейство: <i>Berberidaceae</i> Juss. – Бөріқарақаттар (Барбарисовые)		
22/1	<i>Berberis heteropoda</i> Schrenk. – Түрліаяқ бөріқарақат (Барбарис шароплодный, разноцветножовый)	кустарник, мезофит, алтае-тяньшаньский	красительное, пищевое
23/2	<i>Berberis iliensis</i> M.Pop. – Іле бөріқарақат (Барбарис Илийский)	кустарник, мезофит, джунгаро-северо тяньшаньский	Эндем, красительное, пищевое, лекарственное, медоносное
10	Семейство: <i>Brassicaceae</i> Burnett. – Кресгүлділер (Крестоцветные)		
24/1	<i>Alyssum turkestanicum</i> Regel & Schmalh. – Шөл жауылша (Бурачок пустынный)	однолетник, ксерофит, палеарктический	кормовое
25/2	<i>Berteroa incana</i> (L.) DC. – Көк шытырша (Икотник серый)	двулетник, ксерофит, палеарктический	сорное
26/3	<i>Cardamine parviflora</i> L. – Үсақгүл баймана (Сердечник мелкоцветковый)	однолетник, мезофит палеарктический	лекарственное
27/4	<i>Isatis tinctoria</i> L. – Бояу шытыршық (Вайда красильная)	двулетник, ксерофит палеарктический	красительное
28/5	<i>Malcolmia trichocarpa</i> (Boiss. & Buhse) Botsch.- Түкжемiс айқайын (Малькольмия волосистоплодная)	однолетник, ксерофит джунгаро-иранский	декоративное
29/6	<i>Sisymbrium brassiciforme</i> C.A. Mey. – Капуста сарбасқұрай (Гулявник капустовидный)	двулетник, ксерофит, горноцентральноазиатско – иранский	сорное
11	Семейство: <i>Rosaceae</i> Juss. – Раушангүлдер (Розоцветные)		
30/1	<i>Armeniaca vulgaris</i> Lam. – Кәдімгі өрік (Абрикос обыкновенный)	дерево, мезофит джунгаро-тяньшаньский	витаминоносное
31/2	<i>Cotoneaster multiflorus</i> Bunge. – Көпгүл ығрай (Кизильник многоцветковый)	кустарник, мезофит, центральноазиатский	декоративное
32/3	<i>Cotoneaster melanocarpus</i> Fisch. ex Blytt. – Қара жеміс ығрай (Кизильник черноплодный)	кустарник, мезофит, палеарктический	декоративное
33/4	<i>Crataegus songarica</i> K. Koch. – Жоңғар долана (Боярышник джунгарский)	дерево, мезофит джунгаро-иранский	лекарственное
34/5	<i>Potentilla orientalis</i> Juz. – Шығыс қазтабан (Лапчатка восточная)	многолетник, мезофит горноцентральноазиатско-иранский	лекарственное, кормовые
35/6	<i>Spiraea hypericifolia</i> L. – Шайқурай тобылғы (Таволга зверобоелистая)	кустарник, ксеромезофит, горносибирско-иранский	декоративное
36/7	<i>Rosa dsharkenti</i> Chrshan. – Жаркент раушан (Шиповник джаркентский).	кустарник, мезофит, джунгарский	эндем витаминноносное, декоративное
37/8	<i>Rosa iliensis</i> Chrshan. – Іле раушан (Шиповник Илийский)	кустарник, мезофит, туранский	эндем витаминноносное, декоративные
38/9	<i>Rosa Beggeriana</i> Schrenk – Беггер раушан (Шиповник Беггеровский)	кустарник, мезофит, горноцентральноазиатский	эндем витаминноносное, декоративное
12	Семейство: <i>Fabaceae</i> Lindy. – Бұршақтар (Бобовые)		
39/1	<i>Glycyrrhiza uralensis</i> Fisch. – Орал мия (Солодка уральская)	многолетник, мезоксерофит, горносибирско- горноцентральноазиатский	пищевое, лекарственное, противозеронозное
40/2	<i>Medicago lupulina</i> L. – Құлмақ жоңышқа (Люцерна хмелевидная)	однолетник, мезофит, палеарктический	кормовое
41/3	<i>Onobrychis tanaitica</i> (arenaria) Spreng. – Дон эспарцет (Эспарцет донской)	многолетник, мезофит, панноно-казахстанский	кормовое

42/4	<i>Pseudosophora alopecuroides</i> (L.) Bunge. – Кәдімгі ақмия (Брунец лисохвостная)	многолетник, мезофит, горноцентральноазиатско - иранский	сорное, ядовитое
43/5	<i>Trifolium repens</i> L. ( <i>Amoria repens</i> ) – Ақ беде (Клевер ползучий, белый)	многолетник, мезофит палеарктический	кормовое
44/6	<i>Trifolium pratense</i> L. – Қызылбас беде (Клевер луговой, красный)	многолетник, мезофит палеарктический	кормовое
45/7	<i>Trigonella arcuata</i> С.А. Меу. – Илек бойдана (Пажитник дугообразный)	однолетник, ксерофит, монголо-турано-иранский	кормовое
46/9	<i>Vicia cracca</i> L. – Тышқан сиыржоңышқасы (Горошек мышиный).	многолетник, мезофит, палеарктический	кормовое
47/10	<i>Caragana balchaschensis</i> (Ком.) Pojark. – Балқаш караган (Карагана балхашская)	кустарник, мезоксерофит, түранский	эндем
13	Семейство: <i>Zygophyllaceae</i> R.Br. – Түйетабандар (Парнолистниковые)		
48/1	<i>Zygophyllum obliquum</i> М.Рор. – Алабүйір түйетабан (Парнолистник неравнобокий)	многолетник, мезофит, алтае-тяньшаньский	сорное
49/2	<i>Peganum harmala</i> L. – Кәдімгі адыраспан (Гармала обыкновенная)	многолетник, ксерофит монголо-туранский средиземноморский	лекарственное, красительное
14	Семейство: <i>Aceraceae</i> Juss. – Үйенкілер (Кленовые)		
50/1	<i>Aser semenovii</i> Regel & Herder. – Семенов үйенкі (Клен Семенова)	кустарник или небольшое дерево, мезофит, джунгаро-иранский	декоративное
15	Семейство: <i>Tamaricaceae</i> Link. – Жыңғылдар (Гребенщиковые)		
51/1	<i>Tamarix ramosissima</i> Ledeb. – Қызыл жыңғыл (Гребенщик многоветвистый)	кустарник или небольшое дерево, мезоксерофит, монголо-турано-иранский	декоративное, дубильные
16	Семейство: <i>Elaeagnaceae</i> Juss. – Жиделер (Лоховые)		
52/1	<i>Elaeagnus oxycarpa</i> Schlecht. – Үшкіржеміс (Лох остроплодный)	дерево, ксерофит, туранский	декоративное, дубильное, лекарственное, витаминноносное, кормовое, медоносное
17	Семейство: <i>Convolvulaceae</i> Juss. – Шырмауықтар (Вьюнковые)		
53/1	<i>Convolvulus arvensis</i> L. – Далалық шырмауық (Вьюнок полевой)	многолетник, мезофит, голарктический	сорное
18	Семейство: <i>Boraginaceae</i> Juss. – Айлаулықтар (Бурачниковые)		
54/1	<i>Echium vulgare</i> L. – Кәдімгі көкбасгүл (Синяк обыкновенный)	двулетник, мезоксерофит, палеарктический	медоносное
55/2	<i>Lappula brachycentra</i> (Ledeb.) Guerke. Қысқатікен кәріқызы – (Липучка короткошиповиковая)	двулетник, мезофит центральноазиатский	сорное
56/3	<i>Lappula spinocarpos</i> (Forssk.) Aschers. – Тікенжеміс кәріқыз (Липучка колючеплодная)	однолетник, ксерофит турано-иранский	сорное
57/1	<i>Nonea caspica</i> (Willd.) G. Don fil. – Каспий ноннеа (Ноннея каспийская)	однолетник, ксеромезофит, турано-иранский	сорное, красительное
19	Семейство: <i>Labiatae</i> Juss. – Ерінгүлділер (Губоцветные)		
58/1	<i>Marrubium vulgare</i> L. – Кәдімгі шандра (Шандра обыкновенная)	многолетник, ксерофит, палеарктический	медоносное, лекарственное
59/2	<i>Scutellaria soongorica</i> Juz. – Жоңғар томағашөп (Шлемник джунгарский)	многолетник, ксерофит джунгарский	эндем
20	Семейство: <i>Solanacea</i> Hall. – Алқалар (Пасленовые)		

60/1	<i>Hyoscyamus niger</i> L. – Қара мендуана (Белена черная)	двулетник, ксерофит, палеарктический	ядовитое, лекарственное, сорное
21	Семейство: <i>Scrophulariaceae</i> Juss. – Сабынкөк – Норичниковые		
61/1	<i>Linaria transiliensis</i> Kurjian. – Летау сиякөк (Льянка заилийская)	многолетник, мезофит, джунгаро-памяроалайский	медоносное, сорное
22	Семейство: <i>Rubiaceae</i> Juss. – Рияндар (Мареновые)		
62/1	<i>Galium aparine</i> L. – Жабысқақ қызылбояу (Подмаренник ноний)	однолетник, ксеромезофит, голарктический	витаминоносное, сорное
23	Семейство: <i>Caprifoliaceae</i> – Үшқаттар (Жимолостные)		
63/1	<i>Lonicera almannii</i> Regel & Schmalh. – Альтман үшқат (Жимолость Альтмана)	кустарник, ксеромезофит, джунгаро-восточно-тяньшаньский	декоративное
64/2	<i>Lonicera iliensis</i> Pojark. – Іле үшқат (Жимолость Илийская)	кустарник, ксеромезофит, джунгаро-восточно-тяньшаньский	эндем, декоративное, эфирное
24	Семейство: <i>Valerianaceae</i> Batsch DC. – Валерианалар (Валериановые)		
65/1	<i>Patrinia intermedia</i> (Hornem.) Roem. & Schult. – Орта патриния (Патриния средняя)	многолетник, мезофит, алтае-горноцентральноазиатский	лекарственное
25	Семейство: <i>Asteraceae</i> Dumort. – Күрделігүлділер (Сложноцветные)		
66/1	<i>Artemisia vulgaris</i> L. – Ермен жусан (Полынь обыкновенная)	многолетник, ксерофит, голарктический	лекарственное, сорное, эфирное
67/2	<i>Artemisia scoparia</i> Waldst. & Kit. – Шашакты жусан (Полынь метельчатая).	одно- или двулетник, ксерофит, палеарктический	кормовое, сорное, эфирное
68/3	<i>Artemisia heptapotamica</i> Poljak. – Жетісу жусан (Полынь семиреченская)	многолетник, ксерофит, джунгаро-северо-тяньшаньский	эндем, эфирное
69/4	<i>Artemisia dracunculus</i> L. – Шыралжын жусан (Полынь эстрагон)	многолетник, ксерофит, голарктический	пищевое, сорное, эфирное, витаминносное
70/5	<i>Artemisia absinthium</i> L. – Ащы жусан (Полынь горкая)	многолетник, ксерофит, голарктический	сорное, эфирное, лекарственное
71/6	<i>Centaurea squarrosa</i> Willd. – Тарбиған гүлкекіре (Василёк растопыренный)	двулетник, ксерофит, джунгар-иранский	сорное
72/7	<i>Cichorium intybus</i> L. – Кәдімгі цикорий (Цикорий обыкновенный)	многолетник, ксерофит, палеарктический	пищевое, медоносное лекарственное, кормовое, сорное
73/8	<i>Cirsium sieversii</i> (Fisch. & C.A. Mey.) Petrak – Сиверс сарыкалуені (Бодяк Сиверса)	многолетник, мезофит, алтае-тяньшаньский	сорное
74/9	<i>Onopordum acanthium</i> L. – Тікенді шағыртікен (Татарник колючий)	двулетник, ксерофит, палеарктический	пищевое, лекарственное,
75/10	<i>Taraxacum longipyramidatum</i> Schischk. – Мырза бақбақ (Одуванчик длиннопирамидковый)	многолетник, мезофит, джунгаро-памяроалайский	эндем
76/11	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg. – Кәдімгі бақбақ (Одуванчик обыкновенный)	многолетник, мезофит, голарктический	пищевое, медоносное лекарственное, кормовое
77/12	<i>Tragopogon capitatus</i> S. Nikit. – Басты қойжелкек (Козлобородник головчатый)	двулетник, мезофит, горноцентральноазиатский–центральнокзахстанский	кормовое, декоративное
78/13	<i>Xanthium strumarium</i> L. – Кәдімгі сарысоя (Дурнишник обыкновенный)	однолетник, ксерофит, голарктический	лекарственное, красительное, сорное
79/14	<i>Acroptilon repens</i> L. DC. – Жатаған уекіре (Горчак ползучий)	многолетник, мезоксерофит, монголо-туранский	лекарственное, сорное

В пределах первой популяции *R. dsharkenti* нами были описаны несколько растительных сообществ и в них выявлены 79 видов сосудистых растений, относящихся 64 родам, 25 семействам, двум классам отдела цветковых и одному классу отдела голосеменных растений. Среди них по жизненным формам растений, по классификации Раункиера преобладают гемикриптофиты 35 видов или 44,30% флоры популяции (Raunkiaer, 1934). Многолетние травянистые растения теряют надземные побеги в начале неблагоприятного сезона, сохраняя живыми лишь прикорневые части, защищённые почвой и опавшей листвой, где формируются почки для нового сезона с листьями и цветками. Однолетние и двухлетние растения (терофиты) составляют 21 вид, или 26,58% флоры популяции, и переносят неблагоприятный период исключительно в виде семян. Третью позицию занимают микрофанерофиты 14 видов, или 17,72% флоры популяции. К данной группе относятся кустарники высотой от 2 до 8 м, у которых возобновительные почки находятся на значительной высоте над почвенной поверхностью и защищены чешуйчатыми покровами. Четвёртую категорию составляют мезофанерофиты, включающие 5 видов, что составляет 6,32% от флоры участка. Эти деревья достигают 8–30 м в высоту, их почки возобновления расположены высоко над землёй, надёжно защищены чешуями и выдерживают все неблагоприятные воздействия зимнего периода и засухи. Наконец, последнюю пятую позицию занимают хамефиты 4 вида, или 5,06% флоры популяции. Эти растения характеризуются тем, что их почки, предназначенные для переживания неблагоприятных периодов, развиваются на побегах, расположенных на поверхности почвы или очень близко к ней. В районах с снежным покровом зимой почки защищаются снегом, а в тёплых зонах их частично укрывают отмершие остатки растительности, лежащие на поверхности земли. Это полукустарники, полукустарнички и растения – подушки.

Среди экологических групп растений наибольшее количество составляют мезофиты – 36 видов, что составляет 45,56% флоры популяции. Далее следуют ксерофиты – 31 вид (39,24%), затем мезоксерофиты – 7 видов (8,86%), и на последнем месте ксеромезофиты – 5 видов (6,32%).

**Таблица 2**  
Жизненная форма растений

№	Форма жизни	Количество видов	
		абсолютное число	%
1	Гемикриптофиты	35	44,30
2	Терофиты	21	26,58
3	Микрофанерофиты	14	17,72
4	Мезофанерофиты	5	6,32
5	Хамефиты	4	5,06

**Таблица 3**  
Экологические типы

№	Форма жизни	Количество видов	
		абсолютное число	%
1	Мезофиты	36	45,56
2	Ксерофиты	31	39,24
3	Мезоксерофиты	7	8,86
4	Ксеромезофиты	5	6,32

Флоры растительных сообществ с участием *R. dsharkenti* по классификации Н.В. Павлова (1942) распределили 12 хозяйственно полезным группам (таблица-4) (Павлов, 1942). Среди всех растений по видовому составу и частоте встречаемости лидирующую позицию занимают противозерозионные растения в своем составе имеют 79 вида или 100%, кормовые виды 27 видов, что составляет 34,17% флоры данного сообщества. На втором месте расположились сорные и лекарственные растения 21 вид или 26,58%. Следует отметить, что многие сорные виды пригодны для кормления скота. Третью позицию занимают декоративные растения 15 видов, или 18,98% флоры сообщества. Остальные группы полезных растений распределяются по убывающей следующим образом: медоносные и витаминоносные растения по 7 видов в каждой группе, что составляет 7,59%, пищевые, эфирномасличные и красильные растения по 6 видов (7,59%). Доля остальных категорий полезных растений незначительна. Ядовитые растения составляют по 2 вида или 2,53%. Целлюлозно-бумажные растения составляют 1 вида или 1,26%.

**Таблица 4**  
Хозяйственно-полезные группы растений

№	Полезные группы	Количество видов	
		абсолютное число	%
1	Противоэрозионные	79	100
2	Кормовые	27	34,17
3	Сорные	21	26,58
4	Лекарственные	21	26,58
5	Декоративные	15	18,98
6	Витаминоносные	7	8,86
7	Медоносные	7	8,86
8	Пищевые	6	7,59
9	Эфирномасличные	6	7,59
10	Красильные	6	7,59
11	Ядовитые	2	2,53
12	Целлюлозно-бумажные	1	1,26

Некоторые виды растений из выше перечисленных групп имеют комплексное значение. Например, *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. одновременно относится к пищевым, лекарственным, техническим и противоэрозионным растениям. *Elaeagnus oxycarpa* Schlecht. обладает многофункциональным значением, будучи использованной в строительстве, как пищевое и кормовое

растение, лекарственное, витаминное, красильное, дубильное, медоносное, целлюлозно-бумажное, декоративное и противоэрозионное.

Из всех полезных групп растений особое место занимают противоэрозионные растения. Древесные породы, кустарники, полукустарники, кустарнички, полукустарнички и многолетние травянистые растения отлично закрепляют субстрат, тем самым защищают почвы от водной и ветровой эрозии. В этом немалое участие принимают, однолетники эфемеры и эфемероиды, они густо покрывают поверхности почвы, особенно в весеннем фоне на юге пустынной зоны. Таким образом есть основания все виды высших растений начиная от деревьев и кустарников, кончая однолетниками, включительно эфемеров и эфемероидов с коротким периодом вегетации отнести к группе противоэрозионных растений.

В растительных сообществах, включающих *R. dsharkenti*, по классификации В.П. Голоскокова (1984) было выявлено 28 географических элемента (таблица 5) (Голоскоков, 1984). Наибольшее количество видов приходится на палеарктические элементы – 15 видов, что составляет 18,99%. На втором месте идет голарктические элементы 10 видов или 12,66%. На третьем месте горноцентральноазиатский-иранский 4 видов или 5,06%. Остальные географические элементы представлены незначительным количеством видов.

**Таблица 5**  
Связь видового состава 1-й популяции с флорами других регионов

№	Географические элементы	Однолетние и двулетние травянистые растения	Многолетние травянистые растения	Кустарники, полукустарники	Деревья	Всего	%
1	Палеарктические	7	5	3	-	15	18,99
2	Голарктические	4	5	-	1	10	12,66
3	Горно-среднеазиатско-иранские	2	2	-	-	4	5,06
4	Туранские	-	1	2	1	4	5,06
5	Монголо-туранско-иранские	1	-	1	-	2	2,53
6	Джунгаро-иранские	2	-	-	2	4	5,06
7	Горно-центральноазиатско-иранские	4	-	-	-	4	5,06
8	Горно-сибирско-иранские	-	2	1	-	3	3,80
9	Горно-центральноазиатские	-	-	2	1	3	3,80
10	Туранско-иранские	3	-	-	-	3	3,80
11	Джунгарские	-	1	1	1	3	3,80

Продолжение таблицы

№	Географические элементы	Однолетние и дву- летние травяни- стые растения	Многолетние травянистые растения	Кустарники, полукустар- ники	Деревья	Всего	%
12	Горно-сибирские – горно- центральноазиатские	1	1	-	-	2	2,53
13	Евразийские степные	-	2	-	-	2	2,53
14	Туранско-средиземноморские	1	-	1	-	2	2,53
15	Алтайско-тяньшаньские	-	2	-	-	2	2,53
16	Джунгарско-памиро-алайские	-	2	-	-	2	2,53
17	Джунгарско- восточнотяньшаньские	-	2	-	-	2	2,53
18	Джунгарско- северотяньшаньские	-	1	1	-	2	2,53
19	Алтайско-центральноказахстан- ско-тяньшаньские	-	1	-	-	1	1,27
20	Восточноевро-азиатские	1	-	-	-	1	1,27
21	Ирано-туранские	1	-	-	-	1	1,27
22	Паннонско-казахстанские	-	1	-	-	1	1,27
23	Джунгарско-тяньшаньские	-	-	-	1	1	1,27
24	Центральноазиатские	1	-	-	-	1	1,27
25	Алтайско-горно- центральноазиатские	-	1	-	-	1	1,27
26	Горно-центральноазиатские – центральноказахстанские	1	-	-	-	1	1,27
27	Монголо-туранские	-	1	-	-	1	1,27
28	Понтийско- древнесредиземноморские	-	-	1	-	1	1,27

Примечание: процентное соотношение рассчитано от общего числа выявленных видов растений – 79. Незначительное отклонение суммы процентов от 100% связано с округлением значений до двух десятичных знаков.

Из них ведущие место занимают палеарктические, иранские, голарктические, горно-центральноазиатские, Джунгарские и иранские элементы. То, что в пределах описанного нами растительных сообществ встречаются флора из 28 географических элементов, это вполне закономерно. Во-первых, описанный нами растительные сообщества находится на южной оконечности Джунгарского Алатау. Джунгарский Алатау как известно находится в центре Азиатского континента и простирается с востока на юго-западном направлении. Во-вторых, Джунгарский Алатау на северо и северо-западе граничит пустынями, на востоке с низкогорным массивом Тарбагатай, на юге системами высоких гор Тянь-шанья. В третьих, Джунгарский Алатау является миграционным путем, через который с востока проникают Алтае-саянские,

западно сибирские виды, а с юга и юго-востока Тянь-шаньские виды. Отсюда такой большой конгломерат и смещение видов из различных почвенно-климатических зон и горных систем в Джунгарском Алатау.

Из выявленных нами 79 видов растений растительных сообществ с участием *R. dsharkenti* 8 считаются эндемиками флоры Казахстана. Причем два из них как узкоэндемичные растения, сокращающимися ареалами вошли в Красную книгу Казахстана. Это *Berberis iliensis* M.Pop. и *Lonicera iliensis* Pojark.

Интересующий нас вид *R. dsharkenti* также является узкоэндемичным растением флоры Казахстана нуждающиеся в охране. Поэтому флористическое и геоботаническое изучение растительных сообществ с участием *R. dsharkenti* имеет важное значение для выявления особен-

ностей его местообитания, определения природоохранной ценности исследуемой территории и обоснования необходимости дальнейшего мониторинга данного вида.

### Заключение

В ходе исследования была выявлена первая популяция редкого эндемичного вида *Rosa dsharkenti* Chrshan., произрастающая в долине реки Усек, в районе низкогорного массива «Кызыл Еспе» на южных склонах Джунгарского Алатау. Проведённый анализ показал, что данный вид встречается в составе кустарниково-древесных и травянистых растительных сообществ, формирующихся в относительно увлажнённых условиях долины реки. Учитывая ограниченное распространение *R. dsharkenti*, выявленное местообитание представляет особую природоохранную значимость.

Флористический анализ растительных сообществ с участием *R. dsharkenti* позволил выявить 79 видов растений, относящихся к 64 родам, 25 семействам, 28 географическим элементам и 12 хозяйственно-полезным группам. В структуре флоры преобладают гемикриптофиты среди жизненных форм и мезофиты среди экологических групп, что отражает особенности растительного покрова исследуемой территории. В составе флоры также зафиксированы 8 эндемичных для Казахстана видов, включая два редких вида, включённых в Красную книгу Казахстана – *Berberis iliensis* М.Рор. и *Lonicera iliensis* Рожарк.

Полученные данные свидетельствуют о высоком флористическом разнообразии растительных сообществ с участием *R. dsharkenti* и подчёркивают ценность исследуемого участка как местообитания редкого эндемичного вида. Наличие эндемичных и редких видов-спутников усиливает природоохранную значимость данной

территории и указывает на необходимость её дальнейшего мониторинга.

Учитывая узкий ареал распространения *R. dsharkenti* и потенциальную уязвимость его местообитания к природным пожарам и изменению условий среды, целесообразно продолжить изучение данного вида и рассмотреть возможность его интродукции в ботанические сады Казахстана. Интродукция может способствовать сохранению генофонда редкого эндемичного вида и созданию основы для его дальнейшего научного и декоративно-селекционного изучения.

### Вклад авторов

Т.Б. Рысқали: основной исполнитель данной работы: проведение исследовательской работы, сбор необходимых материалов, получение и обработка экспериментальных данных, анализ полученных результатов, подготовка основных материалов для статьи; А.А. Аметов: научный руководитель данной исследовательской работы: участие в постановке цели и задач исследования, научное и методическое руководство, предоставление рекомендаций и направлений по выполнению исследования, обсуждение результатов исследования, просмотр и корректировка научного содержания статьи; С.С. Мауленова: помощь в написании текста статьи, обработка и систематизация исследовательских материалов, подготовка отдельных разделов рукописи, участие в редактировании текста статьи; С.Т. Назарбекова: участие в обсуждении результатов исследования, просмотр отдельных разделов рукописи и помощь в редактировании; А.Ж. Чилдибаева: участие в анализе литературных источников, обсуждение исследовательских материалов, помощь в проверке и редактировании текста статьи; Ч.Ж. Алдасугурова: участие в подготовке и оформлении рукописи.

### References

- Ahmed, M., Khan, N., & Rahman, S. (2020). Cryopreservation strategies for conservation of endangered Rosaceae species. *CryoLetters*, 41 (3), 145–153.
- Arystangaliyev, S. A., & Ramazanov, E. R. (1977). *Rasteniya Kazakhstana* [Plants of Kazakhstan]. Gylym Publishing. (in Kazakh)
- Baitulin, I. O. (2006). Biologicheskoe raznoobrazie gornyykh sistem Kazakhstana, ikh ustoichivoe ispolzovanie i okhrana [Biological diversity of mountain systems of Kazakhstan, their sustainable use and conservation]. In *Sokhraneniye bioraznoobraziya gornyykh ekosistem Kazakhstana* [Conservation of biodiversity of mountain ecosystems of Kazakhstan] (pp. 27–31). (in Russian)
- Chen, X., Liu, Y., Zhao, H., & Sun, J. (2023). Micropropagation and biotechnology approaches for rare *Rosa* species. *Plant Biotechnology Journal*, 21 (4), 845–859.

- Fang, R., Li, D., & Zhou, Y. (2020). Assessment of genetic diversity in wild *Rosa* populations using SSR markers. *Botanical Studies*, 61 (12), 1–10.
- Polevaya geobotanika* [Field geobotany]. (1959–1976). Vols. 1–5. USSR Academy of Sciences. (in Russian)
- Flora Kazakhstana* [Flora of Kazakhstan]. (1956–1966). In 9 vols. N. V. Pavlov (Ed.). Academy of Sciences of KazSSR. (in Russian)
- Goloskokov, V. P. (1969). Osobennosti vidovogo endemizma vo flore Kazakhstana [Features of species endemism in the flora of Kazakhstan]. *Botanicheskie materialy gerbariya Instituta botaniki AN KazSSR*, 6, 3–12. (in Russian)
- Goloskokov, V. P. (1984). *Flora Dzhungarskogo Alatau: Konspekt i analiz* [Flora of the Dzungarian Alatau: Synopsis and analysis]. Nauka. (in Russian)
- Huang, L., Wang, Y., & Chen, P. (2021). Ecological evaluation of mountain rose populations in Central Asia. *Alpine Botany*, 131 (2), 211–225.
- Illyustrirovannyi opredelitel rastenii Kazakhstana* [Illustrated key to the plants of Kazakhstan]. (1969–1972). Vols. 1–2. Nauka. (in Russian)
- Illyustrirovannyi opredelitel rastenii Kazakhstana* [Illustrated key to the plants of Kazakhstan]. (1972). Vol. 2. Nauka. (in Russian)
- Ivashchenko, A. A. (2004). *Rastitelnyi mir Kazakhstana* [Plant world of Kazakhstan]. Almaty Kitap Publishing. (in Russian)
- Kashin, A. S., Kritskaya, T. A., Petrova, N. A., & Shilova, I. V. (2015). *Metody izucheniya populyatsii tsvetkovykh rastenii* [Methods of studying flowering plant populations]. Saratov. (in Russian)
- Khrzhanovsky, V. G. (1941). Dikie rozy Kazakhstana [Wild roses of Kazakhstan]. *Narodnoe khozyaistvo Kazakhstana*, 5, 21–24. (in Russian)
- Khrzhanovsky, V. G. (1958). *Rozy: Filogeniya i sistematika* [Roses: Phylogeny and systematics]. Sovetskaya nauka. (in Russian)
- Khrzhanovsky, V. G., Viktorov, S. V., Litvak, P. V., & Rodionov, B. S. (1986). *Botanicheskaya geografiya s osnovami ekologii rastenii* [Botanical geography with basics of plant ecology]. Agropromizdat. (in Russian)
- Kong, J., Zhao, Q., & Lin, J. (2018). Population ecology of high-altitude *Rosa* species in Eurasia. *Journal of Mountain Science*, 15 (9), 1783–1794.
- Kurmanbayeva, M. S., & Mukhitdinov, N. M. (2023). *Populyatsiyalyk biologiya zhane ekologiya* [Population biology and ecology]. Kazakh University. (in Kazakh)
- Li, W., Zhang, L., & Liu, Q. (2022). Genome-wide assessment of diversity and phylogeny in *Rosa* species. *Molecular Ecology Resources*, 22(5), 1450–1462.
- Neshatayev, Yu. N. (1987). *Metody analiza geobotanicheskikh materialov: Uchebnoe posobie* [Methods of analysis of geobotanical materials: Textbook]. Leningrad University Press. (in Russian)
- Pavlov, N. P. (1961). *Flora Kazakhstana* [Flora of Kazakhstan]. Nauka. (in Russian)
- Pavlov, N. V. (1942). *Dikorastushchie poleznye i tekhnicheskie rasteniya SSSR* [Wild useful and technical plants of the USSR]. Moscow. (in Russian)
- Raunkiaer, C. (1934). *The life forms of plants and statistical plant geography*. Oxford University Press.
- Skvortsov, A. K. (1977). *Gerbarii: Posobie po metodike i tekhnike* [Herbarium: A guide to methods and techniques]. Nauka. (in Russian)
- Wang, X., Liu, H., & Yu, J. (2019). Phylogenetic relationships in the genus *Rosa* based on plastid genomes. *Plant Systematics and Evolution*, 305 (10), 843–856.
- Zhang, Y., Han, J., & Liu, M. (2021). Molecular phylogeny and evolutionary history of *Rosa* species in Eurasia. *Frontiers in Plant Science*, 12, Article 654872.
- Zaugolnova, L. B., Zlobin, Yu. A., & Klimenko, A. A. (2013). *Populyatsii redkikh vidov rastenii: Teoriya i metody* [Populations of rare plant species: Theory and methods]. Universitetskaya Kniga. (in Russian)
- Zhabkova, L. A. (1987). Dinamika lugovykh populyatsii rastenii [Dynamics of meadow plant populations]. In *Dinamika tsenopopulyatsii travyanistykh rastenii* [Dynamics of cenopopulations of herbaceous plants] (pp. 9–19). Naukova Dumka. (in Russian)
- Zhabkova, L. A. (1995). *Populyatsionnaya zhizn lugovykh rastenii* [Population life of meadow plants]. Yoshkar-Ola. (in Russian)

#### **Сведения об авторах:**

Рысқали Толғанай (автор для корреспонденции) – PhD-докторант, Қазақстанның ұлттық университетінің алы-Фараби (Алматы, Қазақстан, e-mail: tolganay\_0220@mail.ru).

Аметов Абибулла – кандидат биологиялық ғылымдар, профессор кафедра ботаника және агроэкология, Қазақстанның ұлттық университетінің алы-Фараби (Алматы, Қазақстан, e-mail: ametov.abibulla@gmail.com).

Мауленова Салтанат – старший преподаватель кафедра зоология, гистология және цитология, Қазақстанның ұлттық университетінің алы-Фараби (Алматы, Қазақстан, e-mail: maulenova.saltanat11@gmail.com).

Чилдибаева Асель – PhD, и.о. доцента кафедра ботаника және агроэкология, Қазақстанның ұлттық университетінің алы-Фараби (Алматы, Қазақстан, e-mail: a.zh.childebaeva@gmail.com).

Назарбекова Салтанат – кандидат биологиялық ғылымдар, профессор кафедра ботаника және агроэкология, Қазақстанның ұлттық университетінің алы-Фараби (Алматы, Қазақстан, e-mail: snazarbekova@mail.ru).

Алдасуғурова Чинарғұл – PhD-докторант, Қазақстанның ұлттық университетінің алы-Фараби (Алматы, Қазақстан, e-mail: aldasygyrova.chinar.77@gmail.com).

**Information about authors:**

*Ryskali Tolganay (corresponding author) – PhD-student, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: tolganay\_0220@mail.ru).*

*Ametov Abibulla – candidate of biological sciences, professor of the department of botany and agroecology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: ametov.abibulla@gmail.com).*

*Maulenova Saltanat – senior lecturer of the department of zoology, histology, and cytology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: maulenova.saltanat11@gmail.com).*

*Childibayeva Assel – PhD, Acting Associate Professor of the department of botany and agroecology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: a.zh.childebaeva@gmail.com).*

*Nazarbekova Saltanat – professor of the department of botany and agroecology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: snazarbekova@mail.ru).*

*Aldassugurova Chinargul – PhD-student, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: aldasygyrova.chinar.77@gmail.com).*

**Авторлар туралы мәлімет:**

*Рысқали Толғанай (хат алмасуға жауапты автор) – PhD докторант, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: tolganay\_0220@mail.ru).*

*Аметов Абибулла – биология ғылымдарының кандидаты, ботаника және агроэкология кафедрасының профессоры, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: ametov.abibulla@gmail.com).*

*Мауленова Салтанат – зоология, гистология және цитология кафедрасының аға оқытушысы, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: maulenova.saltanat11@gmail.com).*

*Чилдибаева Асель – PhD, ботаника және агроэкология кафедрасының доценті м.а., әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: a.zh.childebaeva@gmail.com).*

*Назарбекова Салтанат – биология ғылымдарының кандидаты, ботаника және агроэкология кафедрасының профессоры, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: snazarbekova@mail.ru).*

*Алдасугурова Чинаргул – PhD докторант, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: aldasygyrova.chinar.77@gmail.com).*

*Поступило 14 декабря 2025 года*

*Принято 15 июня 2026 года*

IRSTI 34.01.05

<https://doi.org/10.26577/bb107220262>

G.A. Sadyrova<sup>1\*</sup>, M.M. Dauletbayeva<sup>2</sup>, A.A. Shormanova<sup>3</sup>,  
K.K. Khamitova<sup>4</sup>, G.A. Sadyrov<sup>5</sup>, S.A. Userbayeva<sup>6</sup>, T.M. Zhaparkulov<sup>6</sup>,  
M.O. Aitzhanova<sup>2</sup>, Z.M. Yeraliyeva<sup>7</sup>, Z.A. Orynbayeva<sup>7</sup>

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

<sup>2</sup>Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty, Kazakhstan

<sup>3</sup>Institute of Botany and Phytointroduction, Almaty, Kazakhstan

<sup>4</sup>Central Asian-German Institute for Ecosystem Conservation and Biodiversity  
of the Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

<sup>5</sup>Kazakh Academy of Sports and Tourism, Almaty, Kazakhstan

<sup>6</sup>Ile-Alatau National Park, Almaty, Kazakhstan

<sup>7</sup>Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan

\*e-mail: [gulbanu-s@mail.ru](mailto:gulbanu-s@mail.ru)

## ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL STATE OF THE POPULATION OF THE SPECIES *SCHMALHAUSENIA NIDULANS* (REGEL) PETR. OF THE FLORA OF THE NORTHERN TIEN SHAN

This article presents the results of a comprehensive assessment of the ecological status of populations of the rare endemic species *Schmalhausenia nidulans* native to the high-mountain regions of the Northern Tien Shan. The aim of the study was to investigate the current state of the species populations by analyzing their numbers, ontogenetic structure, morphometric parameters, and anatomical features. Two natural populations of the species were examined: the first population, located on the Uzynkara Ridge at an altitude of 3003 m above sea level, and the second population, growing on the Ile-Alatau Ridge at an altitude of 3260 m above sea level. During the field research, the population size, age structure, and morphological traits of individuals at the juvenile, immature, virginal, and generative stages of development were studied, and an anatomical analysis of the stem structure was also conducted. Both populations were found to be characterized by a complete ontogenetic spectrum, indicating their resilience and capacity for natural self-sustainment. The Ile-Alatau population is characterized by higher abundance and better plant morphometric parameters, which is associated with more favorable environmental conditions in the habitat. The Uzynkara Ridge population is characterized by smaller individuals but maintains a stable age structure and high viability. An anatomical study revealed a radial secondary stem structure with well-developed conductive and mechanical tissues, ensuring the species' adaptation to the extreme conditions of the high-altitude environment. The scientific novelty of this study lies in the comparative population-ontogenetic, morphometric, and anatomical analysis of high-altitude *Schmalhausenia nidulans* populations, which provided new information on the environmental resilience and adaptive mechanisms of this rare endemic species. The obtained results can be used to develop measures for monitoring, conservation, and protection of this plant.

**Keywords:** *Schmalhausenia nidulans*, population, ontogenetic structure, morphological features, Uzynkara, Ile Alatau.

Г.А. Садырова<sup>1\*</sup>, М.М. Даулетбаева<sup>2</sup>, А.А. Шорманова<sup>3</sup>, К.К. Хамитова<sup>4</sup>  
Г.А. Садыров<sup>5</sup>, С.А. Үсербаева<sup>6</sup>, Т.М. Жапаркулов<sup>6</sup>,  
М.А. Айтжанов<sup>2</sup>, Ж.М. Ералиева<sup>7</sup>, Ж.А. Орынбаева<sup>7</sup>

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

<sup>2</sup>Қазақ ұлттық әйелдер педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан

<sup>3</sup>Ботаника және фитоинтродукция институты, Алматы, Қазақстан

<sup>4</sup>Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің Орта Азия-Герман экожүйелерді сақтау және биоәртүрлілік институты, Алматы, Қазақстан

<sup>5</sup>Қазақ спорт және туризм академиясы, Алматы, Қазақстан

<sup>6</sup>Іле-Алатау ұлттық саябағы, Алматы, Қазақстан

<sup>7</sup>Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан

\*e-mail: gulbanu-s@mail.ru

### Солтүстік Тянь-Шань флорасының *Schmalhausenia nidulans* (Regel) Petr. түрінің популяциясының экологиялық жағдайын бағалау

Бұл мақалада Солтүстік Тянь-Шаньның биік таулы аймақтарында мекендейтін сирек кездесетін эндемикалық *Schmalhausenia nidulans* түрінің популяцияларының экологиялық жағдайын кешенді бағалау нәтижелері ұсынылған. Зерттеудің мақсаты түр популяцияларының санын, онтогенетикалық құрылымын, морфометриялық параметрлерін және анатомиялық ерекшеліктерін талдау арқылы олардың қазіргі жағдайын зерттеу болды. Түрдің екі табиғи популяциясы зерттелді: бірінші популяция Ұзынқара жотасында теңіз деңгейінен 3003 м биіктікте орналасқан және екінші популяция Іле-Алатау жотасында теңіз деңгейінен 3260 м биіктікте өседі. Далалық зерттеу барысында популяция мөлшері, жас құрылымы және дамудың жасөспірім, жетілмеген, тың және генеративті сатыларындағы даралардың морфологиялық ерекшеліктері зерттелді, сондай-ақ сабақ құрылымының анатомиялық талдауы жүргізілді. Екі популяция да толық онтогенетикалық спектрмен сипатталатыны анықталды, бұл олардың төзімділігі мен табиғи өзін-өзі қамтамасыз ету қабілетін көрсетеді. Іле-Алатау популяциясы өсімдіктердің көптігімен және жақсы морфометриялық параметрлерімен сипатталады, бұл тіршілік ету ортасындағы қолайлы қоршаған орта жағдайларымен байланысты. Ұзынқара жотасы популяциясы кішірек даралармен сипатталады, бірақ тұрақты жас құрылымын және жоғары тіршілік ету қабілетін сақтайды. Анатомиялық зерттеу түрдің биік таулы ортаның экстремалды жағдайларына бейімделуін қамтамасыз ететін жақсы дамыған өткізгіш және механикалық тіндері бар радиалды екінші реттік сабақ құрылымын анықтады. Бұл зерттеудің ғылыми жаңалығы биік таулы *Schmalhausenia nidulans* популяцияларының салыстырмалы популяциялық-онтогенетикалық, морфометриялық және анатомиялық талдауында жатыр, бұл сирек кездесетін эндемикалық түрдің қоршаған ортаға төзімділігі мен бейімделу механизмдері туралы жаңа ақпарат берді. Алынған нәтижелерді осы өсімдікті бақылау, сақтау және қорғау шараларын әзірлеу үшін пайдалануға болады.

**Түйін сөздер:** *Schmalhausenia nidulans*, популяция, онтогенетикалық құрылым, морфологиялық ерекшеліктер, Ұзынқара, Іле Алатауы.

Г.А. Садырова<sup>1\*</sup>, М.М. Даулетбаева<sup>2\*</sup>, А.А. Шорманова<sup>3</sup>, К.К. Хамитова<sup>4</sup>  
Г.А. Садыров<sup>5</sup>, С.А. Үсербаева<sup>6</sup>, Т.М. Жапаркулов<sup>6</sup>,  
М.А. Айтжанов<sup>2</sup>, Ж.М. Ералиева<sup>7</sup>, Ж.А. Орынбаева<sup>7</sup>

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

<sup>2</sup>Казахский национальный женский педагогический университет, Алматы, Казахстан

<sup>3</sup>Институт ботаники и фитоинтродукции, Алматы, Казахстан

<sup>4</sup>Центральноазиатско-германский институт сохранения экосистем и биоразнообразия при Казахском национальном университете им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

<sup>5</sup>Казахская академия спорта и туризма, Алматы, Казахстан

<sup>6</sup>Национальный парк Иле-Алатау, Алматы, Казахстан

<sup>7</sup>Казахский национальный педагогический университет им. Абай, Алматы, Казахстан

\*e-mail: gulbanu-s@mail.ru

### Оценка экологического состояния популяции вида *Schmalhausenia nidulans* (Regel) Petr. флоры Северного Тянь-Шаня

В статье представлены результаты комплексной оценки экологического состояния популяций редкого эндемичного вида *Schmalhausenia nidulans* произрастающего в высокогорных районах Северного Тянь-Шаня. Целью исследования являлось изучение современного состояния популяций вида на основе анализа их численности, онтогенетической структуры, морфометрических показателей и анатомических особенностей. Были исследованы две природные популяции вида: первая популяция, расположенная на хребте Узынқара на высоте 3003 м над уровнем моря, и вторая популяция, произрастающая на хребте Иле-Алатау на высоте 3260 м над уровнем моря. В

ходе полевых исследований изучались численность популяций, возрастная структура и морфологические признаки особей на ювенильной, имматурной, виргинильной и генеративной стадиях развития, а также проведён анатомический анализ строения стебля. Установлено, что обе популяции характеризуются полночленным онтогенетическим спектром, что свидетельствует об их устойчивости и способности к естественному самоподдержанию. Популяция Иле-Алатау отличается более высокой численностью и лучшими морфометрическими показателями растений, что связано с более благоприятными экологическими условиями местообитания. Популяция хребта Узынкара характеризуется меньшими размерами особей, однако сохраняет стабильную возрастную структуру и высокую жизнеспособность. Анатомическое исследование выявило радиальное вторичное строение стебля с хорошо развитыми проводящими и механическими тканями, обеспечивающими адаптацию вида к экстремальным условиям высокогорной среды. Научная новизна работы заключается в проведении сравнительного популяционно-онтогенетического, морфометрического и анатомического анализа высокогорных популяций *Schmalhausenia nidulans*, что позволило получить новые сведения об экологической устойчивости и адаптационных механизмах редкого эндемичного вида. Полученные результаты могут быть использованы для разработки мероприятий по мониторингу, сохранению и охране данного растения.

**Ключевые слова:** *Schmalhausenia nidulans*, популяция, онтогенетическая структура, морфологические признаки, Узынкара, Иле Алатау.

## Introduction

Conservation of biological diversity in mountain ecosystems is one of the priority tasks of modern ecology and botany. Mountain regions are characterized by a high degree of endemism and vulnerability of natural complexes to both natural and anthropogenic impacts. In this context, the study of rare and relict plant species, whose population status serves as an indicator of ecological stability in natural mountain ecosystems, gains particular significance. Many rare and endangered endemics adapted to extreme conditions—low temperatures, strong winds, a short growing season, and poor soils—are concentrated in mountain natural ecosystems. Endemic species play a key role in maintaining ecological balance, contributing to soil stabilization, water runoff regulation, and preservation of genetic diversity. However, anthropogenic factors such as recreational pressure, livestock grazing, and climate change threaten their existence (D’Antraccoli et al., 2023; Edwards & Wyse, 2019; Iasnović et al., 2024; Salles et al., 2023; Slezák & Douda, 2022; Maunder et al., 2022; Slezák et al., 2022; Peruzzi et al., 2021; Adamo et al., 2021; Peruzzi et al., 2022; Gestri et al., 2023; Tiburtini et al., 2022). For several decades, the biodiversity of the mountain ecosystem of the Northern Tien Shan, including the Uzynkara and Ile-Alatau ranges, has been under intense pressure from human economic activity (Lemenkova, 2014). The Northern Tien Shan is a unique mountain region in Central Asia, characterized by high levels of biodiversity and a significant number of endemic plant and animal species. Rare endemic species, such as *S. nidulans* a representative of a monotypic genus in the *Asteraceae* family, deserve special atten-

tion in the context of the biodiversity of the Northern Tien Shan. The populations of this species are characterized by the dominance of mature vegetative and generative individuals, indicating stability but also vulnerability to external impacts. Studying such species allows for a deeper understanding of the processes by which plants adapt to high-altitude conditions and the evolutionary aspects of the Tien Shan. *S. nidulans* is a rare endemic representative of the flora of the Northern Tien Shan, confined to specific ecological-coenotic conditions of mountain slopes and rocky habitats of the Ile Alatau. The species is distinguished by a narrow ecological amplitude, a limited distribution range, and sensitivity to changes in environmental conditions flora (Syedina et al., 2024).

Despite the scientific and conservation value of *S. nidulans* information on the current status of its populations in the Ile Alatau remains fragmentary. The abundance, age structure, ecological condition, and resilience of the populations in the context of increasing anthropogenic impacts, including recreational pressure, changes in soil cover, and climatic fluctuations, have not been sufficiently studied. The relevance of studying rare and endangered endemic species of the Northern Tien Shan, including *S. nidulans* is determined by several key factors. First, the region faces intense anthropogenic pressure: recreational tourism in the Ile-Alatau National Park, agricultural activities, and urbanization lead to the degradation of natural habitats. *S. nidulans* as a rare species of category II, is included in the Red Book of the Republic of Kazakhstan and is at risk from livestock overgrazing, soil erosion, and population fragmentation. Second, climate change—such as warming and shifts in snow cover boundaries—

threatens the high-altitude ecosystems where this species resides, potentially leading to a reduction in its range (Baitenov, 1981). In a global context, conserving such species contributes to meeting international commitments under the Convention on Biological Diversity (1992), highlighting the role of the Northern Tien Shan as a center of endemism in Central Asia. The conducted research expands the understanding of the ecological and biological features of the rare endemic species *S. nidulans* which grows in the high-altitude ecosystems of the Northern Tien Shan. New data have been obtained on the current ecological status, population size, ontogenetic structure, and morphological characteristics of its populations within the Uzynkara Ridge and the Ile Alatau, complementing theoretical principles of population ecology and serving as a basis for further monitoring studies.

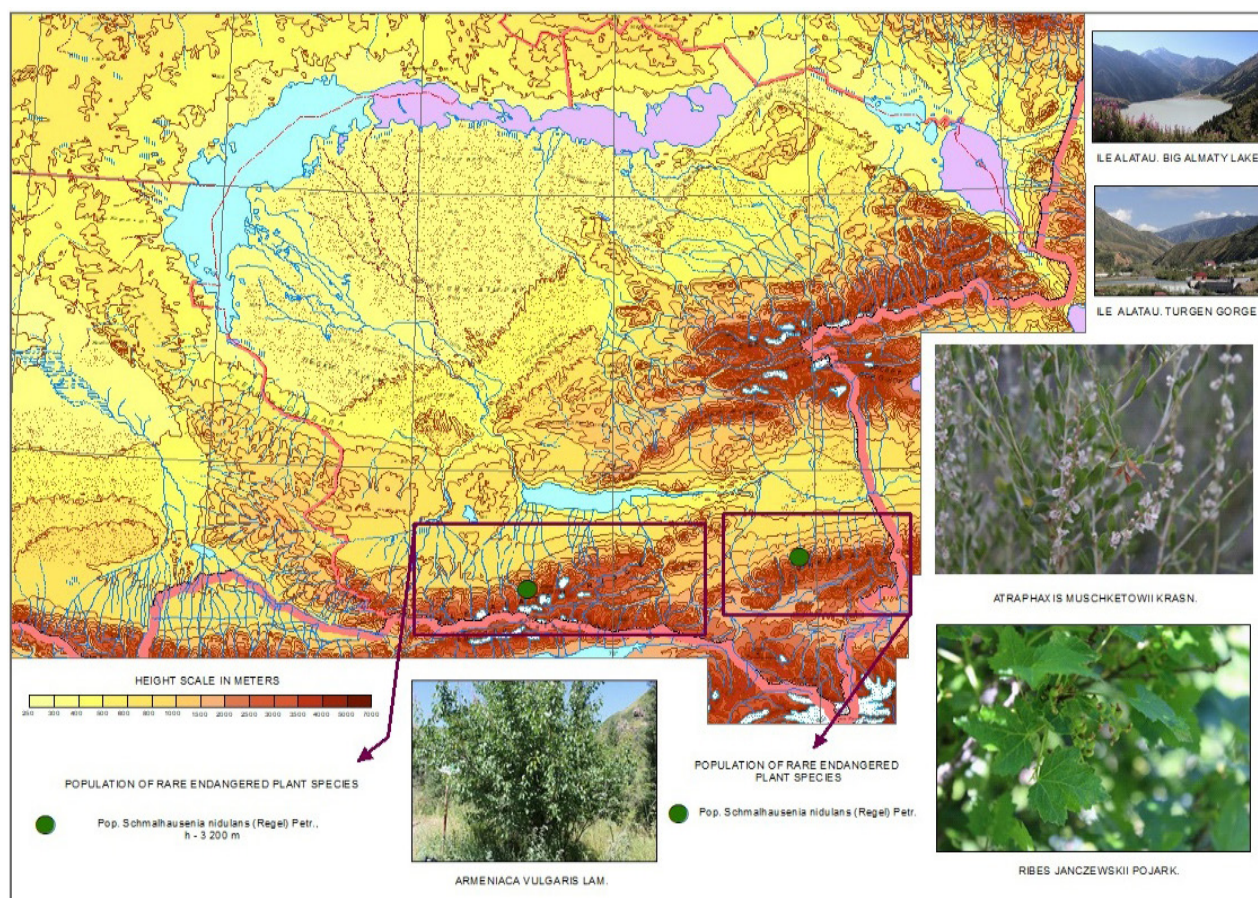
The aim of this study was to investigate the current population status of the rare species *Schmalhausenia nidulans*.

### Materials and methods

The subject of this study was the natural populations of the rare species *Schmalhausenia nidulans* which belongs to the family *Asteraceae* and the genus *Schmalhausenia*. The subject of this study were natural populations of the rare species *Schmalhausenia nidulans*, a member of the *Asteraceae* family and the genus *Schmalhausenia*. Between 2024 and 2025, we studied *Schmalhausenia nidulans* populations in the Ile Alatau Mountains in the Bolshoye Almatinskoye Gorge at an altitude of 3,260 m and in the Uzynkara Kalzhat Gorge at an altitude of 3,003 m (Figure 1).

**Figure 1**

Map of the study areas in the Northern Tien Shan population of *Schmalhausenia nidulans* in the Ile Alatau and Uzynkara ranges



Plant communities featuring *Schmalhausenia nidulans* were described during the summer in two populations located in different geographic locations in the Northern Tien Shan ranges. The first population was described in the Uzynkara mountains; the second, in the Ile Alatau mountains. Population area and coordinates were determined using a Garmin navigator. Geobotanical descriptions of the populations were conducted using route-reconnaissance and semi-permanent methods. Vegetation was described using the generally accepted methodology (Lavrenko & Korchagina, 1964). Collection and processing of herbarium material was carried out using the generally accepted methodology summarized by A.K. Skvortsov (1977). Plant life forms were classified according to the life form systems proposed by K. Raunkier (1934) and I.G. Serebryakov (1962). Species abundance in phytocenoses was estimated using the Drude (1913) abundance scale. The age structure was determined based on the diagnosis of age states of the studied species. The age spectrum was formed based on qualitative and quantitative characteristics of individuals. Comparative analysis of the morphological traits of individuals from different age groups of *Schmalhausenia nidulans* was carried out following generally accepted methodological approaches. Fieldwork was conducted in accordance with methodologies developed by A.A. Uranov (1960), O.V. Smirnova (Smirnova &

Zaugolnova, 1976) and T.A. Rabotnov (1970). Morphological and anatomical studies were conducted on plant material fixed in a mixture of alcohol, glycerol, and water (1:1:1). Anatomical preparations and microtome sections of roots, stems, and leaves were examined using light microscopy, quantitative parameters were determined morphometrically using an ocular micrometer, and the results were documented by means of photomicrography. The preparation and description of anatomical preparations were carried out using standard methods of plant anatomy (Permyakov, 1988; Prozina, 1960; Barykina et al., 2014).

### Results and discussion

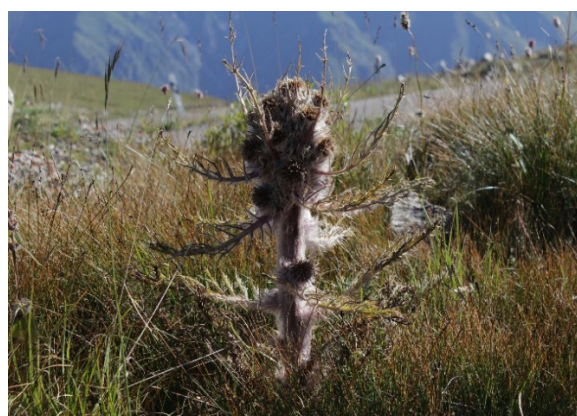
*Schmalhausenia nidulans* (Regel) Petr. is a very rare endemic species of the monotypic genus (Karmysheva, 1966). This perennial plant reaches 70 cm in height, with an upright, dark-haired stem. The stem is solitary, simple, cobwebby-woolly, with blackish-brown remnants of dead leaves at the base, abundantly foliated. The leaves are oblong-lanceolate, densely gray-woolly on both sides. The inflorescences are large, 4–5 cm in width, densely pubescent. It grows in ancient glacial valleys on gravel-shallow-soil alpine meadows of the Ile-Alatau and Uzynkara ranges (Flora of Kazakhstan, 1966) (Figure 2).

**Figure 2**

Natural habitats *Schmalhausenia nidulans* (Regel) Petr.



A



B

Natural habitats: A) *Schmalhausenia nidulans* Uzynkara ridge; B) *Schmalhausenia nidulans*, Ile Alatau ridge

On the Ile Alatau ridge, *Schmalhausenia nidulans* is found at an elevation of 3,260 m a.s.l., coordinates: N 43°02'430"; E 076°56'570". The

slope faces southwest. On the Uzynkara ridge, *Schmalhausenia nidulans* occurs at an elevation of 3,003 m a.s.l., coordinates: N 43°05'033"; E

076°59'114". The species is listed in the Red Book of the Kazakh SSR (2014) and the Republic of Kazakhstan (1981). In the spatial structure of the cenopopulations of *S. nidulans* individuals are arranged as sparse solitary specimens. The dominant age spectrum for the cenopopulations of *S. nidulans* consists of middle-aged generative plants, and a significant number of virginile individuals, reflecting the most stable state of the endemic. *S. nidulans* is a rare high-altitude endemic of the Northern Tien Shan, associated with the alpine and subalpine zones of the Ile Alatau. The species is characterized by a compact habit, short shoots, and a well-developed rosette form, which is a typical adaptation to harsh high-altitude conditions. The plant is perennial and herbaceous, with a shortened stem. Leaves are predominantly gathered in a basal rosette, entire, oblong-lanceolate, with a dense leaf

blade. The surface of the leaves is often covered with protective structures (thick cuticle, possible pubescence) that reduce moisture evaporation and protect tissues from ultraviolet radiation and sharp temperature fluctuations. The generative shoots are low-growing, which reduces wind stress and the risk of mechanical damage. The ontogenetic development of the species is accompanied by a gradual increase in leaf blade size and plant height, while maintaining the overall compactness of the habit characteristic of alpine endemics.

*Morphological characteristics of populations of Schmalhausenia nidulans.*

The analysis of the age structure of *Schmalhausenia nidulans* covers all ontogenetic stages, allowing for the assessment of interpopulation variability in morphometric traits (Table 1).

**Table 1**

*Morphometric parameters of Schmalhausenia nidulans in two populations across ontogenetic stages*

Name	Age groups	Juvenile (j)	Immature (i)	Virginal (v)	Generative (g)
Population 1	Leaf length, cm	6.80 ± 2.10	10.33 ± 1.53	16.40 ± 1.60	26.60 ± 3.30
	Plant height, cm	9.20 ± 1.10	19.50 ± 4.80	23.10 ± 5.90	35.72 ± 2.96
Population 2	Leaf length, cm	6.80 ± 2.10	12.67 ± 2.08	17.50 ± 1.10	30.00 ± 3.61
	Plant height, cm	15.73 ± 1.83	22.33 ± 2.53	25.33 ± 2.52	45.67 ± 5.04

The juvenile group includes 35 individuals. The average leaf length is 6.80 ± 2.10 cm, and the average plant height is 9.20 ± 1.10 cm. These values indicate the initial stages of the formation of aboveground plant organs and indicate the average variability of the characteristics characteristic of the early stages of ontogenesis. The relatively small size of juvenile individuals is due to their adaptation to harsh high-altitude conditions and limited environmental resources. The immature group includes 31 individuals. The average leaf length and plant height increase compared to the juvenile period, reaching 10.33 ± 1.53 cm and 19.50 ± 4.80 cm, respectively. Significant growth of vegetative organs and an increase in morphological variability indicate that plants are entering an active period of development and biomass accumulation. Virgin individuals are represented by 54 specimens. The values of leaf length and plant height continue to grow, reaching 16.40 ± 1.60 cm and 23.10 ± 5.90 cm, respectively. This group is characterized by the most intensive vegetative development and the formation of mor-

phological characters necessary for the transition to the subsequent generative stage. The increase in the number of virgin plants indicates favorable conditions for the accumulation of the pregenerative potential of the population. The generative group is the largest, consisting of 89 individuals. The average leaf length and plant height are 26.60 ± 3.30 cm and 35.72 ± 2.96 cm, respectively. A significant increase in plant size at this stage indicates a high level of development of generative organs and the ability of the population to effectively reproduce. The relatively low dispersion of the values indicates the formation and stability of the generative part of the population.

Thus, the first population of *S. nidulans* growing in the Kalzhat gorge on the Uzunkara ridge is characterized by a gradual and systematic increase in leaf length and plant height from the juvenile stage of ontogenesis to the generative stage. The presence of all age groups and the predominance of generative individuals indicate a satisfactory ecological condition of the population and its adaptation to the conditions of high-mountain ecosystems. The morpho-

logical structure of the first population indicates the adaptation of *S. nidulans* to the extreme conditions of the high-mountain zone (approximately 3003 m above sea level), where low temperatures, strong winds, high insolation and soil moisture deficiency prevail. The gradual increase in leaf length and plant height with age indicates normal ontogenetic progress in relatively stable microclimatic conditions. The density of generative individuals suggests a strategy to reduce heat loss and mechanical damage.

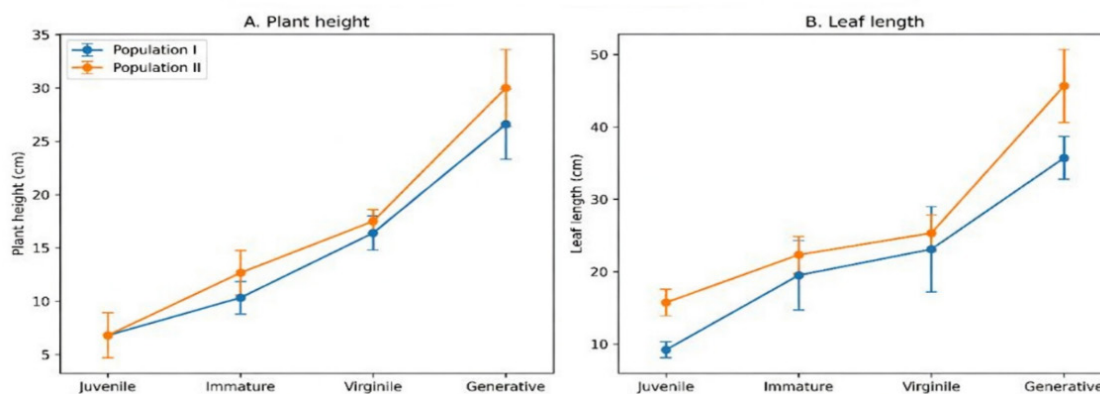
The second population of *S. nidulans* is associated with the high-mountainous conditions of the Great Almaty Gorge and grows at an altitude of 3260 m above sea level. This population is characterized by a large number of individuals and a clearly defined age structure, which indicates favorable conditions for the growth and high survival of the species in this habitat. The juvenile group includes 45 individuals. The average leaf length is  $6.80 \pm 2.10$  cm, and the average plant height is  $15.73 \pm 1.83$  cm. Despite the similarity of the leaf length of the young individuals in the first population, the plant height is significantly greater, which indicates the intensive development of aboveground organs in the early ontogenetic stages. This may be due to the good moisture content of the Great Almaty Gorge and local microenvironmental conditions. The immature group includes 42 individuals. The leaf length and plant height increase compared to the young period, reaching  $12.67 \pm 2.08$  cm and  $22.33 \pm 2.53$  cm, respectively. These values indicate active vegetative growth and the formation of stable morphological characters characteristic of later stages of development. The increase in the number of immature plants indicates the stability of the population renewal processes. Virgin individuals are represented

by 74 specimens. The average leaf length and plant height are  $17.50 \pm 1.10$  cm and  $25.33 \pm 2.52$  cm, respectively. This group is characterized by intensive growth and biomass accumulation necessary for the transition to the generative phase. A significant number of virgin plants indicates a high potential for further reproduction of the population. The generative group consists of the largest, 289 individuals. The average leaf length and plant height reach  $30.00 \pm 3.61$  cm and  $45.67 \pm 5.04$  cm, respectively. A significant increase in the size of generative plants compared to previous ontogenetic periods indicates favorable conditions for the formation of generative organs and a high reproductive capacity of the population. The relatively high variability of these signs indicates the diversity of individual development within the population.

In general, the second population of *S. nidulans* is characterized by a large number of individuals in many ontogenetic groups, a clearly defined age structure, and large values of leaf length and plant height. The presence of a dominant generative fraction and well-developed pregenerative stages indicates a favorable ecological situation of the population and its high adaptation to the conditions of the high-mountain ecosystems of the Ile Alatau.

Morphological differences between *S. nidulans* populations reflect the influence of microrelief, soil conditions, and slopes. The greater leaf length observed in individuals of the second population may be related to the characteristics of the local habitat, while the greater plant height reflects the intensity of vegetative growth. In addition, the low variability of morphometric characters in the first population indicates homogeneous and stable environmental conditions (Figure 3).

**Figure 3**  
Age structure of *Schmalhausenia nidulans* populations



In general, the second population of *S. nidulans* is characterized by a large number of individuals in all ontogenetic states, an increase in leaf length and plant height, and a particularly pronounced development of generative plants. This is probably due to the special ecological and climatic conditions of the Great Almaty Gorge at an altitude of 3260 m above sea level, which contribute to the successful growth, development and reproduction of this species. The first population, despite its low morphometric indicators, retains the full range of ontogenetic groups, which indicates its endurance and long-term stability. Thus, the morphological structure of both populations of *Schmalhausenia nidulans* demonstrates clear ontogenetic differentiation and high ecological plasticity in the extreme conditions of the high mountains of the Northern Tien Shan. Compact habits, medium leaf size and limited vertical growth are the main adaptations that ensure the survival of the species. The identified interpopulation differences highlight the importance of maintaining a diversity of microhabitats for the conservation of the hardiness of this rare endemic species.

Comparative analysis of morphometric characters of two populations of *Schmalhausenia nidulans* revealed both ontogenetic regularities and interpopulation differences. In all age groups of both populations, a significant trend of increasing leaf length and plant height from juvenile to generative individuals is observed, which indicates normal ontogenetic progress. The average values of leaf length in the second population at all ontogenetic states, except for immature individuals, exceed the corresponding values in the first population. This indicates favor-

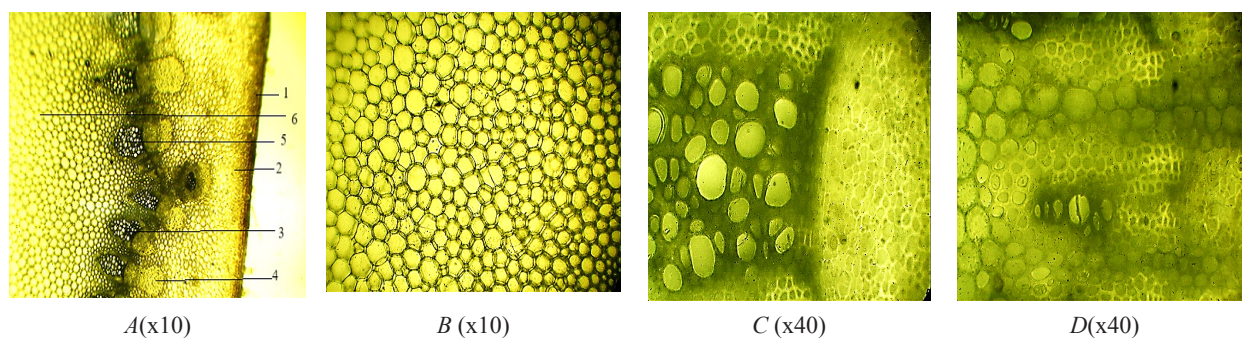
able conditions for the development of the assimilation apparatus in the habitat of the second population. Plant height in the second population is higher than in the first in several age groups (juvenile and generative individuals). This may be due to the characteristics of the microrelief, the depth of snow cover in the winter period, or good soil moisture, which favors vertical growth. Virgin and generative individuals in the first population are characterized by low variability (smaller standard deviation values) in leaf length and plant height, which indicates more stable environmental conditions. In the second population, the increased variability of these morphological characters indicates habitat heterogeneity and the pronounced influence of local environmental factors.

#### *Anatomical structure of the stem of Schmalhausenia nidulans*

The anatomical structure of the stem shows that it has a secondary structure typical of the *Asteraceae* family. The outer covering of the stem is covered by the epidermis. The epidermis consists of a collection of oval or round cells filled with loose parenchyma, with a cell thickness of  $7.31 \pm 0.51 \mu\text{m}$ . The cortex is oval, rectangular, or orbital, with well-developed parenchyma cells filled with distinctly loose parenchyma, forming unicellular or multicellular trichomes. The parenchyma cells of the primary covering are thickened, with a thickness of  $5.29 \pm 1.13 \mu\text{m}$ . The central cylinder has an increased volume and contains a number of small vascular bundles. Each vascular bundle is filled with upper sclerenchyma. The number of vascular bundles is 8-9, and they are elliptical (Figure 4).

**Figure 4**

*Anatomical structure of the stem of Schmalhausenia nidulans (Regel) Petr.*



A) 1-epidermis, 2-loose parenchyma, 3-vascular bundle, 4-sclerenchyma, 5-xylem, 6-vascular parenchyma; B) sclerenchyma; C, D) xylem tubes

Anatomical analysis of the stem of *Schmalhausenia nidulans* revealed a secondary structure typical of Asteraceae and indicative of adaptation to the high-altitude conditions of the Northern Tien Shan. Importantly, the anatomical features also show interpopulation differences consistent with ecological variations between habitats. The stem epidermis consists of densely packed oval or round cells with moderately thickened walls ( $7.31 \pm 0.51 \mu\text{m}$ ), which provide protection against mechanical stress, low temperatures, and intense solar radiation. Beneath it lies a well-developed cortex of parenchymatous cells with unicellular and multicellular trichomes that reduce transpiration and increase resistance to wind and UV radiation. These xeromorphic features were more pronounced in the first population, which grew under stressful but relatively stable alpine conditions. The central cylinder contains 8-9 collateral root bundles with well-developed xylem and phloem. The cambial zone of thin-walled cells supports secondary growth, which was more active in the second population and corresponds to plant height and biomass accumulation. Sclerenchyma fibers in the phloem, especially in the first population, are strongly thickened, indicating increased mechanical reinforcement during severe environmental stress.

In general, anatomical differences between populations reflect ecological differentiation of habitats. The first population is characterized by strong defensive and xeromorphic features, which correspond to stressful conditions and low resource availability. The second population shows a tendency to active growth and high transpiration efficiency, which corresponds to favorable moisture conditions and high morphometric values. Ecological and phytocenotic analysis confirms that both populations are found in high-altitude environments, but differ in terms of habitat quality. The first population develops in more stable but resource-limited conditions, while the second experiences relatively good moisture availability and microhabitat heterogeneity, which leads to increased growth intensity and increased morphological variability. Morphological data confirm these patterns: the first population shows large leaf size and low variability, while the second population shows large plant height and high variability, indicating strong ecological plasticity.

In conclusion, *S. nidulans* exhibits a combination of xeromorphic and mechanical defense anatomical features (thickened epidermis, developed cortex, trichomes, sclerenchymatization, and radial stem structure) that enable survival under alpine stress conditions. Variation in these traits among

populations reflects ecological differentiation and is directly related to differences in population status and habitat quality.

Anatomical analysis of the stem of *Schmalhausenia nidulans* revealed the presence of secondary structures typical of members of the Asteraceae family. The stem has well-developed membranous, mechanical and vascular tissues, a pronounced ray structure and collateral vascular bundles with sclerenchyma elements and cambium. The epidermis is formed by densely packed cells with moderately thickened walls, while the cortical parenchyma consists of unicellular and multicellular trichomes. The presence of trichomes, developed sclerenchyma, thickened cell walls and secondary stem thickening increases the resistance of plants to low temperatures, intense solar radiation, strong winds and periodic moisture deficits characteristic of the high-mountainous habitats of the Northern Tien Shan. The anatomical data obtained correspond to the environmental conditions of the studied populations. Both populations of *Schmalhausenia nidulans* are located on high mountain rocky slopes and are exposed to extreme abiotic factors. The identified structural features can be considered as adaptive features that ensure the successful survival of the species in these conditions. The populations of the Ile Alatau and Uzunkara ranges differ in size and ontogenetic structure, but in both cases reproductive individuals predominate, which indicates the preservation of self-sustaining processes. However, the relatively low proportion of pre-regenerative individuals indicates that the natural reproduction of the species is limited. The results obtained confirm the need for further monitoring of the population status and the preservation of their natural habitat.

## Conclusion

Thus, the anatomical and morphological features of the vegetative organs of *Schmalhausenia nidulans* (Regel) Petr. indicate a pronounced ecological specialization of the species and its adaptation to the extreme conditions of the high-alpine ecosystems of the Northern Tien Shan. The complex of xeromorphic features, including developed protective structures and features of the sheath and root tissues, indicates a high degree of adaptation to low temperatures, intense insolation, wind loads and moisture deficiency. These features simultaneously limit the ecological range of the species and reduce its ability to quickly recover, which leads to its rarity, fragmented range and small population size. *S. nidu-*

*lans* populations are characterized by limited natural regeneration and high dependence on the stability of high-altitude habitats. Given the high degree of ecological specialization and vulnerability, the species should be considered a rare endemic, which requires the preservation of natural habitats, limitation of anthropogenic pressure and constant monitoring of the population status.

### Author Contributions

*Sadyrova G.A.*: Conceptualization, Data curation, Formal Analysis, Funding acquisition, Investigation, Methodology, Project administration, Re-

sources, Writing – review & editing; *Khamitova K., Shormanova A.A.*: Formal Analysis, Supervision, Validation, Funding acquisition, Writing – review & editing; *Userbaeva S.A.*: Data curation, Resources, Visualization, Funding acquisition, Writing, Writing – review & editing; *Dauletbaeva M.M.*: Software, Visualization, Funding acquisition, Supervision; *Orynbayeva Zh.A., Sadyrov G.*: Software, Writing, Funding acquisition, Methodology; *Yeraliyeva Zh.M., Zhaparkulov T.M.*: Data curation, Investigation, Formal Analysis, Methodology, Project administration, Resources, Supervision, Validation, Writing – review & editing.

### References

- Adamo, M., Chialva, M., et al. (2021). Plant scientists' research attention is skewed towards colourful, conspicuous and broadly distributed flowers. *Nature Plants*, 7, 574–578. <https://doi.org/10.1038/s41477-021-00912-2>
- Astuti, G., Ciccarelli, D., et al. (2019). Narrow endemic species *Bellevalia webbiana* shows significant intraspecific variation in tertiary CSR strategy. *Plant Biosystems*, 153, 12–18. <https://doi.org/10.1080/11263504.2018.435576>
- Barykina, R., Veselova, T., & Devyatov, A. (2014). *Spravochnik po botanicheskoy mikrotekhnike: Osnovy i metody*. [Handbook of Botanical Microengineering (Fundamentals and Methods)] (pp. 21–79). Moscow State University Press. (In Russian)
- Cherepanov, S. K. (1995). *Sosudistye rasteniya Rossii i sopredelnykh gosudarstv v predelakh byvshego SSSR* [Vascular plants of Russia and neighboring states, within the former USSR] St. Petersburg. [in Russian].
- D'Antraccoli, M., Carta, A., et al. (2023). Comprehensive approach to improving endemic plant species research, conservation, and popularization. *Journal of Zoological and Botanical Gardens*, 4 (2), 490–506. <https://doi.org/10.3390/jzbg4020036>
- Drude, O. (1913). *Die Ökologie der Pflanzen*. Braunschweig.
- Edwards, C., & Wyse, J. (2019). The development of plant conservation in botanic gardens and the current and future role of conservation genetics for enhancing those conservation efforts. *Molecular Frontiers Journal*, 3(3), 44–65. <https://doi.org/10.1142/S2529732519400078>
- Flora Kazakhstana*. (1956–1966). (Vol. 1–9). Alma-Ata. (In Russian)
- Gestri, G., Alessandrini, A., et al. (2023). Identifying bottlenecks in the life cycle of plants living on cliffs and rocky slopes: Lack of knowledge hinders conservation actions. *Biological Conservation*, 286, 110289. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.110289>
- Illyustrirovannyyi opredelitel' rastenii Kazakhstana*. (1962–1975). (Vol. 1–2). Alma-Ata. (In Russian)
- Krasnaya kniga Kazakhstana*. (1981). Vol. II: Plants [The Red Data Book of Kazakhstan. vol. II: Plants]. (Vol. 2, pp. 98–99). Nauka. (In Russian)
- Krasnaya kniga Kazakhstana*. (2014). Vol. II: Plants [The Red Data Book of Kazakhstan. vol. II: Plants]. (Vol. 2, pp. 645–647). ArtPrint XXI. (In Russian)
- Maunder, M., Hawkins, J., et al. (2022). Assessing extinction risk across the geographic ranges of plant species in Europe. *Plants People Planet*, 4, 303–311. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10251>
- Opredelitel' rastenii Srednei Azii*. (1968–1993). (Vols. 1–10). Tashkent. (In Russian)
- Peruzzi, L., Astuti, G., et al. (2021). Genetic differentiation among populations of the threatened *Bellevalia webbiana* and its consequence on conservation. *Plant Biosystems*, 155, 188–193. <https://doi.org/10.1080/11263504.2020.1857866>
- Peruzzi, L., Dolci, D., et al. (2022). Potential climatic and elevational range shifts in the Italian narrow endemic *Bellevalia webbiana* under climate change scenarios. *Nature Conservation*, 50, 145–157. <https://doi.org/10.3897/natureconservation.50.91265>
- Permyakov, A. I. (1988). *Mikrotekhnika* [Microengineering]. Moscow State University Press. (In Russian)
- Prozina, M. N. (1960). *Botanicheskaya mikrotekhnika* [Botanical Microengineering]. Moscow State University. (In Russian)
- Raunkiaer, C. (1934). *The life forms of plants and statistical plant geography*. Clarendon Press.
- Rabotnov, T. A. (1970). The importance of consortium relationships in determining plant relationships in phytocenoses. *Bulletin of the Moscow Society for Natural History. Biological Section*, 75 (2). Publishing house of Moscow University. (In Russian)
- Salles, D., Carmo, F., et al. (2023). Global hotspots of plant phylogenetic diversity. *New Phytologist*, 240, 1636–1646. <https://doi.org/10.1111/nph.19151>
- Serebryakov, I. G. (1962). *Ekologicheskaya morfologiya rasteniy* [Ecological morphology of plants]. Moscow: Nauka. (In Russian)
- Slezák, M., & Douda, J. (2022). Topographic indices predict the diversity of Red List and non-native plant species in human-alartered riparian ecosystems. *Ecological Indicators*, 139, 108949. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108949>
- Smirnova, O. V., & Zaugolnova, L. V. (1976) *Kriterii vydeleniya vozrastnykh obshchinykh i osobennosti khoda ontogeneza u rasteniy raznykh biomorf // Tsenopopulyatsii rasteniy (osnovnyye ponyatiya i struktura)* [Criteria for identifying age states and

features of the course of ontogenesis in plants of different biormorphs // Cenopopulations of plants (basic concepts and structure)]. (pp. 14–43). Moscow: Nauka. [in Russian]

Tiburtoni, M., Astuti, G., et al. (2022). Integrative taxonomy of *Armeria arenaria* (Plumbaginaceae). *Biology*, 11 (7), 1060. <https://doi.org/10.3390/biology11071060>

Uranov, A. A. (1960). Zhiznennoye sostoyaniye vida v rastitel'nom soobshchestve [The vital state of a species in a plant community]. *Bulletin of the Moscow Society for Natural History. Biological Section*, 65 (3), pp. 77–92. Moscow State University Press. (In Russian)

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

Sadyrova Gulbanu Aueskhanovna – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor of the Faculty of Geography and Environmental Management of the Kazakh National University named after Al-Farabi (Almaty, Kazakhstan, e-mail: gulbanu-s@mail.ru).

Dauletbayeva Marzhankul Myrzakhmetovna – PhD, Senior Lecturer of the Department of Biology of the Kazakh National Women's Pedagogical University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: marjandmm19@gmail.com).

Shormanova Aizhamal Abdaimayovna – PhD, Senior Researcher of the Laboratory of Higher Plant Flora of the Institute of Botany and Phytointroduction (Almaty, Kazakhstan, e-mail: aijamal\_shormanova60@mail.ru).

Khamitova Korlan Kadyrbekovna – PhD, Senior Lecturer, Faculty of Geography and Environmental Management, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: khamitovakorlan@gmail.com).

Sadyrov Gani – PhD, Associate Professor of the Faculty of Tourism and Sports Management of the Kazakh Academy of Sports and Tourism (Almaty, Kazakhstan, e-mail: gani.sadyr@gmail.com).

Zhaparkulov Tugankul Moyinbayuly – Researcher of the Ile-Alatau National Park (Almaty, Kazakhstan, e-mail: Tungyszaparkulov6@gmail.com).

Userbayeva Saltanat Amantaevna – Head of the Department of Research and Mountain Agrobiodiversity of the Ile-Alatau National Park (Almaty, Kazakhstan, e-mail: alihan0706@mail.ru).

Aitzhanova Mira Onlanbekovna – Senior Lecturer, Department of Biology, Kazakh National Women's Pedagogical University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: aytzhanova.m@qyzpu.edu.kz).

Orynbayeva Zhadyra Auesovna – Doctor of Pedagogical Sciences, Senior Lecturer, Department of Biology, Abai Kazakh National Pedagogical University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: jadi\_astana@mail.ru).

Yeralieva Zhanar Muratovna – Doctor of Pedagogical Sciences, Senior Lecturer, Department of Biology, Abai Kazan Pedagogical University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: zhanara10-80@mail.ru).

#### **Авторлар туралы мәлімет:**

Садырова Гүлбану Әуесханқызы – биология ғылымдарының докторы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің география және қоршаған ортаны басқару факультетінің доценті (Алматы, Қазақстан, e-mail: gulbanu-s@mail.ru).

Дәулетбаева Маржанкүл Мырзахметқызы – PhD докторы, Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университетінің биология кафедрасының аға оқытушысы (Алматы, Қазақстан, e-mail: marjandmm19@gmail.com).

Шорманова Айжамал Әбдірайымқызы – PhD докторы, Ботаника және фитointroduкция институтының жоғары өсімдіктер флорасы зертханасының аға ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: aijamal\_shormanova60@mail.ru).

Садыров Гани – PhD докторы, Қазақ спорт және туризм академиясы, Туризм және спорт менеджменті факультетінің доценті (Алматы, Қазақстан, e-mail: gani.sadyr@gmail.com).

Хамитова Корлан Кадырбековна – PhD докторы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің география және қоршаған ортаны басқару факультетінің аға оқытушысы (Алматы, Қазақстан, e-mail: khamitovakorlan@gmail.com).

Жапарқұлов Туганкүл Мойынбайұлы – Іле-Алатау ұлттық паркінің ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: Tungyszaparkulov6@gmail.com).

Усербаева Салтанат Амантаевна – Іле-Алатау ұлттық паркінің ғылыми-зерттеу және тау агробеоалуантүрлілігі бөлімінің бастығы (Алматы, Қазақстан, e-mail: alihan0706@mail.ru).

Айтжанова Мира Онланбекқызы – Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университетінің биология кафедрасының аға оқытушысы (Алматы, Қазақстан, e-mail: aytzhanova.m@qyzpu.edu.kz).

Орынбаева Жадыра Әуесқызы – п.ғ.д., Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университетінің биология кафедрасының аға оқытушысы (Алматы, Қазақстан, e-mail: jadi\_astana@mail.ru).

Ералиева Жанар Мұратқызы – п.ғ.д., Абай атындағы Қазан педагогикалық университетінің биология кафедрасының аға оқытушысы (Алматы, Қазақстан, e-mail: zhanara10-80@mail.ru).

#### **Сведения об авторах:**

Садырова Гүлбану Ауесхановна – доктор биологических наук, доцент факультета географии и охраны окружающей среды Казахского национального университета имени Аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: gulbanu-s@mail.ru).

Дәулетбаева Маржанкүл Мырзахметовна – кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры биологии Казахского национального женского педагогического университета (Алматы, Казахстан, e-mail: marjandmm19@gmail.com).

*Шорманова Айжамал Абдраймаевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Лаборатории высшей растительной флоры Института ботаники и фитointродукции (Алматы, Казахстан, e-mail: aijamal\_shormanova60@mail.ru).*

*Садыров Гани – кандидат наук, доцент факультета туризма и спортивного менеджмента Казахской академии спорта и туризма (Алматы, Казахстан, e-mail: gani.sadyr@gmail.com).*

*Хамитова Корлан Кадырбековна – кандидат наук, старший преподаватель факультета географии и управления окружающей средой Казахского национального университета им. Аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: khamitovakorlan@gmail.com).*

*Жапаркулов Туганкуль Мойинбаюлы – научный сотрудник Национального парка Иль-Алатау (Алматы, Казахстан, e-mail: Tungyszaparkulov6@gmail.com).*

*Усербаева Салтанат Амантаевна – руководитель отдела исследований и горного агробиоразнообразия Национального парка Иле-Алатау (Алматы, Казахстан, e-mail: alihan0706@mail.ru).*

*Айтжанова Мира Онланбековна – старший преподаватель кафедры биологии Казахского национального педагогического университета (Алматы, Казахстан, e-mail: aytzhanova.m@qyzri.edu.kz)*

*Орынбаева Жадыра Ауэсовна – доктор педагогических наук, старший преподаватель кафедры биологии Казахского национального педагогического университета имени Абая (Алматы, Казахстан, e-mail: jadi\_astana@mail.ru).*

*Ералиева Жанар Муратовна – доктор педагогических наук, старший преподаватель кафедры биологии Казанского педагогического университета имени Абая (Алматы, Казахстан, e-mail: zhanara10-80@mail.ru).*

*Received January 29, 2026*

*Accepted June 15, 2026*

IRSTI 34.29.05; 34.31.27

<https://doi.org/10.26577/bb107220263>

Zh.E. Aimenova<sup>1\*</sup>, F.A. Ubaev<sup>1,2</sup>, Sh.E. Duissebayev<sup>1</sup>,  
G.E. Islamova<sup>1</sup>, A.M. Esimova<sup>1</sup>, S.D. Dzhumanov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>M. Auezov South Kazakhstan Research University, Shymkent, Kazakhstan

<sup>2</sup>K.A. Yassawi International Kazakh-Turkish University, Turkistan, Kazakhstan

<sup>3</sup>Aksu-Zhabagly State Nature Reserve, Zhabagly, Kazakhstan

\*e-mail: [aimenova.zhanara@gmail.com](mailto:aimenova.zhanara@gmail.com)

## SEED MASS AND HYDRATION CHARACTERISTICS OF *MEDIASIA MACROPHYLLA* (REGEL ET SCHMALH.) PIMENOV

Seed biology plays a crucial role in understanding plant reproduction, adaptation, and persistence in natural ecosystems. Studies of rare and endemic species are particularly important because information on their reproductive characteristics remains limited. The present study provides the first assessment of seed mass and hydration properties of the rare endemic species *Mediasia macrophylla* (Apiaceae). The aim of the study was to analyze seed mass, investigate imbibition dynamics, and visually assess changes in seed appearance during hydration. The research was focused on obtaining quantitative data on seed mass and water uptake characteristics as important components of the species' reproductive biology. The methodology included macromorphological analysis using light microscopy, gravimetric determination of seed mass using batches of 100 seeds, and a gravimetric water uptake test with mass measurements recorded after 1, 3, 6, and 24 hours of soaking. The results demonstrated that *M. macrophylla* seeds are characterized by low mass and low variability among replicates, indicating the stability of seed material within the studied population. The imbibition experiment revealed an intensive initial phase of water uptake followed by a gradual decrease in hydration rate and the attainment of a plateau phase. Visual observations confirmed the quantitative results, demonstrating noticeable changes in seed appearance during hydration. The obtained results provide the first quantitative data on seed mass and hydration properties of *M. macrophylla* and expand current knowledge of reproductive characteristics within the genus *Mediasia*. The practical significance of the study lies in the potential application of these data for the development of conservation programs for rare species and for planning future investigations of the reproductive biology of natural populations.

**Keywords:** *Mediasia macrophylla*, seeds, seed mass, imbibition, seed hydration.

Ж.Е. Айменова<sup>1\*</sup>, Ф.А. Убаев<sup>1,2</sup>, Ш.Е. Дуисебаев<sup>1</sup>,  
Г.Е. Исламова<sup>1</sup>, А.М. Есимова<sup>1</sup>, С.Д. Джуманов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті, Шымкент, Қазақстан

<sup>2</sup>Қ.А. Ясауи атындағы халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан, Қазақстан

<sup>3</sup>Ақсу-Жабағылы мемлекеттік табиғи қорығы, Жабағылы, Қазақстан

\*e-mail: [aimenova.zhanara@gmail.com](mailto:aimenova.zhanara@gmail.com)

### *Mediasia macrophylla* (regel et schmalh.) pimenov тұқымдарының массасы және гидратациялық қасиеттері

Өсімдіктердің табиғи экожүйелердегі көбею, бейімделу және тұрақтылық процестерін түсінуде тұқым биологиясының маңызы зор. Әсіресе репродуктивтік сипаттамалары туралы мәліметтері шектеулі сирек және эндемикалық түрлерді зерттеу ерекше өзектілікке ие. Осы жұмыста алғаш рет Аpiaceae тұқымдасына жататын сирек эндемик түр — *Mediasia macrophylla* тұқымдарының массасы мен гидратациялық қасиеттері зерттелді. Зерттеудің мақсаты тұқым массасын, олардың ісіну динамикасын талдау және гидратация процесі кезіндегі тұқымдардағы өзгерістерді визуалды бағалау болды. Зерттеу түрдің репродуктивтік биологиясының маңызды сипаттамалары болып табылатын тұқым массасы мен су сіңіру ерекшеліктері жөнінде сандық деректер алуға бағытталды. Зерттеу әдістемесі жарық микроскопиясын қолдана отырып жүргізілген макроморфологиялық талдауды, 100 тұқымнан тұратын үлгілер бойынша тұқым массасын гравиметриялық анықтауды, сондай-ақ массаның 1, 3, 6 және 24 сағаттан кейінгі өзгерістерін тіркеу арқылы су сіңірудің гравиметриялық сынағын қамтыды. Нәтижесінде *M. macrophylla* тұқымдарының массасы төмен және көрсеткіштерінің өзгергіштігі аз екендігі анықталды, бұл популяциядағы тұқым материалының тұрақтылығын көрсетеді. Ісіну тәжірибесі суды қарқынды бастапқы сіңіру фазасын, кейіннен гидратация жылдамдығының бәсеңдеуін және

көрсетті. Визуалды бақылаулар гидратация барысында тұқымдардың сыртқы көрінісінде айқын өзгерістер болатынын көрсете отырып, сандық нәтижелерді растады. Алынған нәтижелер *M. macrophylla* тұқымдарының массасы мен гидратациялық қасиеттері жөніндегі алғашқы сандық деректерді ұсынады және *Mediasia* туысы өкілдерінің репродуктивтік сипаттамалары туралы мәліметтерді толықтырады. Жұмыстың практикалық маңызы алынған деректерді сирек түрлерді сақтау бағдарламаларын әзірлеуде және табиғи популяциялардың репродуктивтік биологиясын одан әрі зерттеуді жоспарлауда қолдану мүмкіндігімен анықталады.

**Түйін сөздер:** *Mediasia macrophylla*, тұқымдар, тұқым массасы, ісіну қабілеті, тұқымдардың гидратациясы.

Ж.Е. Айменова<sup>1\*</sup>, Ф.А. Убаев<sup>1,2</sup>, Ш.Е. Дуисебаев<sup>1</sup>, Г.Е. Исламова<sup>1</sup>,  
А.М. Есимова<sup>1</sup>, С.Д. Джуманов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Южно-Казахстанский исследовательский университет им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан

<sup>2</sup>Международный казахско-турецкий университет им. Х.А. Ясави, Туркестан, Казахстан

<sup>3</sup>Аксу-Джабаглинский государственный природный заповедник, Жабағлы, Казахстан

\*e-mail: aimenova.zhanara@gmail.com

### Масса семян и гидратационные свойства *Mediasia macrophylla* (regel et schmalh.) pimenov

Семенная биология играет ключевую роль в понимании процессов воспроизводства, адаптации и устойчивости растений в природных экосистемах. Особую актуальность приобретают исследования редких и эндемичных видов, для которых сведения о репродуктивных характеристиках остаются ограниченными. В данной работе впервые проведено исследование массы семян и гидратационных свойств редкого эндемичного вида *Mediasia macrophylla* (Ariaceae). Целью исследования являлся анализ массы семян, динамики их набухания и визуальная оценка изменений семян в процессе гидратации. Исследование направлено на получение количественных данных о массе семян и особенностях водопоглощения как важных характеристиках репродуктивной биологии вида. Методология исследования включала макроморфологический анализ с использованием световой микроскопии, гравиметрическое определение массы семян партиями по 100 семян, а также гравиметрический тест водопоглощения с регистрацией изменений массы через 1, 3, 6 и 24 часа. В результате установлено, что семена *M. macrophylla* характеризуются малой массой и низкой вариабельностью показателей, что свидетельствует о стабильности семенного материала популяции. Эксперимент по набухаемости выявил интенсивную начальную фазу водопоглощения с последующим замедлением скорости гидратации и выходом на плато. Визуальные наблюдения подтвердили количественные данные, свидетельствуя о заметных изменениях внешнего вида семян в процессе гидратации. Полученные результаты предоставляют первые количественные данные о массе семян и гидратационных свойствах *M. macrophylla* и расширяют сведения о репродуктивных характеристиках представителей рода *Mediasia*. Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных данных при разработке программ сохранения редких видов и планировании дальнейших исследований репродуктивной биологии природных популяций.

**Ключевые слова:** *Mediasia macrophylla*, семена, масса семян, набухаемость, гидратация семян.

#### Abbreviations

GBIF – Global Biodiversity Information Facility; TSW – thousand seed weight

#### Introduction

Seeds represent a pivotal stage in the plant life cycle, governing the processes of reproduction, dispersal, and species adaptation to environmental conditions. The morphological and physiological characteristics of seeds, including their mass, dimensions, and hydration properties, play a crucial role in shaping plant survival strategies across di-

verse ecosystems (Bewley et al., 2012; Baskin et al., 2001). In recent decades, research in seed biology has gained particular significance due to the urgent need for biodiversity conservation, especially for rare and endemic species sensitive to climate change and anthropogenic impact (Fenner & Thompson, 2005; Hajib et al., 2023; Sanchez et al., 2022).

Seed mass is one of the most widely studied parameters, regarded as a critical ecological and evolutionary trait. Numerous studies have demonstrated that seed mass is linked to environmental conditions, germination strategies, and seedling competitiveness (Westoby et al., 1996; Moles et al., 2005; Leishman et al., 2000). Small seeds are generally

characterized by a high dispersal capacity and a rapid response to favorable conditions, whereas larger seeds possess greater nutrient reserves that enhance seedling resilience (Willson & Traveset, 2000).

An equally vital aspect of seed biology is the imbibition process, which represents the initial phase of germination associated with water uptake and the activation of metabolic processes (Farooq et al., 2022; Nakabayashi et al., 2025). Seed water uptake kinetics are widely used to assess seed coat permeability, the presence of dormancy, and physiological readiness for germination (Upreti et al., 2024). Similar patterns of rapid initial water uptake followed by a gradual decrease in hydration rate have been reported for many herbaceous plant species during seed imbibition (Bhatt et al., 2016).

The Apiaceae family (umbellifers) represents a large and morphologically diverse group of flowering plants, widely distributed throughout the temperate regions of Eurasia (Kozuharova et al., 2024; Kljuykov et al., 2021). Seeds within this family are characterized by prominent longitudinal ribbing, relatively low mass, and specific fruit morphology (Pimenov & Leonov, 2004; Sayed-Ahmad et al., 2017). Several studies have demonstrated that the morphometric characteristics of Apiaceae seeds possess high taxonomic significance and can be utilized to refine the systematic position of species (Cai et al., 2022; Kalsoom et al., 2019).

Despite the substantial body of research dedicated to the seed biology of widespread Apiaceae

representatives, data regarding rare and endemic species of Central Asia remain extremely limited (Mamadaliyeva et al., 2018). In this context, the genus *Mediasia* is of particular interest, as it comprises narrow-range species confined to the mountain ecosystems of the Western Tien Shan.

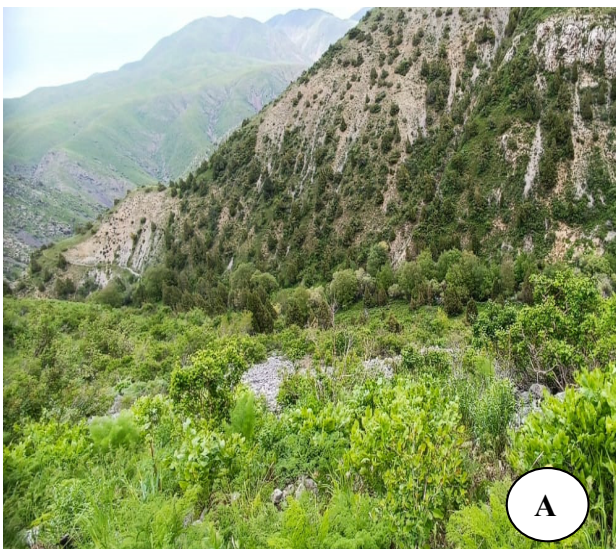
The subject of this study is the rare endemic species *Mediasia macrophylla* (Regel) Pimenov (Apiaceae). *M. macrophylla* is a rare endemic species for which literature data primarily focus on its distribution and general plant morphology, whereas the quantitative characteristics of its seeds remain virtually unstudied (Kurimoto et al., 2011).

The lack of data regarding seed mass, hydration properties, and macromorphological features of *M. macrophylla* represents a significant gap in the study of this species' biology, hindering the assessment of its reproductive potential and adaptive strategies. Under the conditions of increasing anthropogenic pressure and climate change, obtaining such data is of particular practical importance for developing conservation measures for rare endemic plants (Mariano & Christianini, 2021).

The study focuses on the morphometric and physiological characteristics of its seeds. The species under investigation grows in the mountain ecosystems of the Western Tien Shan, forming dense basal leaf rosettes adapted to rocky slopes and open habitats. The general plant habit and the characteristic features of its above-ground parts are shown in Figure 1.

**Figure 1**

Natural habit of *M. macrophylla* in the Western Tien Shan: (A) general view of the plant in its habitat on a rocky slope; (B) basal leaf rosette and characteristic morphological features of the above-ground parts



The aim of this work is a comprehensive experimental study of *M. macrophylla* seed mass and imbibition dynamics, as well as a visual assessment of macromorphological changes during the hydration process.

To achieve this goal, the following objectives were formulated:

- to determine seed mass using gravimetric analysis;
- to calculate the average single-seed mass and the thousand-seed weight (TSW);
- to investigate the dynamics of seed water uptake during the soaking process;
- to analyze the pattern of seed imbibition based on quantitative and visual data.

The primary research methods included gravimetric techniques for determining seed mass and water uptake, as well as macrophotography to document seeds during the imbibition process. The research approach is based on a combination of quantitative analysis and visual interpretation of morphological changes.

The research hypothesis is that the seeds of *M. macrophylla*, similar to most representatives of the

Apiaceae family, are characterized by low mass and a high initial water uptake rate, which ensures a rapid initiation of germination processes under natural conditions.

The scientific significance of this work lies in providing new experimental data on the seed biology of the rare endemic species *M. macrophylla*, which has previously been virtually unstudied in this regard. The practical importance consists in the potential application of these results for assessing the reproductive potential of populations and developing conservation strategies for rare flora species of the Western Tien Shan.

## Materials and methods

### *Study Object and Sample Preparation*

The study object was the rare endemic species *Mediasia macrophylla* (Regel & Schmalh.) Pimenov (Apiaceae). To confirm the species' distribution within the study area, data analysis was conducted using global biodiversity information aggregators, namely GBIF and iNaturalist; summarized records of the species from these databases are presented in Table 1.

**Table 1**

*Analysis of M. macrophylla occurrence in international information systems (as of January 20, 2026)*

№	Country or area	Coordinates	Event date	Dataset
1	Kazakhstan	42.1N, 70.0E	2025 May 06	iNaturalist Research-grade Observations
2	Uzbekistan	41.5N, 70.0E	2024 Jun 07	iNaturalist Research-grade Observations
3	Uzbekistan	42.0N, 70.5E	2024 Jul 19	iNaturalist Research-grade Observations
4	Uzbekistan	38.7N, 67.9E	2023 Aug 20	iNaturalist Research-grade Observations
5	Kazakhstan	42.4N, 70.6E	2016 Jun 18	iNaturalist Research-grade Observations
6	Kyrgyzstan		2016 Aug 01	Moscow University Herbarium (MW)
7	Kyrgyzstan	40.0N, 72.1E	2015 Jul 02	OPUN – Middle Asia
8	Uzbekistan	38.8N, 67.1E	2010 Jul 13	Moscow University Herbarium (MW)
9	Kyrgyzstan	41.7N, 70.7E	1996 Jun 16	Moscow University Herbarium (MW)
10	Uzbekistan	41.6N, 70.1E	1993 Jun 09	Vascular plant collections of the Botanical Museum, University of Oulu (OULU)
11	Kyrgyzstan	39.8N, 71.9E	1987 Jul 13	Moscow University Herbarium (MW)
12	Kyrgyzstan	41.7N, 70.6E	1986 Aug 04	Moscow University Herbarium (MW)
13	Kyrgyzstan	41.9N, 71.0E	1986 Aug 07	Moscow University Herbarium (MW)
14	Kazakhstan	42.0N, 70.0E	1982 Aug 22	Moscow University Herbarium (MW)
15	Kyrgyzstan	40.2N, 73.0E	1981 Jul 17	Moscow University Herbarium (MW)
16	Kyrgyzstan	40.6N, 73.5E	1981 Jul 20	Moscow University Herbarium (MW)
17	Tajikistan	38.6N, 70.7E	1976 Jul 10	Moscow University Herbarium (MW)
18	Tajikistan	38.1N, 70.3E	1975 Aug 03	Moscow University Herbarium (MW)

*Note: Herbarium acronyms are used according to Index Herbariorum: MW – Moscow University Herbarium, OULU – University of Oulu Herbarium.*

Prior to compiling the table, the data underwent preliminary verification: records with obvious coordinate errors, duplicates, and occurrences with low georeferencing accuracy were excluded. This facilitated the formation of a representative sample of unique spatio-temporal registrations of the species within its natural range.

The analysis of spatio-temporal data from global information systems (Table 1) confirms the status of *M. macrophylla* as a Central Asian endemic with a narrow-range distribution covering the Tien Shan and Pamir-Alay Mountain systems within Kazakhstan, Uzbekistan, Kyrgyzstan, and Tajikistan.

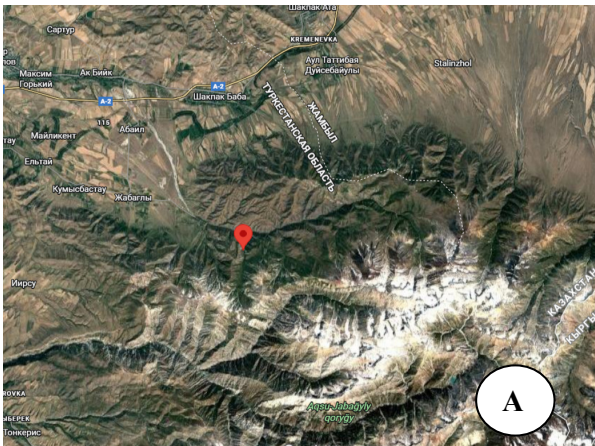
The presence of verified records from the Kishi-Kaindy gorge (Aksu-Zhabagly State Nature Reserve), spanning more than 40 years (from 1982 to 2025), indicates the stability of this population.

At the same time, the limited number of unique species registrations over recent decades confirms its rarity, justifying the need for detailed studies of its reproductive biology and seed productivity to develop biodiversity conservation measures for the region.

Seed material was collected from a natural population on the north-western slope of the Kishi-Kaindy gorge during the phase of full physiological maturity in September 2025 (Figure 2). Prior to the experiments, the seeds were cleaned of plant debris and impurities and brought to an air-dry state at room temperature. All analyses were performed using uniformly prepared material, which is an essential requirement for obtaining comparable and reproducible results in seed research (International Seed Testing Association, 2023).

**Figure 2**

Location of the collection site and seed samples: (A) localization of the collection site in the Kishi-Kaindy gorge ( $42^{\circ}24'08''$  N,  $70^{\circ}34'53''$  E) (Image: Google Maps); (B) collected and dried seeds of *M. macrophylla*



#### *Determination of Seed Mass*

Seed mass was determined gravimetrically in accordance with international seed testing standards (International Seed Testing Association, 2023) Weighing was performed using batches of 100 seeds, which is an optimal approach for small-seeded species and is widely applied in seed biology and ecology.

The experiment was conducted in three replicates. The seeds used in the experiment were nat-

urally air-dried after collection and stored under laboratory conditions until analysis. Seed moisture content was not determined separately; therefore, all mass values reported in this study correspond to air-dry seeds. Prior to weighing, the seeds were manually counted using forceps. Weighing was performed on a VL-224V analytical balance (Gosmetr, Russia) with preliminary taring of the weighing boat. For each replicate, the mass of a batch of 100 seeds ( $m_{100}$ ) was recorded.

Based on the obtained data, the mass of a single seed was calculated using the following formula:

$$m_{\text{seed}} = \frac{m_{100}}{100},$$

as well as the calculated 1000-seed weight:

$$m_{1000} = m_{\text{seed}} \cdot 1000.$$

#### *Seed Imbibition and Water Uptake*

Seed imbibition was evaluated using the gravimetric method to determine water uptake. The experiment was conducted in triplicate, using 50 seeds per sample. Dry seeds were pre-weighed to determine the initial mass ( $m_0$ ). The initial mass ( $m_0$ ) corresponded to the mass of air-dry seeds prior to soaking. The samples were then placed in containers with distilled water (10–20 mL) and maintained at room temperature (20–22 °C).

Weighing was performed after 1, 3, 6, and 24 hours. At the specified time intervals, the seeds were removed, blotted dry with filter paper (10–15 s), and immediately weighed to determine the current mass ( $m_t$ ). The percentage of water uptake was calculated using the following formula:

$$W = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100\%,$$

For each time point, the mean and standard deviation ( $M \pm SD$ ,  $n=3$ ) were calculated. The dynamics of the process were analyzed based on the curves of water uptake versus soaking time, which is a standard approach in studying the hydration properties of seeds (Bewley et al., 2012).

#### *Statistical analysis*

Morphometric measurements and analytical determinations were performed in triplicate ( $n=3$ ). Statistical processing of the results involved calculating the arithmetic mean ( $M$ ) and standard deviation ( $SD$ ). To assess the degree of variability of the studied traits, the coefficient of variation ( $CV$ , %) was calculated. The results are presented in the  $M \pm SD$  format. Mathematical data processing was carried out using the Microsoft Excel 2019 statistical analysis package.

## Results and discussion

### *Seed mass of M. macrophylla*

The results of the gravimetric analysis of *M. macrophylla* seeds are presented in Table 2. The mass of 100-seed batches in three experimental replicates was 0.7770 g, 0.7890 g, and 0.7410 g, respectively.

**Table 2**

*Seed mass of M. macrophylla determined by the gravimetric method*

Trial	100-seed mass (g)	Single seed mass	1000-seed weight
1	0.7770	0.00777	7.77
2	0.7890	0.00789	7.89
3	0.7410	0.00741	7.41
Mean $\pm$ SD	0.7690 $\pm$ 0.0245	0.00769 $\pm$ 0.000245	7.69 $\pm$ 0.245

The mean mass of 100 seeds was  $0.7690 \pm 0.0245$  g. Based on these values, the mean single seed mass was calculated to be  $0.00769 \pm 0.000245$  g ( $7.69 \pm 0.245$  mg). The calculated thousand seed weight (TSW) was  $7.69 \pm 0.245$  g.

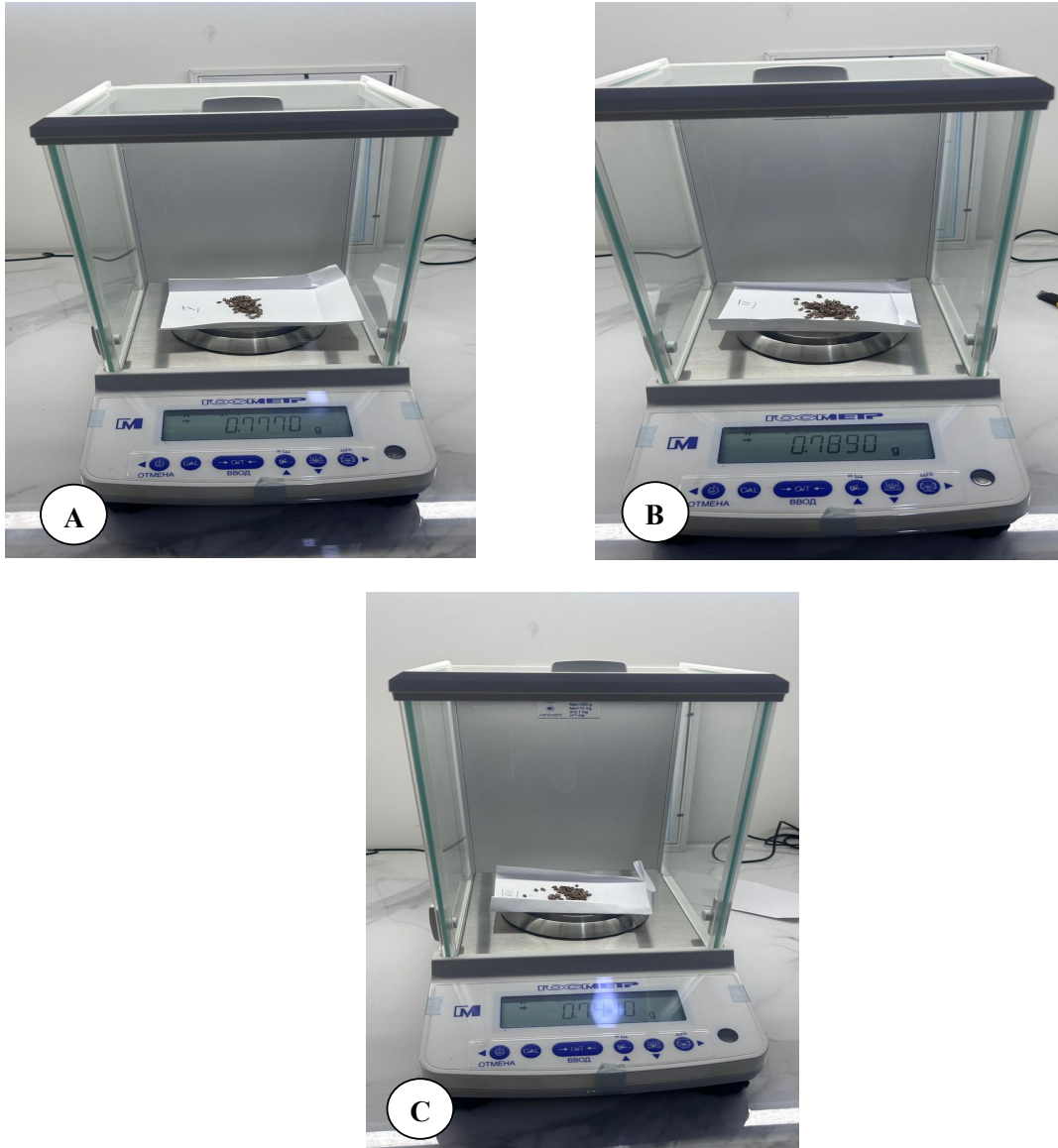
The low variability in seed mass between replicates indicates the relative uniformity of the seed material in the studied population.

The process of gravimetric seed mass determination for each replicate is illustrated in Figure 3, which presents representative photographs of seed batches being weighed on an analytical balance.

The obtained seed mass values characterize *M. macrophylla* as a relatively small-seeded species. Seed mass is known to vary considerably among plant species and is influenced by ecological and evolutionary factors (Westoby et al., 1996; Leishman et al., 2000). The TSW value obtained in the present study falls within the range generally reported for many herbaceous species and provides the first quantitative reference for *M. macrophylla*.

**Figure 3**

Gravimetric determination of *M. macrophylla* seed mass: (A) first replicate of 100-seed batch weighing (0.7770 g); (B) second replicate (0.7890 g); (C) third replicate (0.7410 g)



#### *Seed imbibition in M. macrophylla*

The results of the gravimetric analysis of *M. macrophylla* seed water uptake is presented in Table 3. The seeds were characterized by an intensive initial imbibition stage during the first hours after soaking.

After 1 hour, the water uptake averaged  $51.8 \pm 5.8\%$ . Within just 3 hours, the seed mass more than doubled compared to the dry state, reaching  $100.9 \pm 5.7\%$ . Subsequently, the imbibition rate decreased: water uptake was  $119.1 \pm 6.2\%$  after 6 hours and reached its maximum value of  $138.6 \pm 6.5\%$  after 24 hours (fig.4).

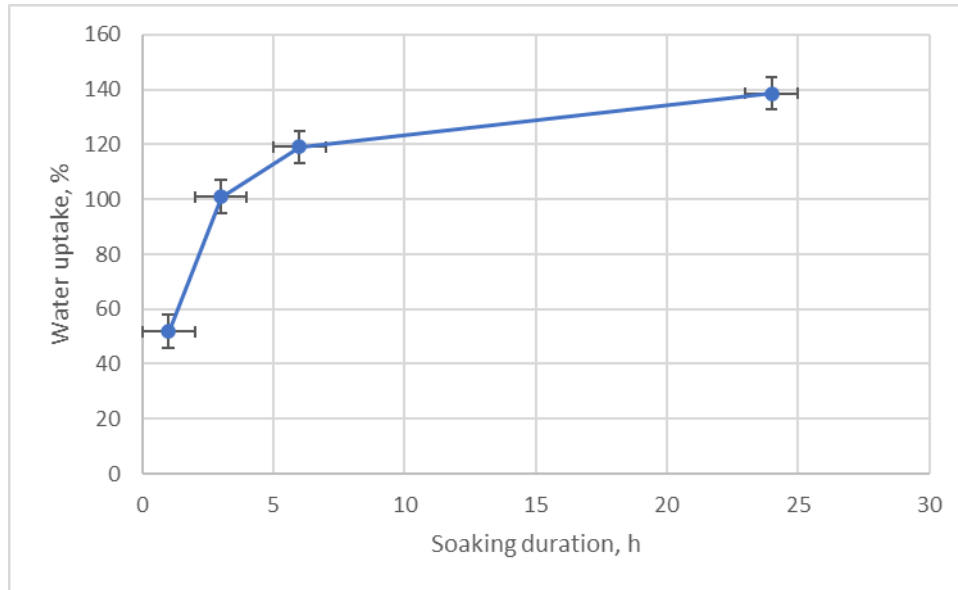
**Table 3**

*Water uptake dynamics of M. macrophylla seeds*

No.	Soaking time (h)	Water uptake (%)
1	1	$51.8 \pm 5.8$
2	3	$100.9 \pm 5.7$
3	6	$119.1 \pm 6.2$
4	24	$138.6 \pm 6.5$

**Figure 4**

Water uptake dynamics of *M. macrophylla* seeds during soaking ( $M \pm SD$ ,  $n = 3$ )



The resulting imbibition curve is characterized by rapid water uptake during the initial hours of soaking, followed by a gradual decrease in the hydration rate and stabilization of the process. Similar patterns of water absorption have been reported for many herba-

ceous plant species and representatives of the Apiaceae family (Louf et al., 2018; Moret-Fernández et al., 2024). Visual changes in the seeds during the imbibition process, including increases in size and changes in coloration, are presented in Figure 5.

**Figure 5**

Appearance of *M. macrophylla* seeds after imbibition in water: (A) general view of seeds in a Petri dish; (B) magnified image of imbibed seeds showing a distinct increase in volume and changes in coloration



The present study provides the first quantitative data on seed mass and hydration characteristics of *Mediasia macrophylla*, a rare endemic species of the Western Tien Shan. Seed mass is considered

one of the most important functional traits influencing plant regeneration, dispersal, and establishment processes and is widely used in ecological and evolutionary studies (Westoby et al., 1996; Leish-

man et al., 2000). The calculated thousand-seed weight (TSW) of *M. macrophylla* was  $7.69 \pm 0.25$  g, indicating that the species belongs to the group of relatively small-seeded plants. This observation is consistent with the general characteristics reported for many representatives of the Apiaceae family, whose diaspores are typically characterized by relatively low seed mass and specific fruit morphology (Kljuykov et al., 2021).

Previous studies have demonstrated that seed mass varies substantially among species and is influenced by both phylogenetic and environmental factors (Westoby et al., 1996; Moles et al., 2005). Although direct comparative data for other species of the genus *Mediasia* are currently unavailable, the values obtained in the present study provide the first quantitative reference for future comparative investigations. The relatively low variability observed among replicates suggests a high degree of uniformity of the analyzed seed sample under the conditions of the studied population.

Water uptake is a prerequisite for seed germination because hydration activates numerous physiological and biochemical processes within the embryo and storage tissues. According to Upretee et al. (2024), the rate and extent of water absorption depend on seed coat permeability, seed structure, and physicochemical properties of the seed tissues. In the present study, *M. macrophylla* seeds exhibited rapid water absorption during the first hours of soaking, followed by a gradual decrease in the hydration rate. Similar patterns have been reported for many herbaceous plant species and are generally regarded as characteristic of the initial stages of seed hydration (Farooq et al., 2022).

The ability of *M. macrophylla* seeds to absorb substantial amounts of water within a relatively short period indicates effective hydration of seed tissues under experimental conditions. After 24 hours of soaking, water uptake reached 138.6%, demonstrating a pronounced capacity for water absorption. Such hydration dynamics are consistent with the activation of physiological processes that generally accompany the early stages of seed germination. However, germination tests, seed viability assessment, and dormancy studies were beyond the scope of the present work. Therefore, the relationship between water uptake character-

istics and actual germination performance of *M. macrophylla* remains unclear and requires further investigation.

The present study has several limitations. Seed moisture content was not determined separately prior to the experiment, and all mass measurements refer to air-dry seeds. In addition, the study focused exclusively on seed mass and hydration properties and did not include germination, dormancy, or viability assessments. Nevertheless, the obtained results expand the currently limited knowledge of the genus *Mediasia* and provide baseline information for future studies of seed germination, reproductive characteristics, population ecology, and conservation of this rare endemic species.

## Conclusion

This study characterized seed mass and hydration properties of the rare endemic species *M. macrophylla* (Regel et Schmalh.) Pimenov. The seeds were found to have a relatively low thousand-seed weight ( $7.69 \pm 0.25$  g) and a high capacity for water uptake, reaching 138.6% after 24 hours of soaking. Rapid hydration occurred during the initial hours of imbibition, followed by a gradual decrease in the rate of water absorption. These findings provide baseline information on the seed characteristics of *M. macrophylla* and may support future studies aimed at understanding the reproductive ecology and conservation of this species.

## Acknowledgements

We are grateful to the Science Department of the Aksu-Zhabagly Nature Reserve for their assistance.

## Author Contributions

Aimenova Zh.E.: Conceptualization, Methodology, Investigation, Formal Analysis, Data Curation, Writing – Original Draft, Writing – Review & Editing; Ubaev F.A.: Investigation, Data Curation, Visualization.; Duissebayev Sh.E.: Investigation, Formal Analysis, Visualization; Islamova G.E.: Investigation, Data Curation, Validation; Esimova A.M.: Methodology, Supervision, Writing – Review & Editing; Dzhumanov S.D.: Resources, Investigation, Validation.

## References

- Baskin, C. C., & Baskin, J. M. (2001). *Seeds: Ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination*. Academic Press.
- Bewley, J. D., Bradford, K. J., Hilhorst, H. W. M., & Nonogaki, H. (2012). *Seeds: Physiology of development, germination and dormancy* (3rd ed.). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4693-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4693-4_6)
- Bhatt, A., Santo, A., & Gallacher, D. (2016). Seed mucilage effect on water uptake and germination in five species from the hyper-arid Arabian Desert. *Journal of Arid Environments*, 128, 73–79. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.01.008>
- Cai, J., Zhou, S., Mo, Z., & colleagues. (2022). The phylogeny of *Seseli* (Apiaceae, Apioideae): Insights from molecular and morphological data. *BMC Plant Biology*, 22(1), 534. <https://doi.org/10.1186/s12870-022-03919-9>
- Farooq, M. A., Nadeem, F., Gogoi, N., Ullah, A., Alghamdi, S. S., Siddique, K. H. M., & Farooq, M. (2022). Underlying biochemical and molecular mechanisms for seed germination. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(15), 8502. <https://doi.org/10.3390/ijms23158502>
- Fenner, M., & Thompson, K. (2005). *The ecology of seeds*. Cambridge University Press.
- Hajib, A., El Atki, Y., Ait Bouyahya, A., Balahbib, A., Boukhatem, M. N., & Abdelguerfi-Laouar, M. (2023). Apiaceae family: An important source of petroselinic fatty acid: Abundance, biosynthesis, chemistry, and biological properties. *Biomolecules*, 13(11), 1675. <https://doi.org/10.3390/biom13111675>
- International Seed Testing Association. (2023). *International rules for seed testing 2023*. International Seed Testing Association.
- Kalsoom, N., Jan, S. A., Gul, S., & colleagues. (2019). Investigating schizocarp morphology as a taxonomic tool in study of Apiaceae family by utilizing LM and SEM techniques. *Microscopy Research and Technique*, 82(7), 1012–1020. <https://doi.org/10.1002/jemt.23248>
- Kljuykov, E. V., Degtjareva, G. V., Zakharova, E. A., & Pimenov, M. G. (2021). Most important carpological anatomical characters in the taxonomy of Apiaceae. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 195(3), 532–544. <https://doi.org/10.1093/botlinnean/boaa082>
- Kozuharova, E., Benković, E. T., Benković, V., & colleagues. (2024). Wild species from the family Apiaceae traditionally used as food in some Mediterranean countries. *Plants*, 13(16), 2324. <https://doi.org/10.3390/plants13162324>
- Kurimoto, S., Kashiwada, Y., Lee, K. H., Takaiishi, Y., & colleagues. (2011). Four new glucosides from the aerial parts of *Mediasia macrophylla*. *Journal of Natural Medicines*, 65(1), 180–185. <https://doi.org/10.1007/s11418-010-0444-3>
- Leishman, M. R., Wright, I. J., Moles, A. T., & Westoby, M. (2000). The evolutionary ecology of seed size. In M. Fenner (Ed.), *Seeds: The ecology of regeneration in plant communities* (2nd ed., pp. 31–57). CABI Publishing.
- Louf, J. F., Zheng, Y., Kumar, A., Bohr, T., Gundlach, C., Harholt, J., & Jensen, K. H. (2018). Imbibition in plant seeds. *Physical Review E*, 98(4), 042403. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.98.042403>
- Mamadaliyeva, N. Z., Akramov, D. K., Ovidi, E., Tiezzi, A., Nahar, L., Azimova, S. S., & Sarker, S. D. (2018). Composition of essential oils from four Apiaceae and Asteraceae species growing in Uzbekistan. *Natural Product Research*, 32(9), 1118–1122. <https://doi.org/10.1080/14786419.2017.1375928>
- Mariano, V., & Christianini, A. V. (2021). Effects of anthropogenic disturbance on seed germination under field conditions: A meta-analysis. *Acta Oecologica*, 113, 103791. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2021.103791>
- Moles, A. T., Ackerly, D. D., Webb, C. O., Tweddle, J. C., Dickie, J. B., & Westoby, M. (2005). Factors that shape seed mass evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(30), 10540–10544. <https://doi.org/10.1073/pnas.0501473102>
- Moret-Fernández, D., Tormo, J., & Latorre, B. (2024). A new methodology to characterize the kinetics of a seed during the imbibition process. *Plant and Soil*, 498(1–2), 181–197. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06427-3>
- Nakabayashi, K., Hayashi, T., Kimura, T., & colleagues. (2025). Morphological dormancy, embryo growth and pericarp restraint during crop and wild Apiaceae mericarp germination in response to ambient temperature. *Planta*, 262(6), Article 126. <https://doi.org/10.1007/s00425-025-04850-7>
- Pimenov, M. G., & Leonov, M. V. (2004). The Asian Umbelliferae biodiversity database (ASIUM) with particular reference to South-West Asian taxa. *Turkish Journal of Botany*, 28(1), 139–145.
- Sánchez, M., Peris-Felipo, F. J., Segura, I., Roselló, M., & Calabuig, A. (2022). Pollination by the hoverfly *Eristalinus aeneus* (Diptera: Syrphidae) in two hybrid seed crops: Celery and fennel (Apiaceae). *The Journal of Agricultural Science*, 160(3–4), 194–206. <https://doi.org/10.1017/S0021859622000314>
- Sayed-Ahmad, B., Talou, T., Saad, Z., Hijazi, A., & Merah, O. (2017). The Apiaceae: Ethnomedicinal family as source for industrial uses. *Industrial Crops and Products*, 109, 661–671. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.09.027>
- Upreti, P., Bandara, M. S., & Tanino, K. K. (2024). The role of seed characteristics on water uptake preceding germination. *Seeds*, 3(4), 559–574. <https://doi.org/10.3390/seeds3040038>
- Westoby, M., Leishman, M., & Lord, J. (1996). Comparative ecology of seed size and dispersal. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 351(1345), 1309–1318. <https://doi.org/10.1098/rstb.1996.0114>
- Willson, M. F., & Traveset, A. (2000). The ecology of seed dispersal. In M. Fenner (Ed.), *Seeds: The ecology of regeneration in plant communities* (2nd ed., pp. 85–110). CABI Publishing.

**Information about the authors:**

Aimenova Zhanar Erkenovna (corresponding author) – PhD, Head of the Phytochemistry laboratory at M. Auezov South Kazakhstan Research University (Shymkent, Kazakhstan, e-mail: aimenova.zhanara@gmail.com).

Ubaev Furkat Abdivahapuly – master, PhD student at M. Auezov South Kazakhstan Research University (Shymkent, Kazakhstan, e-mail: furkhat.ubaev@mail.ru); Leading Researcher at Research Institute “Botanical Garden” of K.A. Yasawi International Kazakh-Turkish University (Turkistan, Kazakhstan).

Duissebayev Shyngiskan Ergalievich – master, Researcher at Phytochemistry laboratory at M. Auezov South Kazakhstan Research University (Shymkent, Kazakhstan, e-mail: shyngys.86@mail.ru).

Islamova Gulnur Erkinbaevna – master, Researcher at Phytochemistry laboratory at M. Auezov South Kazakhstan Research University (Shymkent, Kazakhstan, e-mail: gulnura\_87\_kz@mail.ru).

Esimova Anar Madenovna – candidate of chemical sciences, Associated Professor at the Department of Biotechnology at M. Auezov South Kazakhstan Research University (Shymkent, Kazakhstan, e-mail: anar\_esimova@mail.ru).

Dzhumanov Smatulla Dzhoraeovich – Head of the Department of Science and Monitoring at Aksu-Jabagly State Nature Reserve (Zhabagly village, Kazakhstan, e-mail: samat.reserve@mail.ru).

**Авторлар туралы мәлімет:**

Айменова Жанар Еркеновна (хат-хабарларға жауапты автор) – PhD, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университетінің «Фитохимия» ғылыми-зерттеу зертханасының меңгерушісі (Шымкент, Қазақстан, e-mail: aimenova.zhanara@gmail.com).

Убаев Фуркат Абдивахапұлы – магистр, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университетінің докторанты (Шымкент, Қазақстан, e-mail: furkhat.ubaev@mail.ru); Қ.А. Ясауи атындағы халықаралық қазақ-түрік университетінің «Ботаникалық бақ» ғылыми-зерттеу институтының жетекші ғылыми қызметкері (Түркістан, Қазақстан).

Дүйсебаев Шыңғысқан Ергалиевич – магистр, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университетінің «Фитохимия» ғылыми-зерттеу зертханасының ғылыми қызметкері (Шымкент, Қазақстан, e-mail: shyngys.86@mail.ru).

Исламова Гүлнұр Еркінбайқызы – магистр, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университетінің «Фитохимия» ғылыми-зерттеу зертханасының ғылыми қызметкері (Шымкент, Қазақстан, e-mail: gulnura\_87\_kz@mail.ru).

Есимова Анар Маденовна – химия ғылымдарының кандидаты, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университетінің биотехнология кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Шымкент, Қазақстан, e-mail: anar\_esimova@mail.ru).

Джуманов Сматулла Джораевич – Ақсу-Жабағылы мемлекеттік табиғи қорығының ғылым және мониторинг бөлімінің басшысы (Жабағылы ауылы, Қазақстан, e-mail: samat.reserve@mail.ru).

**Сведения об авторах:**

Айменова Жанар Еркеновна (автор для корреспонденции) – PhD, заведующая научно-исследовательской лабораторией «Фитохимия» Южно-Казахстанского исследовательского университета имени М. Ауэзова (Шымкент, Казахстан, e-mail: aimenova.zhanara@gmail.com).

Убаев Фуркат Абдивахапұлы – магистр, докторант Южно-Казахстанского исследовательского университета имени М. Ауэзова (Шымкент, Казахстан, e-mail: furkhat.ubaev@mail.ru); ведущий научный сотрудник научно-исследовательского института «Ботанический сад» международного казахско-турецкого университета им. Х.А. Ясауи (Туркестан, Казахстан).

Дүйсебаев Шыңыскан Ергалиевич – магистр, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Фитохимия» Южно-Казахстанского исследовательского университета имени М. Ауэзова (Шымкент, Казахстан, e-mail: shyngys.86@mail.ru).

Исламова Гүлнұр Еркінбаевна – магистр, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Фитохимия» Южно-Казахстанского исследовательского университета имени М. Ауэзова (Шымкент, Казахстан, e-mail: gulnura\_87\_kz@mail.ru).

Есимова Анар Маденовна – кандидат химических наук, доцент кафедры биотехнологии Южно-Казахстанского исследовательского университета имени М. Ауэзова (Шымкент, Казахстан, e-mail: anar\_esimova@mail.ru).










Джуманов Сматулла Джораевич – начальник отдела науки и мониторинга Ақсу-Жабағлинского государственного природного заповедника (Жабағлы, Казахстан, e-mail: samat.reserve@mail.ru).

Received February 2, 2026

Accepted June 15, 2026

FTAMP 34.29.35

<https://doi.org/10.26577/bb107220264>

**А.Б. Мылтыкбаева** , **А.С. Нурмаханова\*** , **С.Д. Атабаева** ,  
**Ш.Ж. Алдасугурова** , **М.А. Дюсебаева** , **М.К. Нармуратова** ,  
**А.С. Муратбаева** , **Ш. Турайлова** , **Ү.К. Ошақбай** 

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

\*e-mail: akmaral.nurmahanova@gmail.com

## **БАҚАНАС КАНАЛЫ ЖАЙЫЛМАСЫНДАҒЫ *CALLIGONUM ALATUM* LITW. ӨСІМДІГІНІҢ ЦЕНОПОПУЛЯЦИЯЛАРЫНЫҢ ҚАЗІРГІ ЖАҒДАЙЫН БАҒАЛАУ**

Мақалада *Calligonum alatum* Litw. өсімдігінің бірінші популяциясы Алматы облысы, Балқаш ауданы, Бақанас ауылынан 25 км қашықтықта, Іле өзенінен 500–700 м жетпейтін аймақтан табылды. Өсімдіктің таралу ортасының топырағы құмды массив. Жер бедері толқынды-бұдырлы, GPS бойынша координаттары: N 44°41'12.0", E 76°24'55.2" ш.б. табылды. *Calligonum alatum* геоботаникалық тұрғыдан зерттеу жұмыстары жасалды. Таралу ортасындағы ценопопуляциядағы өсімдіктің жастық спектрі мен оның көбейе алуға қабілетті репродуктивтілігі, таралуындағы сандық көрсеткіштері, жастық құрылымы, фитоценоздың түрлік құрамы бойынша жіктелуін анықтауда геоботаникалық әдістер қолданылды. Зерттеу объектісінің өсу қарқындылығы мен ортаға бейімделуін деңгейінің жастық құрамын анықтау және бағалау жүргізу негізінде 10x10m<sup>2</sup> трансекталар салынды. Шекарасы белгіленген аймақтағы түр құрамы мен дарақтар санының жиілігімен популяцияның тығыздығы анықталады және бағалау шкаласы жасалды. *Calligonum alatum* өсімдігінің екі ценопопуляциясымен қауымдастық құруының түрлік құрамы өсімдіктердің проекциялық жабынының пайыздық көрсеткіштерінің деңгейі анықталды. Өсімдіктің ярустары бойынша талдау жасалды. Екі ценопопуляцияның топырақ құрамы құмды-қиыршықты. Стюденттің t-критерийі бойынша анықталған ценопопуляция шеңберінде салынған екі трансектаның онтогенетикалық құрылымындағы айырмашылықтарды анықтау мақсатында қолданылды. Әрбір трансекта бойынша онтогенетикалық жастық күйлерінің дарақтар саны сандық көрсеткіш ретінде нақты алынды, тәуелсіз екі таңдама ретінде қарастырылды. Анықталған өсімдіктің жас құрылымы кеңінен сипатталды. Мұнда субсенильдік және сенильдік дарақтардың төмен саны популяцияның қартаю кезеңінің шектеулігі анықталды, ал өскіндер мен ювенильдік дарақтардың басымдылық танытуы кеңістікте табиғи жаңару үдерісінің белсенді екенін көрсетті. Бағалау бойынша ценопопуляцияның даму динамикасын және экологиялық тұрақтылығын нақты анықтауға мүмкіндік берді. Геоботаникалық тұрғыдан *Calligonum alatum* популяциясы дамудың тұрақтылығын көрсетті. Табиғи ортада өсу қабілетін сақтауға және ұзақ мерзімді перспективада тұрақты дамуға қабілеттілігін, прогрессивті типтегі популяция ретінде бағаланатындығын дәлелдей түсті. Өсімдіктің генеративтік мүшелері толық қалыптасқан, жыл сайынғы гүлдену процесі тұрақты байқалады, бұл жеміс беру қарқындылығының жоғары екенін дәлелдейді.

**Түйін сөздер:** геоботаника, фитоценоз, популяция, ценопопуляция, шөл, трансекта.

A.B. Myltykbayeva, A.S. Nurmahanova\*, S.D. Atabayeva, Ch.Zh. Aldassugurova,  
 M.A. Dyusebaeva, M.Kh. Narmuratova, A.S. Muratbayeva,  
 Sh.A. Turailova, U.K. Oshakbay

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

\*e-mail: akmaral.nurmahanova@gmail.com

### **Assessment of the current status of the cenopopulations of *Calligonum alatum* Litw. in the floodplain of the Bakanas Canal**

The article reports that the first population of *Calligonum alatum* Litw. was identified in Almaty Region, Balkhash District, at a distance of 25 km from Bakanas village, within an area located 500–700 m from the Ili River. The site is situated in a gently undulating and hummocky terrain with sandy-gravelly soils. GPS coordinates of the study area were recorded as N 44°41'12.0", E 76°24'55.2". Geobotanical investigations were conducted using standard field methods to assess population structure, species com-

were established to study age structure, density, reproductive capacity, and spatial distribution. Within these plots, species composition, frequency of occurrence, and individual abundance were recorded, allowing for the calculation of population density and the development of an evaluation scale. Additionally, the vertical structure of vegetation cover and the percentage of projective cover were determined. To compare ontogenetic structure between transects within a single cenopopulation, Student's t-test was applied, treating each transect as an independent sample based on counts of individuals in different age stages. The results revealed a well-defined age spectrum characterized by a predominance of seedlings and juvenile individuals, indicating active natural regeneration. The relatively low proportion of subseñile and senile individuals suggests limited population aging and stable demographic renewal processes. Generative individuals were well developed, with consistent annual flowering and high fruiting intensity, reflecting successful reproductive performance. Overall, the population demonstrates stable development under natural conditions. The observed structural and reproductive characteristics indicate ecological resilience and the ability to maintain long-term viability. From a geobotanical perspective, the *Calligonum alatum* population can be considered stable with features of a progressive type, suggesting favorable adaptive potential in arid sandy-gravelly habitats influenced by the Ili River ecosystem.

**Keywords:** geobotany, phytocenosis, population, cenopopulation, desert, transect.

А.Б. Мылтыкбаева, А.С. Нурмаханова\*, С.Д. Атабаева, Ш.Ж. Алдасугурова,  
М.А. Дюсебаева, М.К. Нармуратова, А.С. Муратбаева,  
Ш. Турайлова, Ү.К. Ошақбай

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

\*e-mail: akmaral.nurmahanova@gmail.com

#### **Оценка современного состояния ценопопуляций *Calligonum alatum* Litw. в пойме Баканасского канала**

В статье показано, что первая популяция растения *Calligonum alatum* Litw. была выявлена в Алматинской области, Балхашский район, на расстоянии 25 км от села Баканас, в зоне, расположенной на расстоянии 500–700 м от реки Или. Рельеф территории волнисто-бугристый. Географические координаты участка, определённые с использованием GPS, составляют: N 44°41'12.0", E 76°24'55.2" в.д. Для растения *Calligonum alatum* были проведены геоботанические исследования. В среде обитания ценопопуляции изучались возрастной спектр растений, их репродуктивная способность, количественные показатели распространения, возрастная структура, а также классификация фитоценоза по видовому составу с применением общепринятых геоботанических методов. С целью определения и оценки возрастного состава, интенсивности роста и уровня адаптации объекта исследования к условиям среды были заложены трансекты площадью 10×10 м<sup>2</sup>. В пределах обозначенной территории определялись видовой состав, частота встречаемости и численность особей, на основе чего оценивалась плотность популяции и разрабатывалась соответствующая шкала оценки. Для двух ценопопуляций *Calligonum alatum* был определён видовой состав сообществ, а также процентные показатели проективного покрытия растений. Проведён анализ растительного покрова по ярусам. Почвенный состав обеих ценопопуляций характеризуется как песчано-галечный. С целью выявления различий в онтогенетической структуре двух трансект, заложенных в пределах одной ценопопуляции, был применён критерий Стьюдента (t-критерий). Для каждой трансекты численность особей в онтогенетических возрастных состояниях принималась в качестве количественного показателя и рассматривалась как две независимые выборки. Возрастная структура выявленной популяции была подробно охарактеризована. Низкая численность субсеñильных и сеñильных особей свидетельствует об ограниченности процессов старения популяции, тогда как преобладание проростков и ювенильных особей указывает на активное естественное возобновление в пространстве. Проведённая оценка позволила достоверно определить динамику развития и экологическую устойчивость ценопопуляции. С геоботанической точки зрения популяция *Calligonum alatum* демонстрирует устойчивый характер развития. Установлено, что она способна сохранять жизнеспособность в природных условиях и обладает потенциалом к устойчивому развитию в долгосрочной перспективе, что позволяет отнести её к популяциям прогрессивного типа. Генеративные органы растения полностью сформированы, ежегодный процесс цветения наблюдается стабильно, что подтверждает высокую интенсивность плодоношения.

**Ключевые слова:** геоботаника, фитоценоз, популяция, ценопопуляция, пустыня, трансекта.

## Кіріспе

Қазіргі уақытта Ресей, Қазақстан, Қырғызстан, Тәжікстан және басқа да елдердің шөлейт және шөл аймақтарында шамадан тыс мал жаю, жерді төмен агротехникалық деңгейде өңдеу және климаттың ортасы құрғақшылыққа ауысуда, осының есебінен топырақ пен өсімдік жамылғысының деградациясы, түздануы, бұзылуынан шөлдену процесі артуда.

Қоршаған орта мониторингінің жаһандық жүйесін құру жөніндегі 1972 жылғы Стокгольм конференциясында басталған ластануларға қарсы мониторингі қатаңдату БҰҰ-ның Қоршаған орта және даму жөніндегі конференциясында одан әрі дамыды (Глобальная стратегия сохранения растений 2002). Бұл «Биологиялық алуантүрлілік туралы конвенция» (Конвенция о биологическом разнообразии 1992), «Өсімдіктерді сақтаудың жаһандық стратегиясы» (Глобальная стратегия сохранения растений 2002), «Биоалуантүрлілік туралы конвенция тараптарының XI-ші конференциясының декларациясы» (Декларация XI-ой Конференции Сторон конвенции о биоразнообразии 2012) және т.б. Соңғы уақытта бүкіл әлем бойынша халық санының қарқынды өсуі және ғылым мен техниканың қарқынды дамуы байқалады, бұл қоршаған ортаға, ең алдымен өсімдіктер әлеміне антропогендік әсердің артуына әкелді. Бұл әсерлер көп қырлы. Оларға жерді иеліктен шығару (үлкен қалалардың алаңын кеңейту, жаңа қалалар салу, автомобиль және темір жолдары желісін салу, мұнай мен газды айдау үшін құбырлар жүргізу және т.б.), пайдалы қазбаларды (түсті және қара металдар, көмір, мұнай және газ, уран) өндіру нәтижесінде пайда болған бүлінген жерлер, тың және тыңайған жерлерді игеру мақсатында жырту жатады. Бірқатар мамандардың айтуынша, өсімдіктердің сирек кездесетін түрлерін жоғалту биосферадағы биоалуантүрлілікті төмендетудің жалпы проблемасының бір бөлігі болып табылады (Jacquemyn et al., 2003; Brys et al., 2002; Jacquemyn H et al., 2003; Kery M et al., 2000; Young A et al., 1996; Jacquemyn H et al., 2002;) Н [5-10].

Шөлді аймақта кездесетін *Polygonaceae* тұқымдасына *Calligonum* L. туысына енетін түрлері осы ортаға өсуге бейімделген бұталы өсімдіктер қатарына жатады (Н. В. Павлов 1961; Абдуллаев А.С.2020;). Таралу ортасы Мойынқұм, Қызылқұм, Үстірт, Ақтөбе және Атырау, Оңтүстік Балхаш өңірлерінен анықталған. *Calligonum alatum* өсімдігі *Calligonum* L. туысына жататын

көпжылдық шөлге адаптациялық қалыптасуы айқындалған бұталы өсімдік. Морфологиялық талдау бойынша биіктігі 1,5-2 м жетеді, сабағы қызыл-қоңыр қабықты, жапырақтары сызықша, майда түктермен қапталған. Жемісі жаңғақша, диаметрі 2–2,5 мм. Анатомиялық зерттеулерде жапырақ эпидермисінде көпклеткалы безді түктер мен эфир май жинағыштары, сабақта ксилема мен флоэманың жақсы жетілгендігі анықталған, бұл өсімдіктің құрғақ климатқа бейімделуін қамтамасыз етеді (Vasila Sharipova et al., 2024).

*Calligonum* L. туысының көптеген түрлері Солтүстік Африкада және Оңтүстік-Шығыс Еуропада кеңінен таралған, бұл туыстың түрлері жалпы алғанда Орталық Азияның шөлді өсімдік жамылғысында таралған. Мұнда олардың жапырақтары әдетте редуцияланған, ал жас бұтақтары фотосинтездің қызметін атқарады. Вегетативтік мүшелердің айқын қарапайымдануына байланысты туыстың төрт секциясын нақты атап көрсету олардың жемістерінің құрылысына және сыртқы белгілеріне негізделген. Нақты айтылған *Calliphysa Borszcz.*, *Calligonum*, *Pterococcus Borszcz.* және *Medusa Sosk.* секцияларының барлығының жемістерінің шеттерінде жіңішке қанатшалары немесе түктері бар жарғақты немесе қапшық тәрізділігімен ерекше белгілері ретінде қалыптасқан. Алайда жеміс морфологиясы айтарлықтай өзгермелі болуы мүмкін, бұл *Calligonum* туысы ішіндегі түрлерді нақты ажырату барысында қиындатады. Түрлердің болжамды саны әртүрлі жүйелеулерге байланысты 28–80 аралығында ауытқиды, кейбір өңдеулерде 174 түр 28 түрге дейін қысқартылған, ал басқада ғылыми деректерге сүйенсек 35 түрі көрсетілген (Song F et al., 2020). *Calligonum* туысына енетін түрлердің сабақтары тегіс және бұтақталған, құрғақ аймақтарда азық-түлік тапшы кезендерде жеуге жарамды ұсақ, шырынды жемістері қоректік азық ретінде қолданылған. Бұл өсімдіктер, әсіресе көктем мен жаз айларында, түйелер үшін өте құнды жемшөп көзі болып табылады. Гүлдері ұнға айналдырылып нан пісіруге немесе ерітілген маймен бірге жергілікті дәстүрлі тағам ретінде дайындалады (Ren, Jun & Tao et al., 2001). Соңғы уақытта Bannour және т.б. (2016) ғылымдардың зерттеуінде *C. azel* жапырақтары, сабақтары, тұқымдары мен тамырларының метанолды экстракттары бірқатар микроағзаларға қарсы саңырауқұлаққа және бактерияға қарсы белсенділік көрсететінін дәлелдеді (Bannour M, et al., 2016). *C. comosum* өсімдігінің жаңа жерүсті бөліктері ойық жараға

қарсы және қабынуға қарсы әсер көрсетті. Египетте өсетін *C. Comosum* өсімдігінің вегетативті мүшелерінен бөлінген кейбір қосылыстар антиоксиданттық және цитотоксикалық белсенділікке ие болып, қандағы қант деңгейін төмендету арқылы гипогликемиялық әсер көрсетті (Liu XM et.al., 2001). Әлемде *Calligonum* L. туысының 35 түрі бар, олардың 23 -ге жуығы Қытайда өседі, ал 8 түрі эндемик болып табылады. Бұл түрлер Қытайдың құмды және қиыршықтасты шөлдерінің экожүйелік тұрақтылығында шешуші рөл атқарады. Эремофиттерді тұрақты пайдалану мақсатында Қытай ғылым академиясы қарасты Турфан ботаникалық бағында Қытайдағы каллигонум түрлерінің шамамен 90%-ы жинақталған (Мао ZM et.al., 1986). Осы аймақта *Polygonaceae* тұқымдасының экономикалық маңызы жоғары және кең таралған *Calligonum* түрлеріне *C. azel*, *C. comosum* және *C. arich* жатады. Олар Тунистің оңтүстігіндегі құмды дюналарда кең таралған, өсуі мен дамуы бойынша ерекшеленеді және бірдей климаттық шектеулер жағдайында бірге кездесуі мүмкін. Бұл түрлер Тунистің шөл экожүйелеріндегі екпелер мен табиғи өсімдік жамылғысының тұрақтылығын сақтауда маңызды рөл атқарады. Сонымен қатар, олар жемшөп, халық медицинасындағы дәрілік шикізат, шөлдену үдерістерін тежеу және құмды дюналарды тұрақтандыру сияқты әртүрлі экожүйелік қызметтер мен өнімдерді ұсынуда үлкен әлеуетке ие. Бұдан бөлек, жергілікті көшпелі халық оларды отын мен ағаш көмірін өндіру үшін пайдаланған; осы тұрғыда шамадан тыс пайдалану олардың санының азаюына ықпал еткен (Yahia, Yassine & Vagues et.al., 2019)[19]. Араб түбегінің халқы арасында *Calligonum* дәстүрлі түрде «Арта» атауымен белгілі және негізінен асқазан аурулары мен тіс ауруына қарсы табиғи ем ретінде қолданылады. *C. comosum* көптеген терапиялық қасиеттері, соның ішінде ойық жараға қарсы, қабынуға қарсы, антиоксиданттық және гипогликемиялық әсерлері, *in vivo* эксперименттік зерттеулерде дәлелденген. Сонымен қоса құрамында катехин, кверцетин және кемпферолды қоса алғанда, флавоноидтарға бай. Айта кету керек, әртүрлі еріткіштермен алынған экстракттар бауырдың гепатоцеллюлярлық карциномасына және гормонға тәуелді сүт безі қатерлі ісігінің MCF-7 жасушалық желісіне қарсы әртүрлі деңгейдегі ісікке қарсы әсер көрсетеді (Alehaideb Z et.al., 2020; Gurusamy DK et.al., 2010).

Фитохимиялық заттар бүйректе тас түзілуінің, гиперхолестеринемияның және колорек-

тальды карциноманың алдын алуда маңызды рөл атқарады. Әдеби деректерге шолу нәтижелері сапониндердің холестерин деңгейін төмендетуге және адамның жүрек-қантамыр ауруларын бақылауға ықпал ететінін көрсетеді. Дубильді заттар (таниндер) спермадағы тағамдық ақуыздарды микробиологиялық ыдыраудан қорғауды қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, өсімдікте фитохимиялық заттарды өндіретін жасушалар дамыған, олар қысқа қашықтықта (жергілікті деңгейде) және ұзақ қашықтықта (шектеулі аумақта жүйелік түрде) әсер етеді. Бұл жасушалар өсімдіктің қоректік заттарға бай ішкі өткізгіш (тамырлы) жүйесін қоршап тұрған сыртқы бөліктерінде орналасқан. Жергілікті химиялық қорғаныс өсімдік кесілген кезде бөлінетін фенолды идиобласттармен сипатталды. Ал жүйелік химиялық қорғаныс құрамында шамамен 50% бензальдегид туындысы (куминальдегид) бар улы ұшпа эфир майымен қамтамасыз етілді (Abulude FO et.al., 2010). Қосымша антиоксиданттардың мөлшері анықталды (Senthilkumar P et.al., 2010). Аталған май сүтқоректілер жасушаларына да, патогенді микроағзаларға да тікелей қосу немесе оның буларының жанама әсері арқылы күшті жойғыш әсер көрсетті. Өсімдікті кесіп, кептіргеннен кейін эфир майының мөлшері азайып, саңырауқұлақтардың өсуіне қолайлы жағдай қалыптасты. Қорғаныс механизмдерінің екеуінің де өсімдіктің сыртқы аймағында шоғырлануы қоректік заттарға бай ішкі өткізгіш жүйені қорғап, соның нәтижесінде өсімдіктің тіршілік ету қабілетін сақтауға мүмкіндік бергені байқалды. Қызықтысы, халықтық дәстүрлі медицинада қолданылуына байланысты жергілікті тұрғындар өсімдіктің тек жасыл бөліктерін және тек қыс мезгілінде пайдаланады, бұл кезеңде өсімдікте эфир майы мен фенолды идиобласттар болмайды. Сонымен қатар, бұл тәжірибе өсімдік шикізатын қолданудан туындауы мүмкін денсаулыққа қатысты мәселелерден сақтану жөніндегі жергілікті ұсыныстардың қалыптасуына негіз болған. Өсімдік қоршаған ортаның қатаң жағдайларында тіршілік етуге қабілетті және қуаң аймақтарда өздігінен өсе алатындықтан, ол құрғақшылық стрессімен қатар патогендер мен шөпқоректі жануарлардың шабуылына да ұшырайды. Осыған байланысты өсімдіктің тіршілігін сақтауға, сондай-ақ патогендердің енуі мен шөпқоректілердің зақымдауынан қорғауға мүмкіндік беретін маманданған статикалық өсімдік құрылымдарының немесе қозғалмалы фитохимиялық қорғаныс механизмдерінің бар-жоғы зерттелді.

Өсімдіктердің дәрілік қасиеттері олардың жоғары антиоксиданттық белсенділігімен, экономикалық тұрғыдан қолжетімділігімен және жанама әсерлерінің болмауымен байланысты бүкіл әлемде кеңінен зерттеліп келеді (Soliman S et.al., 2018). Өсімдік бөліктері еріткіштер көмегімен алынған екі түрлі экстракт түрінде талданды: метанолды экстракты (ССМЕ) және этилацетатты экстракты. Екі жағдайда да терапиялық маңызы бар әртүрлі екінші реттік метаболиттердің бар екені анықталды. Негізгі фитохимиялық заттардың қатарына флобатанниндер, сапониндер, флавоноидтар, терпеноидтар, жүрек гликозидтері және алкалоидтар жатқызылды (Cheruth, A.J., et.al., 2016).

*Calligonum alatum* өсімдігі эрозияға қарсы құмды, жел соғатын аймақтарда тамыры топырақты берік ұстап, құмның ұшып кетуін азайтады. Бұл әсіресе шөлді және жартылай шөлді аймақтарда құмды дюндарды тұрақтандыруда маңызды. Климатқа төзімділігі ретінде шөлдік жағдайларда, жоғары температура мен аз ылғалдылыққа төзімді. Бұл оны табиғи және жасанды құм бекіту жобаларына икемді етеді, биологиялық әртүрлілікті қолдайды, топырақтың қоректік құрамын жақсартады және шөлейт аймақтарда микроэкожүйелерді қалыптастырады, өсу ортасында аз күтімді қажет етеді және топырақтағы құмды бекітуге тиімді, сондықтан мал шаруашылығы және жер пайдалану жобаларында да қолданылады. *Calligonum alatum* құм бекітуші өсімдік ретінде өзектілігі жоғары, себебі ол шөлді аймақтарда топырақты эрозиядан қорғайды, экологиялық тұрақтылықты арттырады, құмның көшуін реттейді.

**Жұмыстың мақсаты:** Зерттеу объектісі *Calligonum alatum* өсімдігінің табиғи популяциясын іздестіру мақсатында 2025 жылдың көктем, жаз және күз мезгілінде Оңтүстік Балхаш аймағының шөлді зонасына экспедиция ұйымдастырылды. Ғылыми зерттеу жұмысы аясында перспективті *Calligonum alatum* өсімдігінің бірінші популяциясы маңынан теңіз деңгейінен 140 м абс. биіктік аралығынан табылды. GPS навигатор приборының көрсеткіші бойынша координаты: N 44°41'12.0", E 76°24'55.2" ш.б.

### Зерттеу материалдары мен әдістері

*Зерттеу материалы:* *Polygonaceae* тұқымдасына енетін, *Calligonum* L. туысының құмбекітуші және дәрілік қасиетке *Calligonum alatum* өсімдігі.

*Calligonum alatum* өсімдігінің анықталған популяциялардан гербарийлер жинап және оларды кептіру А.К. Скворцовтың әдісі негізінде жасалды (Скворцов А.К., 1977). Популяцияларда таралған өсімдіктерді анықтауда Қазақстан флорасы, Қазақстан өсімдіктерінің иллюстрациялық анықтағышы (Иллюстрированный определитель растений Казахстана 1972) кілттері қолданылды. Анықталған өсімдіктердің қазақша атауы С.А.Арыстанғалиевтің (2013ж) ботаникалық сөздіктерімен тексерілді (Арыстанғалиев С.А. 2013).

*Геоботаникалық зерттеу әдістері.* Зерттеу жүргізілген аймақтан табылған әр ценопопуляциядағы өсімдіктің жастық спектрін анықтау Ю.А.Злобин әдісімен жасалды (Злобин Ю.А. 1989)[29]. Жұмыс барысында жалпы (Nt), репродуктивтік (Nr), тиімді (Ne) сандық есептеулер жүргізілді. Ценопопуляцияның (ЦП) жастық құрылымы қалпына келтіру индекстері (Iv) негізінде анықтаулар жүргізіледі (Голубев В.Н. et.al., 1978). А.Работнов (Работнов Т.А. 1978), Ю.А.Злобин, Л.А.Животовский (Животовский Л.А. 2001) [32] әдістері бойынша зерттеу объектісінің ценопопуляция түрлері мен жіктелуі қолданылды. Таралу ортасының флоралық түрлік құрамы мен өсімдіктер жабыны анықталды (Полевая геоботаника 1976). Т.А.Работновтың (Работнов Т.А. 1960), А.А.Урановтың (Уранов А.А. 1967) әдістемелері негізінде бірінші популяция өсімдіктерінің тіршілік күйін анықталды және қосымша морфологиялық сиптамалары берілді. Зерттеу түрінің жастық құрамын анықтауда және бөліп қарастыруда Т.А.Работнов, А.А.Уранов әдістері қолданылды. Өсімдіктің ортаға бейімделуін деңгейінің жастық құрамын анықтауда 10x10 м<sup>2</sup> трансекталар салынды. Жүргізілген 1м<sup>2</sup> аудандағы түрдің дарактар санының жиілігімен популяцияның тығыздығы анықталады және бағаланады. Зерттелу аймағындағы өсімдіктің таралу нүктесі «GARMIN 60CSx» (Garmin Ltd., АҚШ) GPS навигаторының көмегімен координаттары анықталды.

### Зерттеу нәтижелері және оларды талдау

Ғылыми зерттеу жұмысы 2025 жылдың көктем, жаз және күз мезгілінің айларында жоспарланған. *Calligonum alatum* өсімдігінің өсу ортасына өсімдіктердің таралу деңгейі мен бейімделуі бойынша далалық және камералық бақылаулар, өлшеулер мен деректерді жинау жұмыстары толық көлемде жүзеге асырылды. Зерттеу мерзімі

табиғи жағдайлардың қолайлылығын және зерттелетін объектінің ортаға бейімделу деңгейінің ерекшеліктерін ескере отырып таңдалды.

Бірінші популяциясы Алматы облысы, Балқаш ауданы, Бақанас ауылынан 25 км қашықтықта, Іле өзенінен 500-700 м жетпейтін аймақта *Calligonum alatum* табылды. Өсімдіктің таралу ортасының топырағы құмды массив. Жер бедері толқынды-бұдырлы. Теңіз деңгейінен 145 м., Географиялық координаты (GPS бойынша) координаттары:

N44°41'12.0", E 76°24'55.2" ш.б.

Бірінші популяция бойынша *Calligonum alatum* өсімдігінің үш ценопопуляциясын анықтап олардың әрқайсысына геоботаникалық талдау жүйесі берілді. Өсу ортасы толқынды-бұдырлы құмды рельефпен сипатталады. Ассоциациясы терескен-жүзгін-әртүрлі шөпті қауымдастық құрамды. Өсімдіктің жабыны 40-45% мөлшерін құрайды. Ценопопуляцияның шекаралық бөлігі – жер көлемінің ұзындығы шамамен 450 – 550 м алып жатыр, ал ені шамамен 30 – 50 м аспайды, бірақ кей анықталған бөлігі 100 м дейін жетеді. Өсімдіктердің таралуына қарай 5 ярус анықталды.

Таралу аймағының флоралық құрамын *Populus diversifolia* Schrenk., *Elaeagnus oxycarpa* Schldt., *Calligonum alatum*, *Acacia dealbata* Link., *Descurainia sophia* (L.) Webb ex Prantl., *Artemisia scoparia* Waldst. & Kit., *Artemisia terrae-albae* Krasch., *Capsella bursa-pastoris* (L.) Medik., *Erodium cicutarium* (L.), *Glycyrrhiza glabra* L., *Kochia prostrata* Schrad., *Salsola paulsenii* Litw., *Krascheninnikovia ceratoides* (L.) Gueldenst., *Lappula semiglabra* (Ledeb.) Gürke., *Scorzonera tuberosa* Pall. өсімдіктері құрайды.

I ярус – *Populus diversifolia*, *Elaeagnus oxycarpa* енеді, биіктігі 250-350 см.

II ярусқа сүректі бұталы өсімдіктер қарына *Calligonum alatum*, *Acacia dealbata* енеді, биіктігі 100-120 см.

III ярусқа жартылай бұталы сүректі өсімдіктер қатарына *Artemisia terrae-albae*, *Kochia prostrata*, *Krascheninnikovia ceratoides* биіктігі 70-80 см.

IV ярусқа *Glycyrrhiza glabra*, *Scorzonera tuberosa*, *Descurainia sophia*, *Artemisia scoparia* *Salsola paulsenii* биіктігі 40-60 см.

V ярусқа *Capsella bursa-pastoris*, *Erodium cicutarium*, *Lappula semiglabra* Gürke. қатарына енеді, биіктігі 10-30 см.

Анықталған бірінші популяцияда зерттеу объектісі қатарына *Calligonum alatum* түрінің жастық спектрін анықтау барысында өлшемі 10 × 10 м<sup>2</sup> өлшемінде трансекта арнайы салынды (1 сурет). Трансектада өсімдіктердің онтогенетикалық күйі дараланды, дарақтардың жас топтары бойынша сандық үлесі есептелді. Әр салынған трансектада кездескен зерттеу объектісінің өсімдігінің жастық құрамын анықтауда өсімдіктің онтогенезі зерттелді, мұнда тұқымның өнгіштігінен сенильдік кезеңге дейінгі дарақтарының саны айқындалды.

Бірінші ценопопуляцияның онтогенетикалық құрылымын бағалау мақсатында екі трансекта бойынша жастық күйлердің сандық көрсеткіштеріне статистикалық талдау жүргізілді. Талдау барысында әрбір онтогенетикалық топтағы дарақтар саны салыстырылып, популяцияның құрылымдық ерекшеліктері анықталды. Жүргізілген нәтижелерге сәйкес, екі трансектада да дарақтардың негізгі бөлігі ретінде виргинильді және репродуктивті кезеңдерге тиесілі екені байқалады. Виргинильді кезеңде (P–V) трансекта

57 дарақтар саны анықталды, ал трансекта 45 дарақты құрады. Бұл көрсеткіштер популяцияның белсенді өсіп-даму сатысында екенін көрсетеді. Репродуктивті жастық кезеңде (G1–G3) трансекта 24 дарақ, ал екінші трансекта 19 дарақ тіркелді. Жас және толық жетілген генеративтік дарақтардың (G1, G2) басым болуы популяцияның тұрақты жаңарып отыру қабілетінің жоғары екенін дәлелдейді. Қартайған генеративтік дарақтардың (G3) санының аз болуы популяцияда регрессивті үрдістердің әлсіз екенін көрсетуі мүмкін.

Сенильді кезеңдегі (Ss, Se) дарақтар саны екі трансектада да төмен деңгейде (2–3 дарақ) анықталды, бұл популяцияның қартаю деңгейінің төмен екенін және онтогенетикалық құрылымының оңтайлы екенін сипаттайды. Бірінші және екінші трансекта арасындағы өсімдік дарақтарының айырмашылықтар сандық тұрғыдан байқалғанымен, жастық күйлердің жалпы құрылымдық үлгісі ұқсас болып келеді. Бұл жағдай ценопопуляцияның салыстырмалы түрде біртекті экологиялық жағдайларда қалыптасқанын және тұрақты даму сатысында екенін көрсетеді. Жалпы алғанда, алынған статистикалық деректерге сүйенетін болсақ, бірінші ценопопуляциясында зерттеу объектісі биологиялық тұрғыдан тұрақты және өзін-өзі сақтауға қабілетті популяция екенін дәлелдейді.

**1-сурет**

*Calligonum alatum* табиғаттағы көрінісі



Алынған нәтижелер өскіндер мен ювенильдік жастық күйге тән сандық көрсеткіштердің жеткілікті дәрежеде нақты әрі сенімді екенін көрсетеді. Ал жастық күйлердің өзге сатылары бойынша анықталған сандық мәндерде белгілі бір деңгейде ауытқулардың болуы мүмкін. Бұл, ең алдымен, зерттеліп отырған өсімдіктердің тамырсабақты морфо-биологиялық ерекшеліктерімен және олардың вегетативті көбею қабілетінің жоғары болуымен түсіндіріледі. Вегетативті көбею нәтижесінде өсімдіктер кең аумақты қамтитын ірі клондық шоғырлар түзеді, соған байланысты мұндай қопаларда жеке аналық дарактардың нақты санын айқындау едәуір қиындық тудырады.

Жалпы алғанда, бірінші ценопопуляцияның бірінші трансектасында тіркелген жастық құрылым өскіндер мен прегенеративтік дарактардың басымдығымен сипатталады, бұл популяцияда табиғи жаңару үдерісінің белсенді жүріп жатқанын және оның экологиялық тұрақтылығының жоғары деңгейін көрсетеді. Генеративтік жастағы дарактардың жеткілікті болуы репродуктивтік әлеуеттің сақталғанын дәлелдесе, ал субсенильдік және сенильдік дарактардың аз мөлшерде кездесуі популяцияның қартаю сатысына өтпегенін және оның прогрессивті типтегі, тұрақты ценопопуляция екенін айқындайды.

Екінші ценопопуляцияда шығыс – оңтүстік белдеуінен анықталды. Теңіз деңгейінен биіктігі 140 м. GPS навигатордың берілген координаты: N44°41'16.0", E 76°24'92.4" ш.б. алып жатыр. Жер бедері тегіс емес, қыратты аймақ болып есептеледі. Өсімдіктер жабыны жүзгін-ебелек-әртүрлі шөпті ассоциациядан тұрады. Өсімдіктер қауымдастығы 60% көмкерілгені байқалды. Топырағы құмды қиыршықты. Ценопопуляцияның алып жатқан жер көлемінің ұзындығы шамамен 350 – 400м, ал ені 35 – 50 м арасындағы аралықты алып жатыр.

Өсімдіктер жабыны 4 ярусты анық көрсете білді. Жалпы таралған өсімдіктер құрамы *Calligonum alatum*, *Descurainia sophia*, *Artemisia scoparia* Waldst. & Kit., *Artemisia songarica* Schrenk, *Cousinia dissecta* Kar. et Kir., *Onopordum acanthium* L. *Aristida heymannii* Regel, *Artemisia terrae-albae* Krasch., *Limonium gmelinii*, *Erodium cicutarium* (L.), *Ephedra distachya* L., *Diarthron vesiculosum* (Fisch. et Mey. ex Kar. et Kir) C.A. Mey. *Glycyrrhiza glabra* L., *Kochia scoparia* (L.) Schrad., *Goniolimon callicomum* (C.A. Mey.) Boiss. *Salsola orientalis* S.G. Gmel., *Nonea caspica* (Willd.) G. Don., *Helichrysum arenarium* (L.) Moench., *Ceratocarpus arenarius* өсімдіктері құрайды.

**1-кесте**

*Calligonum alatum* өсімдігінің бірінші ценопопуляциясының жастық спектрі

Кезең	Жастық жағдайлары	Ценопопуляция 1	
		Трансекта 1	Трансекта 2
Латентті (алғашқы тыныштық күйі) (Se)	Тұқым	-	-
	Өскіндер (P)	13	11
	Ювенильдік (J)	14	11
Виргинильді	Имматурлық (Im)	16	12
	Виргинильдік (V)	14	11
	Жас генеративтік (G1)	11	9
Репродуктивті	Толық жетілген генеративтік (G2)	11	9
	Қартайған генеративтік (G3)	2	1
	Субсенильдік (Ss)	1	2
Сенильді (қартайған, репродуктивті емес)	Сенильдік (Se)	1	1

I ярус – сүректі бұталы өсімдіктер қарына *Calligonum alatum*, *Ephedra distachya*, *Onopordum acanthium* L. енеді, биіктігі 100-120см.

II ярусқа жартылай бұталы сүректі өсімдіктер қатарына *Artemisia terrae-albae*, *Artemisia scoparia*, *Artemisia songarica*, *Kochia prostrata*, *Cousinia dissecta*, *Salsola orientalis*, *Kochia scoparia* 70-80 см.

III ярусқа *Glycyrrhiza glabra*, *Scorzonera tuberosa*, *Limonium gmelinii* *Descurainia sophia*, *Goniolimon callicomum*, *Artemisia scoparia*, *Salsola paulsenii*, *Helichrysum arenarium*, *Diarthron vesiculosum*, *Erodium cicutarium*, *Aristida heymannii* 40-60 см.

IV ярусқа *Nonea capsica*, *Ceratocarpus arenarius*, *Capsella bursa-pastoris*, *Erodium cicutarium* қатарына енеді, биіктігі 10-30 см.

Екінші популяцияның қауымдастық құрамын *Ceratocarpus arenarius* өсімдік түрлерінің кілемше секілді төселіп өсетіндігі байқалды. Субдоминант ретінде *Ceratocarpus arenarius* *Artemisia terrae-albae*, *Artemisia scoparia* байқалды, ал саны жағынан салыстырмалы түрде аз көрсеткіш көрсеткен *Nonea capsica* өсімдігі байқалды. Ценопопуляцияның құрылымынан *Calligonum alatum* өсімдігінің жастық спекторын анықтау барысында 10 x 10 м<sup>2</sup> көлемді аймақта бірінші трансекта салынды. Бірінші трансекта ішінен *Calligonum alatum* өсімдігінің 13 өскінін, 11 ювенильдік, 9 имматурлық, 8 виргинильдік, 11 жас генеративтік, 9 толық жетілген генеративтік, 2 қартайған генеративтік, 2 субсенильдік, 3 сенильдік, жастық күйінің көрсеткіштері анықталды (кесте

2). Бұл өте жоғары көрсеткіш екендігін көрсетті.

Екінші трансекта көлемінде *Calligonum alatum* популяциясының жастық құрылымы кешенді түрде бағаланды. Зерттеу нәтижесінде 11 өскін, 10 ювенильдік, 7 виргинильдік, 6 имматурлық, 7 жас генеративтік, 8 толық жетілген генеративтік, 3 қартайған генеративтік, 3 субсенильдік және 3 сенильдік дарақ анықталды (кесте 2). Алынған деректер популяцияның жастық спектрінің толық және біршама теңгерімді екендігін көрсетеді. Өскіндер, ювенильдік және виргинильдік дарақтардың салыстырмалы түрде жоғары үлесі популяцияда табиғи жанару үдерісінің белсенді жүріп жатқанын және түрдің экологиялық жағдайларға бейімделу қабілетінің жоғары екенін дәлелдейді. Генеративтік жастағы дарақтардың едәуір саны популяцияның репродуктивтік әлеуетінің жоғары деңгейде сақталғанын, яғни тұқым арқылы көбею мүмкіндігінің жеткілікті екенін көрсетеді. Ал субсенильдік және сенильдік дарақтардың аз мөлшерде болуы популяцияда қартаю үдерісінің баяу жүретінін және жастық құрамының «жасартылған» типке жақын екенін сипаттайды.

Зерттеу екі трансектаны қамтып жүргізілді, олардың барысында зерттеу объектісінің даму қарқындылығы субсенильдік және сенильдік дарақтарда айтарлықтай төмендегені анықталды. Бірінші популяцияда жастық спектрді бағалау және сипаттау мақсатында Т.А. Работнов пен А.А. Уранов әдісі қолданылды, ол ценопопуляциядағы дарақтардың жас кезеңдерін сандық және сапалық түрде анықтауға мүмкіндік бере-

ді. Бұл әдіс өсімдіктерді өскіндік, ювенильдік, имматурлық, виргинильдік, генеративтік, субсенильдік және сенильдік жастық топтарға бө-

луге негізделген және әр топтың популяциядағы үлесін сандық көрсеткіштер арқылы бағалауға мүмкіндік береді.

## 2-кесте

Трансекта көлемінде *Calligonum alatum* өсімдігінің екінші ценопопуляциясының жастық спектрі

Кезең	Жастық жағдайлары	Ценопопуляция 2	
		Трансекта 1	Трансекта 2
Латентті (алғашқы тыныштық күйі) (Se)	Тұқым	-	-
	Өскіндер (P)	13	11
Виргинильді	Ювенильдік (J)	11	10
	Имматурлық (Im)	9	6
	Виргинильдік (V)	8	7
Репродуктивті	Жас генеративтік (G1)	11	7
	Толық жетілген генеративтік (G2)	9	8
	Қартайған генеративтік (G3)	2	3
Сенильді (қартайған, репродуктивті емес)	Субсенильдік (Ss)	2	3
	Сенильдік (Se)	3	3

Екінші ценопопуляция шеңберінде салынған екі трансектаның онтогенетикалық құрылымындағы айырмашылықтарды анықтау мақсатында Стьюденттің t-критерийі қолданылды. Әрбір трансекта бойынша онтогенетикалық жастық күйлерінің дарақтар саны сандық көрсеткіш ретінде нақты алынды, тәуелсіз екі таңдама ретінде қарастырылды. Алынған мәліметтерге сүйене отырып, зерттеу объектісінің жас құрылымы кеңінен сипатталды: субсенильдік және сенильдік дарақтардың төмен

саны популяцияның қартаю кезеңінің шектеулі екенін, ал өскіндер мен ювенильдік дарақтардың басымдығы табиғи жаңару үдерісінің белсенді екенін көрсетті. Мұндай бағалау ценопопуляцияның даму динамикасын және экологиялық тұрақтылығын нақты анықтауға мүмкіндік берді.

Зерттеу барысында ценопопуляциялар арасындағы жастық құрылым көрсеткіштерінің айырмашылықтарын анықтау үшін Стьюдент t-критерийі қолданылды.

## 3-кесте

Ценопопуляциялардың жастық құрылым бойынша көрсеткіштері

Көрсеткіш	Ценопопуляция 1 (M ± m)	Ценопопуляция 2 (M ± m)	t	p	Маңыздылық
Жастық жағдайы	9,33 ± 1,85	7,78 ± 1,25	2,58	0,021	p < 0,05

Жүргізілген зерттеуде *Calligonum alatum* өсімдігінің өсу қарқындылығының сандық көрсеткіші бойынша айырмашылықтардың статистикалық маңыздылығы Стьюдент t-критерийі арқылы бағаланды. Белгіленген  $p < 0,05$  деңгейі статистикалық маңызды деп қабылданды. Ценопопуляция 1 мен ценопопуляция 2 арасындағы салыстырмалы талдау нәтижесінде статистикалық түрғыдан ( $t = 2,58$ ;  $p = 0,021$ ) айырмашылық

анықталды. Алынған p-мәні 0,05 маңыздылық деңгейінен төмен, ол екі ценопопуляцияның жастық құрылымының бірдей емес екенін және олардың өсу қарқындылығы аралығында айырмашылықтар орын алады (3 кесте).

Атап айтқанда, мұндай айырмашылық популяциялардың онтогенетикалық спектрінің қалыптасу ерекшеліктерімен, тіршілік ету ортасының экологиялық жағдайларымен және түр-

дің көбею стратегиясымен байланысты болуы мүмкін. Сонымен қатар, алынған нәтижелер ценопопуляциялардың кеңістіктік-экологиялық факторларға әртүрлі деңгейде бейімделгенін көрсетіп, олардың құрылымдық тұрақтылығы мен динамикасының аралығында ауытқулардың болуы анықталды.

Жалпы алғанда, зерттелген *Calligonum alatum* популяциясы геоботаникалық тұрғыдан тұрақты, өзін-өзі сақтауға және ұзақ мерзімді перспективада тұрақты дамуға қабілетті, прогрессивті типтегі популяция ретінде бағаланады. Трансекта көлемінде *Calligonum alatum* популяциясының жастық құрылымы кешенді түрде бағаланды. Алынған деректер популяцияның жастық спектрінің толық және біршама теңгерімді екендігін көрсетеді. Өскіндер, ювенильдік және виргинильдік дарактардың салыстырмалы түрде жоғары үлесі популяцияда табиғи жаңару үдерісінің белсенді жүріп жатқанын және түрдің экологиялық жағдайларға бейімделу қабілетінің жоғары екенін дәлелдейді. Генеративтік жастағы дарактардың едәуір саны популяцияның репродуктивтік әлеуетінің жоғары деңгейде сақталғанын, яғни тұқым арқылы көбею мүмкіндігінің жеткілікті екенін көрсетеді. Ал субсенильдік және сенильдік дарактардың аз мөлшерде болуы популяцияда қартаю үдерісінің баяу жүретінін және жастық құрамының жасару кезеңіне жақын екенін сипаттайды. Жалпы алғанда, зерттелген *Calligonum alatum* популяциясы геоботаникалық тұрғыдан тұрақты, өзін-өзі сақтауға және ұзақ мерзімді перспективада тұрақты дамуға қабілетті, прогрессивті типтегі популяция ретінде бағаланады.

Шөлейтті амақтың *Calligonum alatum* сияқты ксерофит түрлердің құрғақшылыққа бейімделу қабілеті олардың экологиялық тұрақтылығын қамтамасыз ететін негізгі факторлардың бірі болып табылады. Мұндай өсімдіктер аридті орта жағдайында ылғал тапшылығына морфо-физиологиялық және анатомиялық бейімделулер арқылы төзімділік көрсетеді. Вегетативті мүшелері тамыр жүйесінің күшті дамуы арқылы топырақтың терең қабаттарындағы ылғалды сіңіру қабілеті жоғарылайды, ал жапырақтың редуцияланған формаға ауысуы транспирациялық судың жоғалуын азайтады, ол ортаға бейімділу деңгейінің төзімділігін ашып көрсетеді. Физиологиялық деңгейде зерттеу объектісінің клеткалық деңгейде осмореттегіш қосылыстардың жиналуы арқылы су тапшылығы жағдайында тургорлық қысымды сақтайды. Аталған өсім-

діктің ортаға бейімделуіне қатар ұзақ уақыттық құрғақшылық кезеңдеріне төзімділігін арттырады, шөл және шөлейт экожүйелерінде тіршілік етуіне мүмкіндік береді. Алынған нәтижелер негізінде зерттеу жүргізілген сәтте *Calligonum alatum* популяциясының тұрақты күй белгілерінің бар екендігін констатациялауға болады. Сонымен қатар, популяция типін прогрессивті ретінде интерпретациялау және оның ұзақ мерзімді тұрақтылығы туралы қорытындылар вегетациялық маусым деректеріне негізделген.

Зерттеу нәтижесінде бірінші популяцияның дарактардың онтогенетикалық құрылымы талданды. Алынған мәліметтер популяцияның жастық спектрінде жас және виргинильді сатылардың басым екенін көрсетті.

*Calligonum alatum* өсімдігінің екі ценопопуляциясына трансекталар жүргізілді. Алынған нәтижелерге сәйкес, таралу ортасы Іле өзенінің жағалауына шамамен 500–700 м қашықтықта орналасқан, ал солтүстік-батыс бөлігінде ауылдық жерлерге су жеткізетін қолдан жасалған каналға 200–300 м жетпей орналасқандығы анықталды. Популяцияны онтогенездік құрылымы бойынша талдау барысында өскіннен бастап, барлық жастық сатылар кездесті: ювенильдік, имматурлық, виргинильдік, генеративтік және сенильдік. Өсімдіктің генеративтік мүшелері толық қалыптасқан, жыл сайынғы гүлдену процесі тұрақты байқалады, бұл жеміс беру қарқындылығының жоғары екенін дәлелдейді.

Дегенмен, зерттелген аймақ мал жайылатын аумаққа жататындықтан тікелей қауіптің барлығы байқалмаса да, келешекте популяцияның сандық көрсеткішінің төмендеуі мүмкін деп бағаланады. Таралу аймағының салыстырмалы түрде аз болуы да өсімдіктің тұрақтылығына белгілі бір шектеу қояды. Қауіптің негізгі факторының бірі, ол малдың жайылуы және антропогендік әсерлер. Сонымен қатар, рекреациялық белсенділік, мысалы, өрттің туындауы немесе демалушылардың іс-әрекеттері, популяцияның тез арада зақымдануына және жойылуына әкелуі ықтимал. Жайылымдық аймақта өскіндердің қалыптасуына және дамуына кедергі келуі мүмкін, бұл популяцияның санының азаюына әсер етуі ықтимал. Айта кету керек, *Calligonum alatum* өсімдігі ерекше экологиялық қасиетке ие, ол құмды бекіту функциясын атқарады. Қазіргі таңда құмның көшу процесі Қазақстанның экологиялық маңызды мәселелерінің бірі болып отыр. Осыған байланысты, осы түрдің өсімдігін сақтау және зерттеу мақсатында, өсу ортасының

климаттық жағдайы сәйкес келетін Балқаш ауданының орталығындағы Бақанас елді мекеніндегі Іле экспериментальдық ботаникалық бағында интродукцияға енгізу ұсынылады. Бұл шара популяцияның тұрақтылығын қамтамасыз етуге және құмды бекіту қызметін күшейтуге мүмкіндік береді.

### **Авторлардың үлесі**

*Мылтыкбаева А.Б.: геоботаникалық талдау жүргізу, өсімдіктің өсу ортасын анықтау, әдістеме әзірлеу, зерттеу жүргізу, тұжырымдама жасау, мақаланың бастапқы нұсқасын жазу, мәтінді редакциялау және толықтыру; Нурмаханова А.С.: геоботаникалық талдау жүргізу, өсімдіктің ортасын анықтау, бақылау, нәтижелерді тексеру, геоботаникалық талдау жүргізу, мәтінді редакциялау және толықтыру; Атабаева С.Д.: деректер қорымен жұмыстар жүргізу, нәтижелерді тексеру, мәтінді редакциялау және толықтыру; Алдасугурова Ш.Ж.: геоботаникалық талдау жүргізу, өсімдіктің өсу ортасын анықтау, өсімдік түрін анықтау, әдістеме әзірлеу, зерттеу жүргізу, Дюсебаева М.А.: өңдеу жұмыстарын жүргізу; Нармуратова М.К.: мәтінді редакциялау және толықтыру; Муратбаева А.С.: геоботаникалық талдау жүргізу, өсімдіктің таралу ортасын анықтау, әдістеме, өсімдік түрін анықтау; Турайлова Ш.: геоботаникалық талдау жүргізу, өсімдіктің өсу ортасын анықтау, әдістеме әзірлеу, зерттеу жүргізу, өсімдік түрін анықтау; Ошақбай Ү.К.: геоботаникалық талдау жүргізу, нәтижелерді тексеру, өсімдік түрін анықтау.*

*гізу, мәтінді редакциялау және толықтыру; Атабаева С.Д.: деректер қорымен жұмыстар жүргізу, нәтижелерді тексеру, мәтінді редакциялау және толықтыру; Алдасугурова Ш.Ж.: геоботаникалық талдау жүргізу, өсімдіктің өсу ортасын анықтау, өсімдік түрін анықтау, әдістеме әзірлеу, зерттеу жүргізу, Дюсебаева М.А.: өңдеу жұмыстарын жүргізу; Нармуратова М.К.: мәтінді редакциялау және толықтыру; Муратбаева А.С.: геоботаникалық талдау жүргізу, өсімдіктің таралу ортасын анықтау, әдістеме, өсімдік түрін анықтау; Турайлова Ш.: геоботаникалық талдау жүргізу, өсімдіктің өсу ортасын анықтау, әдістеме әзірлеу, зерттеу жүргізу, өсімдік түрін анықтау; Ошақбай Ү.К.: геоботаникалық талдау жүргізу, нәтижелерді тексеру, өсімдік түрін анықтау.*

### **Әдебиеттер**

- Abulude FO, Ogunkoya MO, Akinjagunla YS, Phytochemical Screening of Leaves and Stem of Cashew Tree (*Anacardium occidentale*), *EJEAF* Che, 9, 2010, 815-819 [https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2843818&utm\\_source=chatgpt.com](https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2843818&utm_source=chatgpt.com)
- Alehaideb Z, AlGhamdi S, Yahya WB, et al. Anti-Proliferative and Pro-Apoptotic Effects of *Calligonum comosum* (L'Her.) Methanolic Extract in Human Triple-Negative MDA-MB-231 Breast Cancer Cells. *Journal of Evidence-Based Integrative Medicine*. 2020;25. doi:10.1177/2515690X20978391 <https://doi.org/10.1177/2515690X20978391>
- Arystangaliyev, S. A. (2013). Qazaqstan osimdikteri atalarynyn qazaqsha-orysssha-latynsha sozdigi [Kazakh–Russian–Latin dictionary of plant names of Kazakhstan]. Kokshetau. (in Kazakh);
- Bannour M, Lachenmeier DW, Straub I, Kohl-Himmelseher M, Khadhri A, Aschi-Smiti S, Kuballa T, Belgacem H. Evaluation of *Calligonum azel* Maire, a North African desert plant, for its nutritional potential as a sustainable food and feed. *Food Res Int*. 2016 Nov;89 <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.09.004>
- Brys R., Jacquemyn H., Endels P., Hermy M., De Blust G. The relationship between reproductive success and demography structure in remnant populations of *Primula veris* // *Acta Oecologia*. – 2003. – №24. – P.247-253. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2003.09.002>
- Cheruth, A.J., Al Naqbi, K.M.A., El-Kaabi, A.A.A.S. et al. In vitro antioxidant activities and screening of phytochemicals from methanolic and ethyl acetate extracts of *Calligonum comosum* L'Her. *Orient Pharm Exp Med* 16, 209–215 (2016). <https://doi.org/10.1007/s13596-016-0232-z>
- Golubev, V. N., & Molchanov, E. F. (1978). Metodicheskie ukazaniya k populyatsionno-kolichestvennomu i ekologo-biologicheskomu izucheniyu redkikh, ischezayushchikh i endemichnykh rastenii Kryma [Methodological guidelines for population-quantitative and ecological-biological study of rare, endangered and endemic plants of Crimea]. Yalta: Izdatel'stvo Nikitskogo botanicheskogo sada. (in Russian)
- Gurusamy DK, Saranya P, In vitro Antioxidant Potential of Ethanolic Contents of *Eclipta alba* and *Wedelia chinensis*, *Journal of Pharmacy Research*, 3, 2010, 2825-2827 <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?doi=822c55487975520f1f2399c765c779855f336ffd>
- Iyustrirovannyi opredelitel' rastenii Kazakhstana [Illustrated guide to plants of Kazakhstan]. (1972). Alma-Ata: Nauka, KazSSR. Vol. 2, p. 125. (in Russian)
- Jacquemyn H., Brys R., Hermy M. Patch occupancy, population size and reproductive success of a forest herb (*Primula elatior*) in a fragmented landscape // *Oecologia*. – 2002 b. – №130. – P.617-625. <https://doi.org/10.1007/s00442-001-0833-0>
- Jacquemyn H., Brys R., Van Rossum F., Endels P., Triest L., De Blust G., Hermy M. Behoud van Zeldzame plantensoorten in kleine landschapselementen: sleutelbloemen als voorbeeldsoorten // *Natuur Focus*. – 2002 a. – №1. – P.19-24. [https://www.natuurpunt.be/publicaties/natuurfocus-2002-1-behoud-van-zeldzame-plantensoorten-in-kleine-landschapselementen?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.natuurpunt.be/publicaties/natuurfocus-2002-1-behoud-van-zeldzame-plantensoorten-in-kleine-landschapselementen?utm_source=chatgpt.com)
- Jacquemyn H., Van Rossum F., Brys R., Endels P., Hermy M., Triest L., De Blust G. Effects of agricultural land use and fragmentation on genetics, demography and population persistence of the rare *Primula vulgaris*, and implications for conservation // *Belgian Journal of Botany*. – 2003. – №136. – P.2-22. <https://hdl.handle.net/10067/1461360151162165141>

Kery M., Matthies D., Spillmann H.H. Reduced fecundity and offspring performance in small populations of the declining grassland plants *Primula veris* and *Gentiana lutea* // *Journal of Ecology*. – 2000. – №88. – P.17-30. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2000.00422.x>

Liu XM, Zakaria MN, Islam MW, Radhakrishnan R, Ismail A, Chen HB, Chan K, Al-Attas A. Anti-inflammatory and anti-ulcer activity of *Calligonum comosum* in rats. *Fitoterapia*. 2001 Jun;72(5):487-91. doi: 10.1016/s0367-326x(01)00271-4. PMID: 11429240. [https://doi.org/10.1016/S0367-326X\(01\)00271-4](https://doi.org/10.1016/S0367-326X(01)00271-4)

Mao ZM, Pan BR. The classification and distribution of the genus *Calligonum* L. in China. *Acta Phytotaxonomica Sinica*. 1986;24(2):98–107. [https://www.jse.ac.cn/EN/Y1986/V24/I2/98?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.jse.ac.cn/EN/Y1986/V24/I2/98?utm_source=chatgpt.com)

Pavlov, N. V. (1961). *Flora Kazakhstana*. Vol. 5. Alma-Ata: Izdatel'stvo Akademii nauk Kazakhskoi SSR. (in Russian)

Polevaya geobotanika [Field geobotany]. (1959–1976). Moscow–Leningrad: Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR. Vols. 1, 3, 4, 5. (in Russian)

Rabotnov, T. A. (1960). Metody izucheniya semennogo vozobnovleniya travyanistykh rastenii v soobshchestvakh. In *Polevaya geobotanika* (Vol. 2, pp. 20–40). Moscow–Leningrad.

Rabotnov, T. A. (1978). Struktura i metody izucheniya tsenopopulyatsii mnogoletnikh travyanistykh rastenii. *Ekologiya*, 2, 5–13. (in Russian)

Ren, Jun & Tao, Ling & Liu, Xin-Min. (2002). Effect of sand burial depth on seed germination and seedling emergence of *Calligonum* L. species. *Journal of Arid Environments*. 51. 603–611. 10.1006/jare.2001.0979. <https://doi.org/10.1006/jare.2001.0979>

Senthilkumar P, Sudha S, Stella C, Antioxidant properties of methanolic extract of *Dictyota batresiana* from south east coast of India, *Journal of Pharmacy Research*, 3,2010, 2974-2976 <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?doi=822c55487975520f1f2399c765c779855f336fffd>

Skvortsov, A. K. (1977). *Gerbarii: Posobie po metodike i tekhnike* [Herbarium: Manual of methods and techniques]. Moscow: Nauka. (in Russian)

Soliman S, Mohammad MG, El-Keblawy AA, Omar H, Abouleish M, Madkour M, et al. (2018) Mechanical and phytochemical protection mechanisms of *Calligonum comosum* in arid deserts. *PLoS ONE* 13(2): e0192576. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192576>

Song F, Li T, Burgess KS, Feng Y, Ge XJ. Complete plastome sequencing resolves taxonomic relationships among species of *Calligonum* L. (Polygonaceae) in China. *BMC Plant Biol*. 2020 Jun 8;20(1):261. doi: 10.1186/s12870-020-02466-5. PMID: 32513105; PMCID: PMC7282103. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02466-5>

Uranov, A. A. (1967). Ontogenez i vozrastnoi sostav populyatsii. In *Ontogenez i vozrastnoi sostav populyatsii tsvetkovykh rastenii* (pp. 1–12). Moscow. (in Russian)

Vasila Sharipova, Nodira Rakhimova, Tashkhanim Rakhimova, Zhasur Sadinov Current state of mixed-*Calligonum* (*Calligonum* L.) type of pastures in North-Western Kyzylkum (Uzbekistan) E3S Web of Conf. Vol.537 (2024) Pp.15-<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453703002>

Yahia, Yassine & Bagues, Mohamed & Zaghdoud, Chokri & Al-Amri, S.M. & Nagaz, Kamel & Guerfel, Mokhtar. (2019). Phenolic profile, antioxidant capacity and antimicrobial activity of *Calligonum arich* L., desert endemic plant in Tunisia. *South African Journal of Botany*. 124. 414-419. 10.1016/j.sajb.2019.06.005. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.06.005>

Young A., Boyle T., Brown T. The population genetic consequences of habitat fragmentation for plants // *Trends in Ecology & Evolution*. – 1996. – Vol.11. – P. 413-418. [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(96\)10045-8](https://doi.org/10.1016/0169-5347(96)10045-8)

Zhivotovskii, L. A. (2001). Ontogeneticheskoe sostoyanie, effektivnaya plotnost' i klassifikatsii populyatsii. *Ekologiya*, 1, 3–7. (in Russian)

Zlobin, Yu. A. (1989). *Printsipy i metody izucheniya tsenoticheskikh populyatsii rastenii* [Principles and methods of studying coenotic plant populations]. Kazan: Izdatel'stvo Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta. (in Russian)

#### **Авторлар туралы мәлімет:**

Мылтыкбаева Асия Байбековна – Геоботаника мамандығы бойынша 2-курс докторанты, Биология және биотехнология факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: [assiya\\_t87@mail.ru](mailto:assiya_t87@mail.ru)).

Нурмаханова Акмарал Садыковна – PhD., қауым.профессор, Биология және биотехнология факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: [aktmaral.nurmahanova@gmail.com](mailto:aktmaral.nurmahanova@gmail.com)).

Атабаева Сауле Джумагалиевна – б.ғ.д., профессор, Биология және биотехнология факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: [sauleat@yandex.ru](mailto:sauleat@yandex.ru)).

Алдасугурова Шынарғұл Жакыповна – PhD., Биология және биотехнология факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: [aldasyurova.chinar.77@gmail.com](mailto:aldasyurova.chinar.77@gmail.com)).

Дюсебаева Мольдыр Акимжановна – х.ғ.к, қауым.профессор, Химия және химиялық технологиялар факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: [Moldyr.Dyusebaeva@kaznu.edu.kz](mailto:Moldyr.Dyusebaeva@kaznu.edu.kz)).

Нармуратова Мейрамкуль Худретовна – б.ғ.к. қауым.профессор, Биология және биотехнология факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: [Meuramkul.Narmuratova@kaznu.edu.kz](mailto:Meuramkul.Narmuratova@kaznu.edu.kz)).

Муратбаева Айтолқын Санибаевна – Геоботаника мамандығы бойынша 2-курс докторанты, Биология және биотехнология факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: [Ms.moon16@mail.ru](mailto:Ms.moon16@mail.ru)).

Турайлова Шадийям Алимжановна – Геоботаника мамандығы бойынша 1-курс докторанты, Биология және биотехнология факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: shadiiyamt@gmail.com).

Ошақбай Үміт Кунтуғанқызы – Геоботаника мамандығы бойынша 1-курс докторанты, Биология және биотехнология факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: umitoshakbay@gmail.com).

**Information about the authors:**

Mylytkbaeva Assiya Baibekovna – 2nd-year PhD student in Geobotany, Faculty of Biology and Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: assiya\_m87@mail.ru).

Nurmakhanova Akmaral Sadykovna – PhD, Associate Professor, Faculty of Biology and Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: akmaral.nurmahanova@gmail.com).

Atabayeva Saule Dzhumagalievna – Doctor of Biological Sciences, Professor, Faculty of Biology and Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: sauleat@yandex.ru).

Aldasugurova Shynargul Zhakypovna – PhD, Faculty of Biology and Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: aldasygyrova.chinar.77@gmail.com).

Dyusebayeva Moldyr Akimzhanovna – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Faculty of Chemistry and Chemical Technology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: Moldyr.Dyusebaeva@kaznu.edu.kz).

Narmuratova Meiramkul Khudretovna – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Faculty of Biology and Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: Meyramkul.Narmuratova@kaznu.edu.kz).

Muratbayeva Aitolkyn Sandibayevna – 2nd-year PhD student in Geobotany, Faculty of Biology and Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: Ms.moon16@mail.ru).

Turailova Shadiiyam Alimzhanovna – 1st-year PhD student in Geobotany, Faculty of Biology and Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: shadiiyamt@gmail.com).

Oshakbai Umit Kuntugankyzy – 1st-year PhD student in Geobotany, Faculty of Biology and Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: umitoshakbay@gmail.com).

**Сведения об авторах:**

Мылтыкбаева Асия Байбековна – докторант 2-курса по специальности «Геоботаника», факультет биологии и биотехнологии, Казахский национальный университет имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: assiya\_m87@mail.ru).

Нурмаханова Акмарал Садыковна – PhD, ассоциированный профессор, факультет биологии и биотехнологии, Казахский национальный университет имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: akmaral.nurmahanova@gmail.com).

Атабаева Сауле Джумагалиевна – доктор биологических наук, профессор, факультет биологии и биотехнологии, Казахский национальный университет имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: sauleat@yandex.ru).

Алдасугурова Шынаркуль Жакыпқызы – PhD, факультет биологии и биотехнологии, Казахский национальный университет имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: aldasygyrova.chinar.77@gmail.com).

Дюсебаева Мольдыр Акимжановна – кандидат химических наук, ассоциированный профессор, факультет химии и химической технологии, Казахский национальный университет имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: Moldyr.Dyusebaeva@kaznu.edu.kz).

Нармуратова Мейрамкуль Худретовна – кандидат биологических наук, ассоциированный профессор, факультет биологии и биотехнологии, Казахский национальный университет имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: Meyramkul.Narmuratova@kaznu.edu.kz).

Муратбаева Айтөлкын Сандибаевна – докторант 2-курса по специальности «Геоботаника», факультет биологии и биотехнологии, Казахский национальный университет имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: Ms.moon16@mail.ru).

Турайлова Шадийям Алимжановна – докторант 1-курса по специальности «Геоботаника», факультет биологии и биотехнологии, Казахский национальный университет имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: shadiiyamt@gmail.com).

Ошақбай Үміт Кунтуғанқызы – докторант 1-курса по специальности «Геоботаника», факультет биологии и биотехнологии, Казахский национальный университет имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: umitoshakbay@gmail.com).

Келіп түсті: 12 желтоқсан 2025 жыл

Қайта жүктелді: 3 наурыз 2026 жыл

Қабылданды: 15 маусым 2026 жыл

IRSTI 34.29.25; 68.37.31; 29.31.26

<https://doi.org/10.26577/bb107220267>

R.M. Ualiyeva<sup>1\*</sup>, A.V. Osipova<sup>1</sup>, N.A. Diyanchuk<sup>1</sup>,  
M.M. Kaverina<sup>1</sup>, S.B. Zhangazin<sup>2</sup>, A.U. Tuyakbayeva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Toraighyrov University, Pavlodar, Kazakhstan

<sup>2</sup>L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

\*e-mail: ualiyeva.r@gmail.com

## IDENTIFICATION OF BARLEY PHYTOPATHOLOGIES BASED ON SPECTRAL SIGNATURES OBTAINED VIA HYPERSPECTRAL IMAGING

This article investigates the hyperspectral characteristics of barley. A major challenge in agriculture is the inability to perform early disease diagnosis. Hyperspectral imaging enables the identification of diseases at an early stage, preventing their further spread. Spectral analysis of barley diseases (loose smut, leaf spot, root rot) shows that infected and dried tissues have low reflectance, early-stage infections exhibit medium reflectance, and healthy tissues display high spectral intensity. In hyperspectral images, diseased plant areas appear blue, areas with living but already infected tissue appear yellow, and healthy plant areas are shown in orange, red, and burgundy. Spectra from healthy areas possess high intensity compared to those from diseased zones. This is attributed to the presence of chlorophyll, the green pigment in healthy tissue that actively reflects light. The destruction of the epidermis, loss of moisture, tissue necrosis, and darkening lead to a decrease in reflected light intensity. Barley diseases like loose smut, rust, and root rot involve spores with melanin-like pigments. These cause the decay of healthy tissues, suppress photosynthetic activity, and absorb more light than they reflect. These diseases are identified by reduced reflectance in infected plant parts. In early leaf spot, chlorophyll degradation causes a yellow colour that may resemble healthy tissue. As metabolites accumulate and necrosis progresses, brown and dark spots develop. Consequently, this disease shows high spectral variability. Leaf spot can be differentiated by the non-uniform spectral intensity across different plant parts. A common feature of all phytopathologies is the overall reduction in the plant's reflectance. The obtained spectral profiles position hyperspectral imaging as a viable tool for monitoring barley agrocenoses. It enables differentiation of phytopathologies, detailed assessment of plant condition, and early detection of anomalies before visible symptoms appear. Further advances will enable targeted crop protection, lower pesticide costs, and reduce environmental impact.

**Keywords:** hyperspectral imaging, barley, phytopathology, plant diseases, spectra.

Р.М. Уалиева<sup>1\*</sup>, А.В. Осипова<sup>1</sup>, Н.А. Диянчук<sup>1</sup>,  
М.М. Каверина<sup>1</sup>, С.Б. Жангазин<sup>2</sup>, А.У. Туюкбаева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Торайғыров университеті, Павлодар, Қазақстан

<sup>2</sup>Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Қазақстан

\*e-mail: ualiyeva.r@gmail.com

### Гиперспектралды визуализация арқылы алынған спектрлік сигнатуралар негізінде арпа фитопатологияларын идентификациялау

Бұл мақала арпаның гиперспектралды сипаттамаларын зерттеуге арналған. Ауыл шаруашылығының негізгі мәселелерінің бірі – ауруларды ерте диагностикалау мүмкіндігінің шектеулілігі. Гиперспектрлік бейнелеу ауруларды ерте кезеңде анықтауға және олардың одан әрі таралуының алдын алуға мүмкіндік береді. Шаңды қаракүйе, жапырақ дақтары және тамыр шірігі сияқты арпа ауруларының спектрлік сипаттамаларын зерттеу нәтижесінде аурумен зақымданған аймақтар мен қураған өсімдік ұлпаларының шағылу коэффициенті төмен, аурудың бастапқы кезеңдерінде орташа, ал сау ұлпаларда спектр қарқындылығы жоғары болатыны анықталды. Гиперспектралды кескінде өсімдіктің ауруға шалдыққан бөліктері көк түспен, тірі, бірақ жұқтырылған ұлпалар сары түспен, ал сау бөліктері қызғылт сары, қызыл және қоңыр-қызыл түстермен бейнеленеді. Сау аймақтардың спектрлері аурумен зақымданған аймақтардың спектрлерімен салыстырғанда жоғары қарқындылыққа ие. Бұл сау ұлпаларда жарықты белсенді түрде шағылдыратын жасыл пигмент – хлорофиллдің болуымен түсіндіріледі. Эпидермис құрылымының бұзылуы, ылғалдың жоғалуы, ұлпалардың некрозы және олардың қарауы

қындылығы төмендейді. Шаңды қаракүйе, тат және тамыр шірігі сияқты арпа аурулары сау ұлпалардың ыдырауына әкелетін, фотосинтетикалық жүйелердің белсенділігін төмендететін және шағылысқаннан гөрі көбірек жарық сіңіретін меланинтерізді пигменттері бар спораларды қамтиды. Бұл ауруларды өсімдіктің зақымданған бөліктерінің шағылу коэффициентінің төмендеуі арқылы анықтауға болады. Жапырақ дақтарының бастапқы кезеңінде хлорофиллдің ыдырауы салдарынан ұлпалар сары түске ие болады, бұл оларды сау өсімдік ұлпаларымен шатастыруға әкелуі мүмкін. Метаболиттердің жиналуы және некроз процесі барысында қоңыр және қара түсті пигментті дақтар пайда болады. Осыған байланысты бұл ауру спектрлердің жоғары вариабельділігімен сипатталады. Дақ ауруын өсімдіктің әртүрлі бөліктеріндегі спектр қарқындылығының біркелкі еместігі арқылы ажыратуға болады. Барлық фитопатологияларға тән ортақ белгі – өсімдіктің жалпы шағылу қабілетінің төмендеуі. Алынған арпаның спектрлік профилдері гиперспектралды визуализацияны арпа агроценоздарын мониторингілеу әдісі ретінде қарастыруға мүмкіндік береді. Бұл тәсіл фитопатологияларды ажыратуға, егістіктің жағдайын жеке өсімдіктер деңгейінде егжей-тегжейлі талдауға және сыртқы белгілер байқалмай тұрып аномалияларды анықтауға жағдай жасайды. Осы саладағы болашақ зерттеулер қорғаныш құралдарын нысаналы түрде қолдануға, пестицидтерге жұмсалатын шығындарды азайтуға және қоршаған ортаға түсетін антропогендік жүктемені төмендетуге мүмкіндік береді.

**Түйін сөздер:** гиперспектралды визуализация, арпа, фитопатология, өсімдік аурулары, спектрлер.

Р.М. Уалиева<sup>1\*</sup>, А.В. Осипова<sup>1</sup>, Н.А. Диянчук<sup>1</sup>,  
М.М. Каверина<sup>1</sup>, С.Б. Жангазин<sup>2</sup>, А.У. Туякбаева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Торайғыров университет, Павлодар, Қазақстан

<sup>2</sup>Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Қазақстан

\*e-mail: ualiyeva.r@gmail.com

### **Идентификация фитопатологий ячменя по данным спектральных сигнатур, полученных с применением гиперспектральной визуализации**

Данная статья посвящена изучению гиперспектральных характеристик ячменя. Одной из главных проблем сельского хозяйства является невозможность ранней диагностики заболеваний. Гиперспектральная визуализация позволит идентифицировать болезнь на ранних сроках и предотвратить ее дальнейшее распространение. Изучив спектральные характеристики таких болезней ячменя как пыльная головня, пятнистость, корневая гниль, было выявлено, что пораженные болезнью участки и высохшая растительная ткань имеют низкий коэффициент отражения, начальные стадии болезней – средний коэффициент отражения, а здоровая ткань обладает высокой интенсивностью спектра. На гиперспектральном изображении больные участки растения отображаются синим цветом, участки с еще живой тканью, но уже зараженные – желтым, а здоровые участки растений оранжевым, красным и бордовым. Спектры здоровых участков обладают высокой интенсивностью по сравнению со спектрами участков, пораженных болезнями. Это связано с тем, что здоровая ткань содержит зеленый пигмент хлорофилл, который активно отражает свет. При разрушении структуры эпидермиса, потере влаги, некрозе тканей и их потемнении интенсивность отражаемого света снижается. Болезни ячменя, такие как пыльная головня, ржавчина и корневая гниль, содержат споры с меланиноподобными пигментами, которые вызывают гниение здоровых тканей, угнетают активность фотосинтетических систем и поглощают больше света, чем отражают. Эти болезни можно идентифицировать по снижению коэффициента отражения зараженных участков растения. Пятнистость листьев на начальной стадии при разрушении хлорофилла имеет желтый цвет, который можно спутать со здоровой тканью растений. При накоплении метаболитов и некрозе появляются пигментные пятна бурового и темного цветов. За счет этого это заболевание имеет высокую вариабельность в спектрах. Дифференцировать пятнистость можно по неоднородности интенсивности спектров разных участков растения. Отличительной чертой всех фитопатологий является снижение общей отражательной способности растения. Полученные данные спектральных профилей ячменя позволяют рассматривать гиперспектральную визуализацию как метод мониторинга агроценозов ячменя, позволяющий дифференцировать фитопатологии, проводить детальный анализ состояния посевов на уровне отдельных растений и выявлять аномалии до проявления внешних симптомов. Дальнейшие разработки в этой области позволят точно применять защитные средства, снизить затраты на пестициды и уменьшить нагрузки на окружающую среду.

**Ключевые слова:** гиперспектральная визуализация, ячмень, фитопатологии, болезни растений, спектры.

## Introduction

Given the increasing intensification of agriculture and growing demands for sustainable agricultural production, the need to adopt high-precision methods for monitoring crop conditions is becoming evident. It is important to note that today, one of the most promising areas in digital agriculture is hyperspectral imaging – a technology based on recording the spectral characteristics of reflected radiation from vegetation across a broad range of wavelengths. Unlike traditional observation methods, hyperspectral imaging can detect physiological changes in plants at preclinical stages, which is particularly important as it plays a crucial role in enabling early diagnosis of diseases, nutrient deficiencies, and stress caused by unfavourable environmental conditions. Barley is one of the most important grain crops, sensitive to environmental changes and pathogen exposure, which directly affects yield and product quality.

Despite the proven effectiveness of this technology, a significant challenge in modern phytopathology is transitioning from isolated disease models to comprehensive diagnostic systems. While previous studies have successfully identified single-pathogen infections, there remains a critical need to accurately differentiate a complex of diverse diseases. Achieving this requires moving beyond standard vegetation indices to employ a deeper analysis of optical signatures, specifically utilising complex statistical parameters of spectral curves. Additionally, the physical relationship between specific disease manifestations – such as the accumulation of distinct fungal pigments – and their combined effect on the VNIR spectrum demands further investigation.

The object of this study is cultivated barley (*Hordeum vulgare* L.) grown in typical agroecological conditions of northeastern Kazakhstan. The subject of the research encompasses the specific optical signatures and hyperspectral reflectance parameters associated with healthy and pathogen-infected barley tissues. Therefore, our goal was to explore the potential of hyperspectral imaging in identifying barley diseases through the analysis of spectral profiles from infected plants. To achieve this aim, the following objectives were set: to acquire and pre-process hyperspectral data from healthy barley and samples infected with loose smut, plant rust, leaf spot, and root rot under controlled laboratory conditions; to

calculate and analyse specific statistical indicators of reflectance; to extract informative spectral features and classify plant phytostatuses. To fulfill these objectives, the research employed hyperspectral imaging in the visible and near-infrared range. The analytical framework involved optical data acquisition followed by data dimensionality reduction and multivariate statistical processing to evaluate the spectral differences between the samples.

The scientific significance of this study lies in establishing quantitative links between physiological plant degradation (such as chlorophyll loss or melanin-related darkening) and specific variations in hyperspectral profiles. Practically, the proposed multidimensional evaluation offers detailed physiological insights that can inform the future development of automated monitoring systems, thereby contributing to more targeted agrochemical applications in precision agriculture.

The application of hyperspectral imaging in phytopathology has been the subject of extensive recent research, demonstrating significant potential for non-invasive crop monitoring. Recent studies have made substantial scientific contributions by validating the efficacy of spectral analysis for both early pathogen detection and the visualisation of plant resistance responses. These works highlight a vital transition in digital agriculture from traditional visual assessment to automated, high-precision phenotyping.

For instance, one study developed a highly accurate automated hyperspectral phenotyping system to quantitatively assess the severity of powdery mildew infection on different barley varieties under greenhouse conditions. This system successfully detected disease symptoms at early stages while achieving high classification accuracy without expert involvement (Thomas et al., 2018). It is worth noting that modern hyperspectral imaging methods, combined with principal component analysis, spectral decomposition, and linear discriminant analysis, enable high accuracy in the early detection of *Magnaporthe oryzae* infections on barley leaves and allow visualisation of infection sites as early as 24 hours after inoculation (Zhou et al., 2019). Additionally, it has been found that near-infrared hyperspectral imaging can accurately detect fungal infections by *Aspergillus glaucus* and *Penicillium spp.*, as well as ochratoxin A contamination in barley grains, thereby enabling early diagnosis and quality control of stored grain

(Senthilkumar et al., 2016). Hyperspectral imaging has demonstrated its practical effectiveness in the early detection of barley's hypersensitive response to *Blumeria graminis f. sp. hordei*, allowing for the identification of genotype-specific spectral signatures within 1-3 days after infection. This makes the method promising for automated phenotyping of disease resistance (Kuska et al., 2017). Overall, the practical application of hyperspectral imaging has enabled non-invasive detection and visualisation of barley resistance responses to *Blumeria graminis f. sp. hordei*, encompassing both pathogenesis and the manifestation of early hypersensitive reactions, even before visible symptoms appear. The use of the Relief algorithm, alongside parallel molecular-histological analysis, plays an equally important role by helping interpret spectral data in a biological context and identifying key wavelengths associated with different types of interaction (Kuska, 2017). Studies in this field also indicate that early detection of barley diseases using fluorescence and reflectance spectral indices effectively identifies diseases at initial stages and assesses chlorophyll concentration in leaves, facilitating timely fungicide application and improved crop management (Yu et al., 2014). Some research demonstrates that hyperspectral imaging has also been applied to non-destructive analysis of deoxynivalenol (DON) content in barley grain caused by *Fusarium graminearum* infection. Furthermore, data show that using partial least squares and machine learning methods enables high accuracy in estimating mycotoxin content, making this approach promising for rapid grain quality screening and Fusarium head blight diagnosis (Su et al., 2021). Hyperspectral imaging in the UV range allows for distinguishing between barley varieties resistant and susceptible to *Blumeria graminis f. sp. hordei* at early stages by detecting changes in reflectance, which may be related to flavonoids and other metabolites (Brugger et al., 2021). Hyperspectral imaging at a microscopic scale enables non-invasive recording of spectral changes in barley leaves during interaction with powdery mildew, helping differentiate susceptible and resistant genotypes based on reflectance in the visible and near-infrared ranges. In addition to these methods, automated analysis techniques such as Simplex Volume Maximisation (SiVM) contribute to faster data processing and yield clear results (Kuska et al., 2015). Equally important is the combined analysis of hyperspectral

reflectance and transmission, which not only allows detection of barley powdery mildew before visual symptoms appear but also clarifies the spatial distribution of infected and necrotic areas. This makes the approach particularly valuable for early diagnosis and detailed pathogenesis studies (Thomas et al., 2016).

Despite these significant advancements, a critical research gap remains. The majority of the reviewed studies focus primarily on single-pathogen interactions or rely on standard evaluation methods without fully exploring the comprehensive statistical parameters of the spectral curves. There is a clear need for comparative research that simultaneously differentiates a complex of distinct phytopathological conditions – such as loose smut, plant rust, leaf spot, and root rot – based on detailed statistical reflectance metrics, including spectral bandwidth broadening and skewness shifts. Furthermore, there is limited quantitative exploration regarding how specific pathogen-induced alterations, particularly the accumulation of melanin-like pigments, simultaneously affect visible and near-infrared reflectance across different diseases. By providing a multidimensional statistical evaluation of hyperspectral data under controlled laboratory conditions, this study aims to differentiate diverse barley diseases, offering detailed spectral insights that can support the future development of remote monitoring systems in precision agriculture.

## Materials and methods

The object of the study is cultivated barley (*Hordeum vulgare L.*) grown in the typical agroecological conditions of northeastern Kazakhstan. The collection of samples was carried out during key phenological stages of spring barley in 2025 in the main grain-producing districts of the Pavlodar region: Zhelezinka and Terenkol districts. These regions were selected based on their agricultural significance and differences in soil and climatic conditions, which ensured the sample's representativeness and allowed for capturing a wide range of possible plant phytosanitary conditions. Phytopathogens were diagnosed using laboratory methods (pure culture isolation, microscopy) in accordance with State Standard 12044-93 "Methods for Determining Disease Contamination" (State Standard 12044-93, 2011). Hyperspectral imaging of the plant material was conducted at the Biological

Research Laboratory of the Toraighyrov University. A high-precision FigSpec FS-13 hyperspectral camera, operating in the visible and near-infrared range (VNIR, 400-1000 nm), was used as the measuring instrument. This push-broom scanning camera features high spectral resolution (at least 2.5 nm) and a wide number of spectral channels (at least 250), enabling the acquisition of detailed spectral profiles of the studied objects. The imaging procedure was based on several key steps, including system calibration using reference white and black panels to ensure the correctness of reflectance data. Hyperspectral images were obtained under controlled lighting conditions to minimise the influence of external factors. For the preliminary assessment of data quality, specialised Breeze software, developed in the IDL (Interactive Data Language) programming environment, was used to visualise spectral cubes and perform their initial analysis. To identify signs of barley phytopathological conditions, the spectral data underwent comprehensive analytical processing.

A total of 17 barley samples representing different phytosanitary conditions were included in the study. The dataset consisted of one healthy sample, five samples infected with loose smut, five samples exhibiting symptoms of leaf spot diseases, two samples affected by rust, three samples with root rot, and one sample showing a mixed infection of loose smut and rust. Regions of interest corresponding to healthy and diseased plant tissues were selected from the hyperspectral images. On average, 8-10 ROIs were identified per image, resulting in approximately 150 ROIs across the entire dataset. Each ROI contained numerous spectral pixels with reflectance values recorded across the investigated spectral range. In total, approximately 50,000 spectral pixels were analysed and used for the calculation of spectral characteristics, Principal Component Analysis (PCA), and subsequent statistical processing.

The analysis of reflectance spectra was aimed at identifying characteristic spectral features – primarily zones of selective absorption and reflectance of radiation – which are presumably associated with physiological changes in plant tissues caused by diseases. These optical signatures were considered key markers for identifying different types of damage. An important stage in hyperspectral analysis is data dimensionality reduction and the extraction of informative spectral features. For this purpose, PCA method was applied.

It allowed for structuring the spectral data, visualising them as projections onto new orthogonal axes, and conducting subsequent classification of plant phytosanitary status. The proposed methodological approach ensured high accuracy in distinguishing between healthy and diseased plants. Consequently, it may serve as a basis for the development of remote monitoring systems and early disease diagnosis in agroecosystems.

For statistical analysis with support for the Python programming language integrated with Microsoft Excel for more convenient data import and analysis. Spectral data were analysed using analysis of variance (ANOVA) along with descriptive statistical methods.

Minimum and Maximum Reflectance (Ualiyeva et al., 2025):

$$R_{min} = \min (R_1, R_2, \dots, R_n)$$

$$R_{max} = \max (R_1, R_2, \dots, R_n).$$

Mean Reflectance (Ualiyeva et al., 2025):

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i.$$

Standard Deviation (dispersion of reflectance values) (Ualiyeva et al., 2025):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_i - \mu)^2}.$$

Coefficient of Variation (degree of variability) (Ualiyeva et al., 2025):

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \times 100.$$

Delta Reflectance (difference) (Ualiyeva et al., 2025):

$$\Delta R = R_{max} - R_{min}.$$

Spectral Bandwidth calculated using the formula (Ualiyeva et al., 2025):

$$SB = \lambda_{max} - \lambda_{min}.$$

Spectral Skewness (asymmetry) (Ualiyeva et al., 2025):

$$SA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{R_i - \mu}{\sigma} \right)^3.$$

The computed parameters offer a quantitative evaluation of the spectral properties of the examined specimens and facilitate the identification of intergroup differences.

## Results and discussion

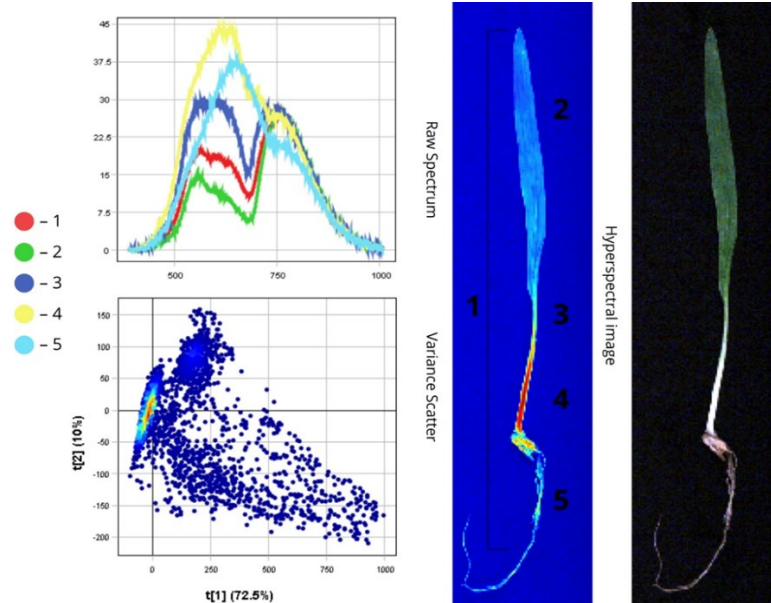
The images with the spectral characteristics of barley feature graphs of the Raw Spectrum showing spectra from individual plant parts or overall spectra

for each sample, a Variance Scatter diagram, and a hyperspectral image of the object. The Variance Scatter diagram in the center of the lower part of the image shows the distribution of spectral points according to Principal Component Analysis (PCA) components, with axis labels  $t[1]$  – the first principal component (major contributor to variance), and  $t[2]$  – the second principal component.

### Healthy sample

On the left side of the presented image with healthy barley, the curves of spectra belonging to different parts of the plant are sequentially marked. For example, the first spectrum, represented by the red curve, belongs to the entire plant. Figure 1 shows healthy barley.

**Figure 1**  
*Healthy sample*



*Note:* Compiled by the author

The red curve represents the spectrum of the entire plant, featuring two peaks at wavelengths of 550 nm and 750 nm with a reflectance coefficient of 20-30. The leaf blade (green curve) represents a spectral peak at 550 nm with a reflectance coefficient of 15-20. The stem has a reflectance coefficient of 30 and spectral peaks at wavelengths of 550 nm and 750 nm. The coleoptile has the highest spectral intensity with a reflectance

coefficient of 45 and a spectral peak at 550-600 nm. The root part has a reflectance coefficient of 37.5 and a spectral peak at 600 nm. At the same time the white coleoptile and root part have greater spectral intensity compared to the dark green leaf blade and stem.

### Diseased Samples

Figure 2 presents samples of plants infected by various disease pathogens.

**Figure 2**  
Diseased samples



Note: Compiled by the author

On each image depicting plant diseases, the legend is shown on the right: for example, the blue colour in the hyperspectral image corresponds to the red curve on the spectrum. It is very important to pay attention to this and not confuse the colours on the hyperspectral image and on the spectral graphs.

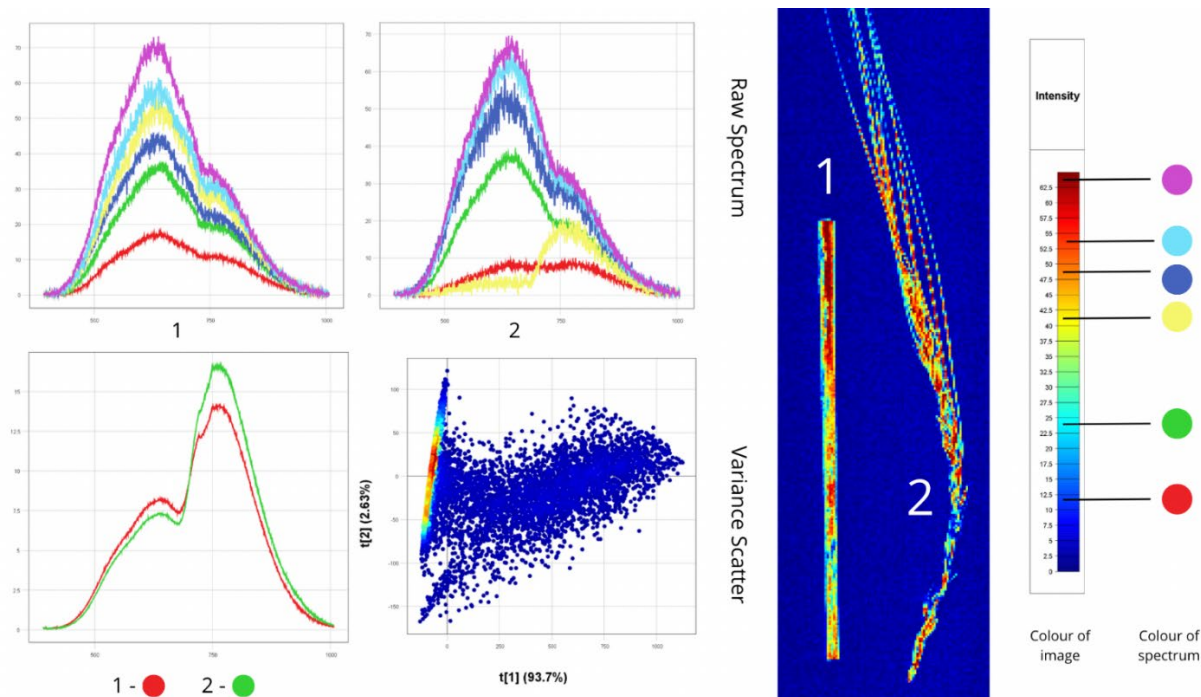
#### *Loose smut*

Loose smut is a disease of cereal crops caused by basidiomycete smut fungi, where infection occurs through teliospores. This infection typically manifests as disintegrating plant tissue from which a dusty black mass is formed. The spores can overwinter on plant residues and in soil, gradually transferring to young plants in spring and infecting them.

Figure 3 shows a stem and ear infected with loose smut. Graph 1 displays the spectral characteristics of the stem parts. Here, the red spectrum on the graph corresponds to the blue areas on the stem, and the green spectrum corresponds to the light blue areas, both of which are affected by loose smut. They are characterised by low spectral intensity with a reflectance coefficient of 10-30. On the other hand, the remaining spectra belong to unaffected plant tissue and have a higher reflectance coefficient, while the ear exhibits similar spectral

characteristics. Important attention should be paid to the healthy plant tissue, which is depicted in burgundy and red on the hyperspectral image. The spectral graphs in purple, light blue, and blue colours show the highest reflectance intensity – 50-70. It was also found that the red spectrum corresponds to areas of the ear infected with loose smut and has the lowest reflectance coefficient – around 10. Examining the graph of the overall plant spectra revealed that these spectra have a low reflectance coefficient (15) due to the plant's infection, with the reflectance peak occurring at wavelengths within 500-780 nm. The Variance Scatter diagram deserves special attention, where the first principal component  $t[1]$ , explaining 93.7% of the total variance, is the primary and most important axis along which the greatest data diversity lies. Meanwhile, the second component  $t[2]$ , explaining 2.63% of the variance, reflects less significant variations. As a result, the plotted points form an elongated, slightly fan-shaped structure, which indicates the presence of two main types of spectra that vary between each other. Thus, it shows that the main difference between the spectra of objects 1 and 2 lies in the intensity and shape of the spectral curve.

**Figure 3**  
Sample A: Loose smut



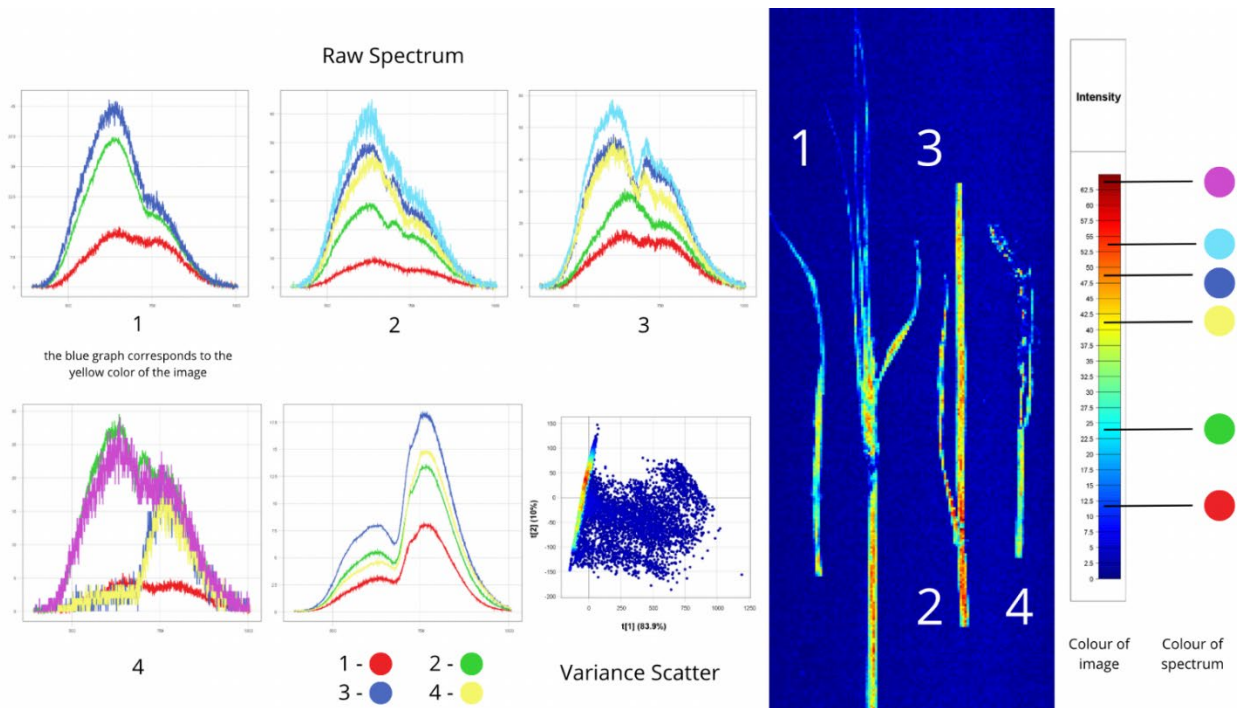
Note: Compiled by the author

Figure 4 shows images of barley leaves with a stem infected with loose smut. Graph 1 belongs to the first sample – a barley leaf that is completely infected with the disease. In the hyperspectral image, areas with the disease are shown in blue and light blue, while an area with progressing disease is shown in yellow. The study found that the red spectrum corresponds to the infected area and has a low reflectance coefficient of 15. The blue spectrum in this case belongs to an area with progressing loose smut but still-living plant tissue and has a medium reflectance coefficient of 45. The same trend is observed for the other samples: areas completely infected with loose smut are shown in blue and have the lowest reflectance, while the remaining healthy areas, for example in the third sample, are shown in red and have the highest intensity among the other spectra. Since the first sample is completely infected, it has the lowest reflectance among the other plants – 7.5, as seen in the overall graph. The

third sample, in turn, has remnants of unaffected plant tissue, so its reflectance coefficient is the highest among the others – 17.5, with the reflectance peak occurring at a wavelength of 500-780 nm.

In the first sample of Figure 5, the stem is infected with loose smut, and the spectrum of the infected area has the lowest reflectance. The second sample has diffuse lesions on the stem, and the leaf and ear are completely infected. It was determined that the diffuse lesions are coloured yellow in the hyperspectral image, the leaf and ear are blue, while healthy tissue is coloured red and has a spectrum with the highest reflectance peak – 70. The third and fourth samples have pronounced disease on the ear, where the reflectance coefficient of the infected areas is 10. Among all samples, the first sample has the lowest overall reflectance coefficient as it contains the least amount of healthy tissue, and the reflectance peak lies within the wavelength range of 500-780 nm.

**Figure 4**  
Sample B: Loose smut

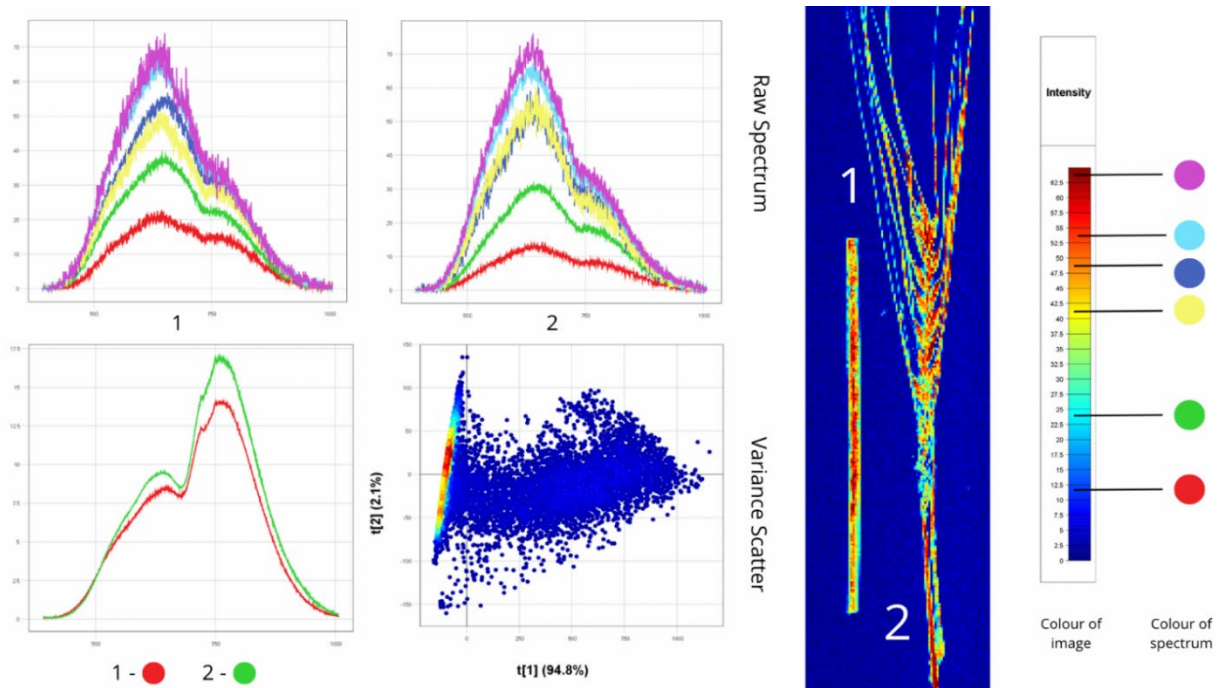


Note: Compiled by the author

Figure 6 shows a barley stem and ear partially infected with loose smut, where the green and red spectra belong to the infected plant areas. From the presented hyperspectral image, it is clear from the overall graph that the stem spectrum shows more pronounced disease symptoms than the ear spectrum, as it has lower reflectance intensity. The reflectance peak is also recorded within the wavelength range of 500-750 nm.

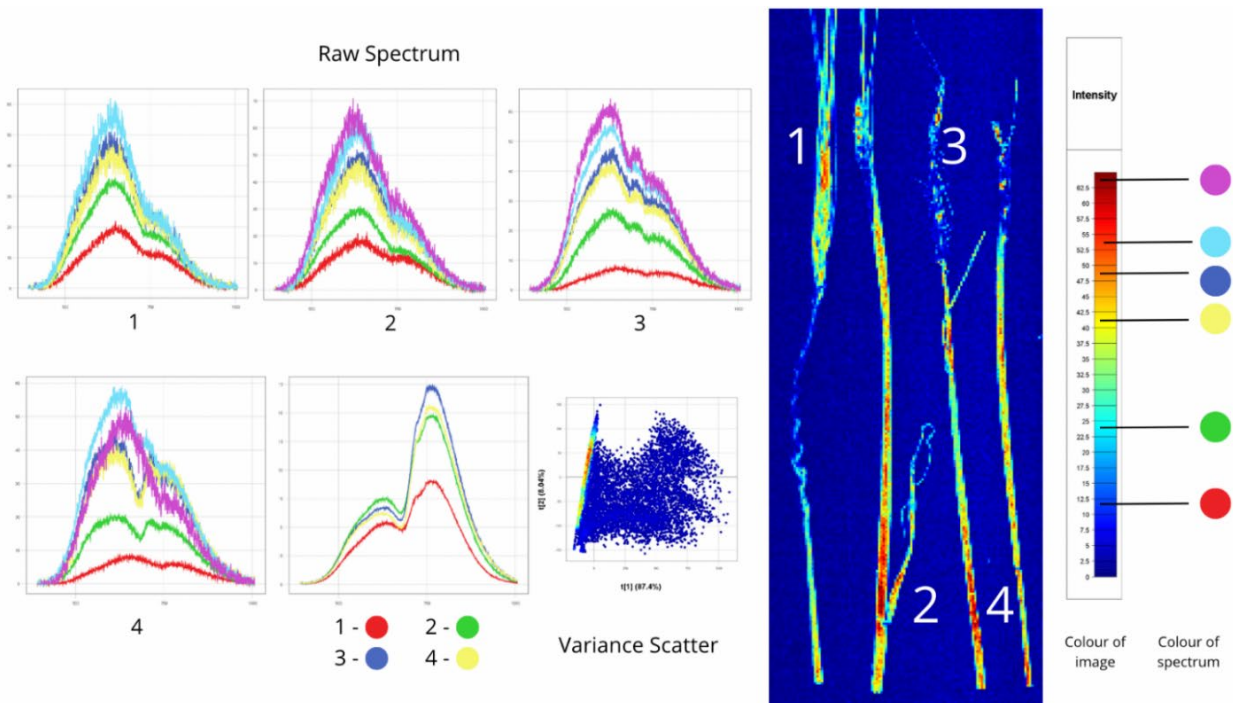
Figure 7 shows ear samples infected with loose smut. The first sample has a greater degree of infection and contains almost no areas coloured red, while the second sample contains more healthy tissue with a reflectance coefficient of 80. The results indicate that in the overall graph, the first sample has lower reflectance intensity – 11, compared to the second sample – 17.

**Figure 5**  
*Sample D: Loose smut*



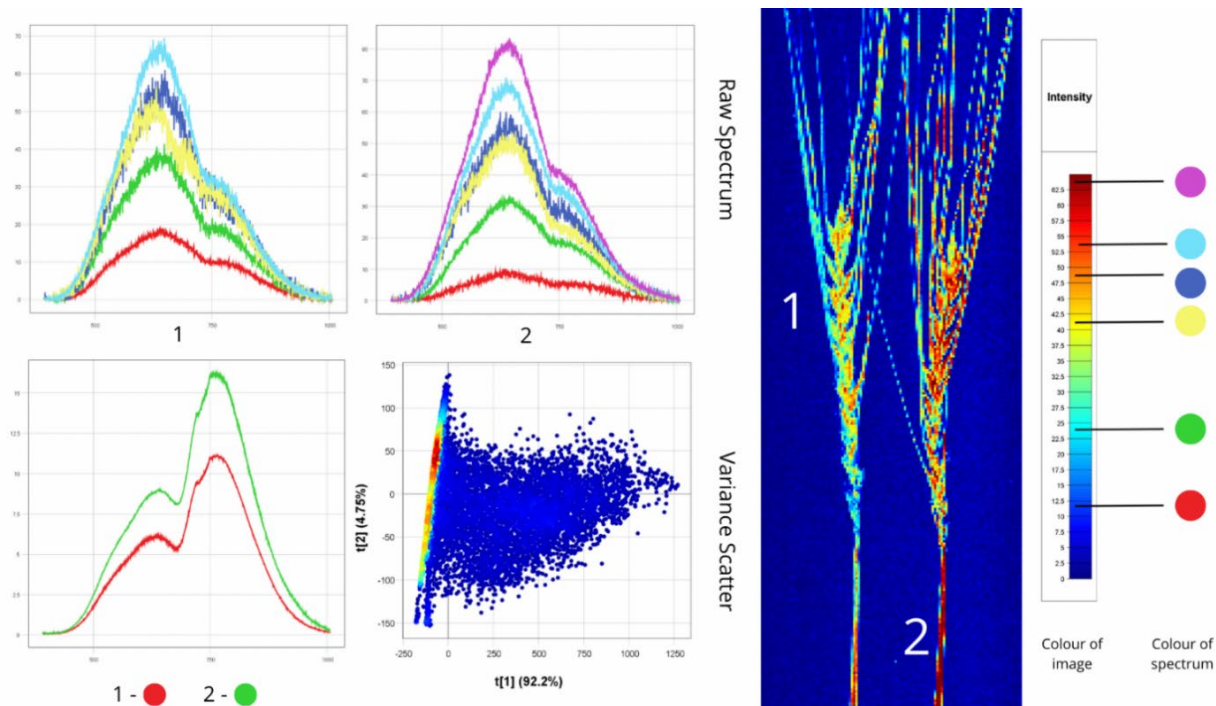
*Note:* Compiled by the author

**Figure 6**  
*Sample C: Loose smut*



*Note:* Compiled by the author

**Figure 7**  
 Sample E: Loose smut



Note: Compiled by the author

#### *Loose smut and plant rust*

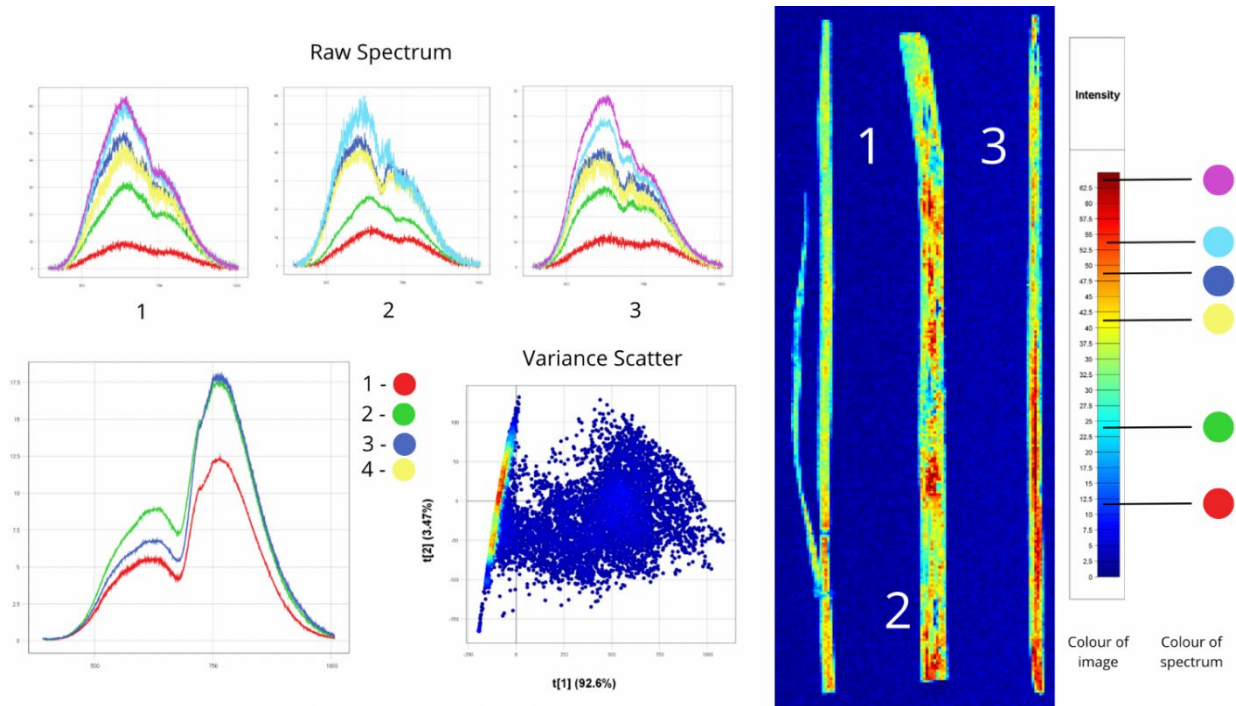
Figure 8 shows samples where barley stems are affected by loose smut and rust. In contrast to loose smut, rust appears as separate orange or brownish spots. In the hyperspectral image, the first and third samples are affected by loose smut, identifiable by the uniform distribution of blue and light blue colours. The second sample is affected by rust, the presence of which can be determined by the separately located areas of blue and light blue colour along the entire plant stem. The obtained results show that the spectra in terms of reflectance intensity for both diseases are approximately equal and recorded at a level of 10. It is also important to note that in the overall graph, the first sample has the lowest reflectance coefficient, as it is completely affected by loose smut, while the second and third samples retain some areas of healthy tissue.

#### *Plant rust*

Figure 9 shows barley stems affected by rust. The results indicate that in the hyperspectral image, rust can be identified by dark blue spots along the stems of all four samples. For example, in the first sample on the hyperspectral image, light blue and

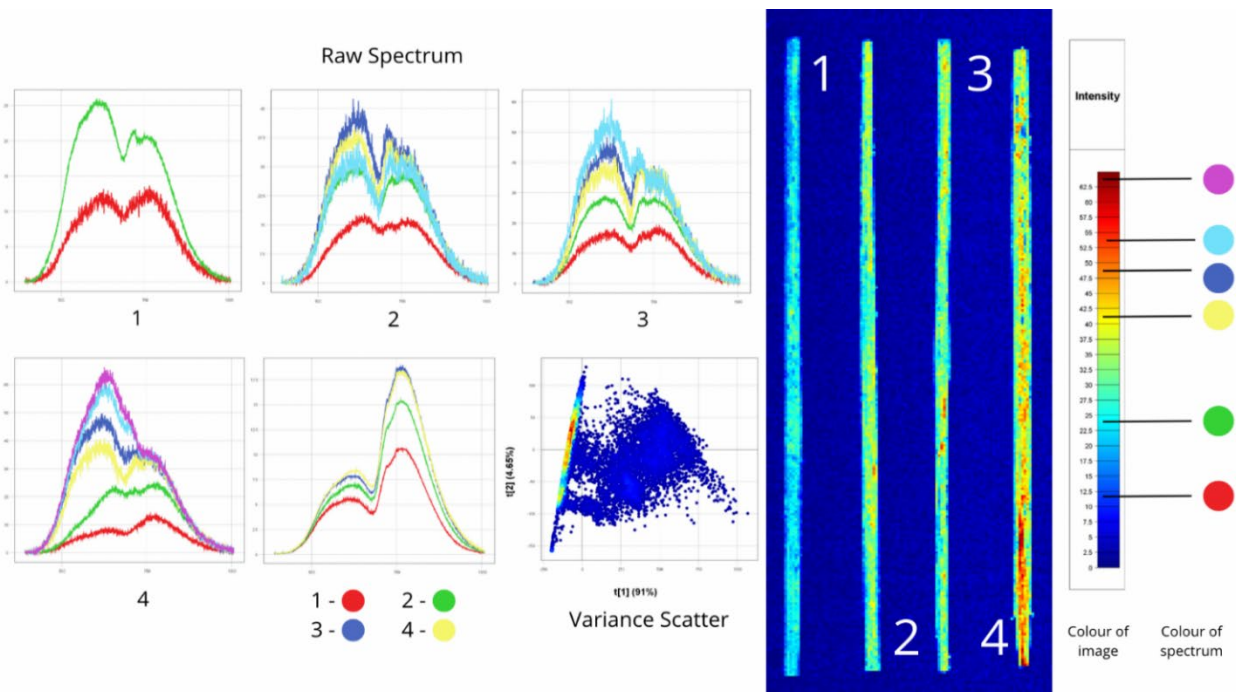
blue colours are pronounced, indicating that the entire stem is affected by rust. The analysis of the Raw Spectrum graph also shows that light blue areas have medium intensity, while blue ones have lower intensity. It was found that sample 4 is the most saturated in terms of spectral diversity, containing both diseased areas and healthy tissue. The overall spectral graph displays the general spectra of the barley stem samples, from which it follows that the third and fourth graphs have approximately similar reflectance values with a peak at 19. The reflectance peak of the first sample demonstrates the lowest reflectance coefficient numerically – 11, indicating that it is the most infected with rust among all samples. In objective terms, the Variance Scatter diagram is constructed based on component analysis: the axes represent the values of  $t[1]$  (91%) and  $t[2]$  (4.65%). The obtained results, showing a dense clustering of points, indicate a certain homogeneity between the spectra. Consequently, the resulting blurring along  $t[1]$  suggests significant differences between the areas (healthy and diseased), which is particularly clearly traced in the range of the main component, considered the most informative.

**Figure 8**  
*Sample F: Loose smut and plant rust*



*Note:* Compiled by the author

**Figure 9**  
*Sample H: Plant rust*



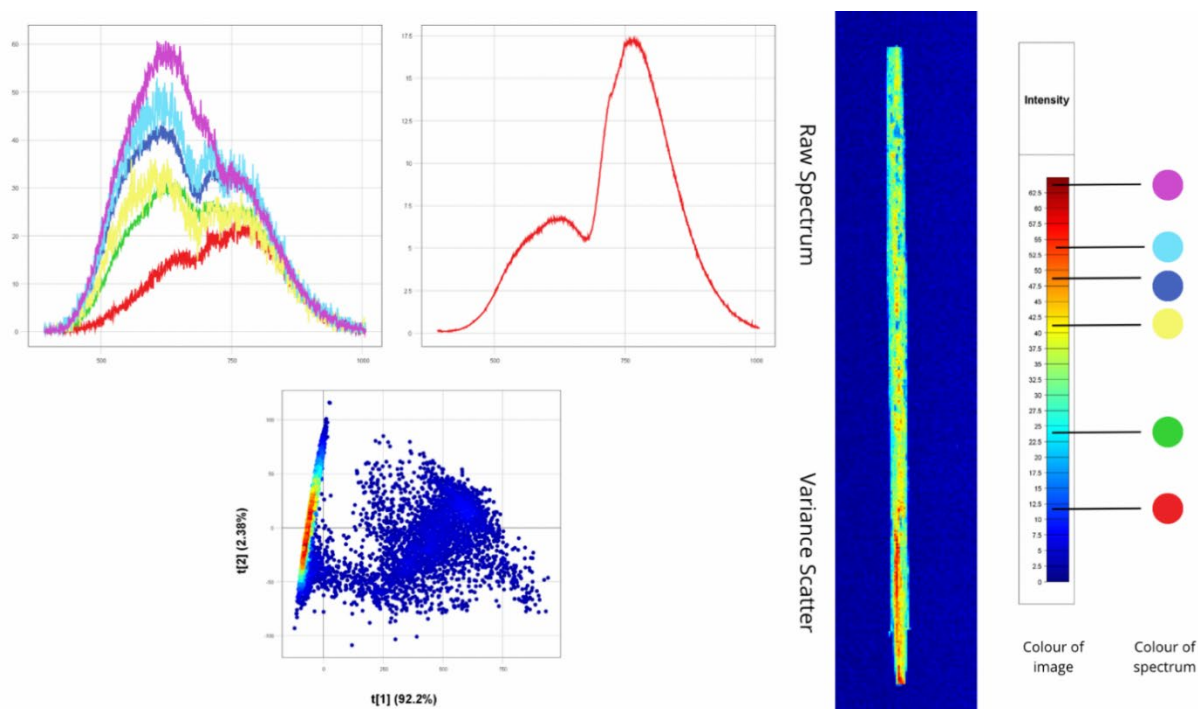
*Note:* Compiled by the author

Figure 10 depicts rust on a barley stem. This obtained hyperspectral image shows the intensity of reflected light in various areas of the stem, where zones of blue and light blue colours, corresponding to infection sites, are highlighted.

It was established that they have low reflectance intensity – 20, while healthy areas have a reflectance coefficient of 50. The analysis of the overall Raw Spectrum graph shows an averaged spectrum with two pronounced reflectance peaks – one is evident in the 550 nm region and a more pronounced peak recorded approximately in the range around 750 nm. These results are explained by chlorophyll actively

absorbing light in the red zone and reflecting it in the near-infrared. Examining the issue of dispersion intensity, it becomes clear that the Variance Scatter diagram shows a strong separation along the  $t[1]$  axis, which explains over 92% of the total variance. This indicates the presence of clear differences between spectral subgroups, specifically between healthy and diseased tissues. Since the high density of points on the left and the scattered cloud on the right collectively emphasise that the spectral data of the stem is not homogeneous, this can be directly related to the visually and spectrally distinguishable foci of rust.

**Figure 10**  
Sample P: Plant rust



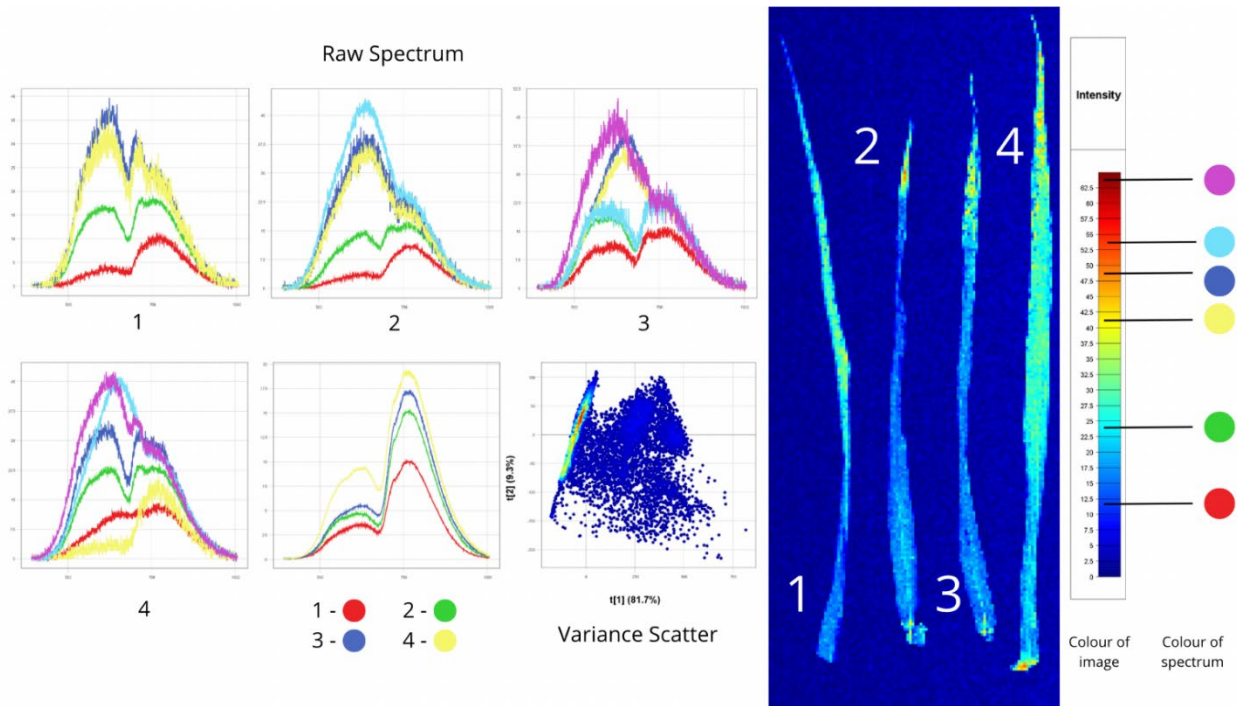
Note: Compiled by the author

### Leaf spot

Figure 11 shows barley leaves affected by leaf spot, which appears as yellow and turquoise colours in the hyperspectral image and is mainly observed at the leaf tips, making it potentially mistaken for healthy tissue. However, blue dots are also visible in

these areas, indicating the presence of leaf necrosis. Overall, an objective analysis of the Variance Scatter diagram demonstrates that leaf spot causes significant spectral differences, resulting in clusters with reduced reflectance that are spatially separated from healthy tissues.

**Figure 11**  
Sample G: Leaf spot



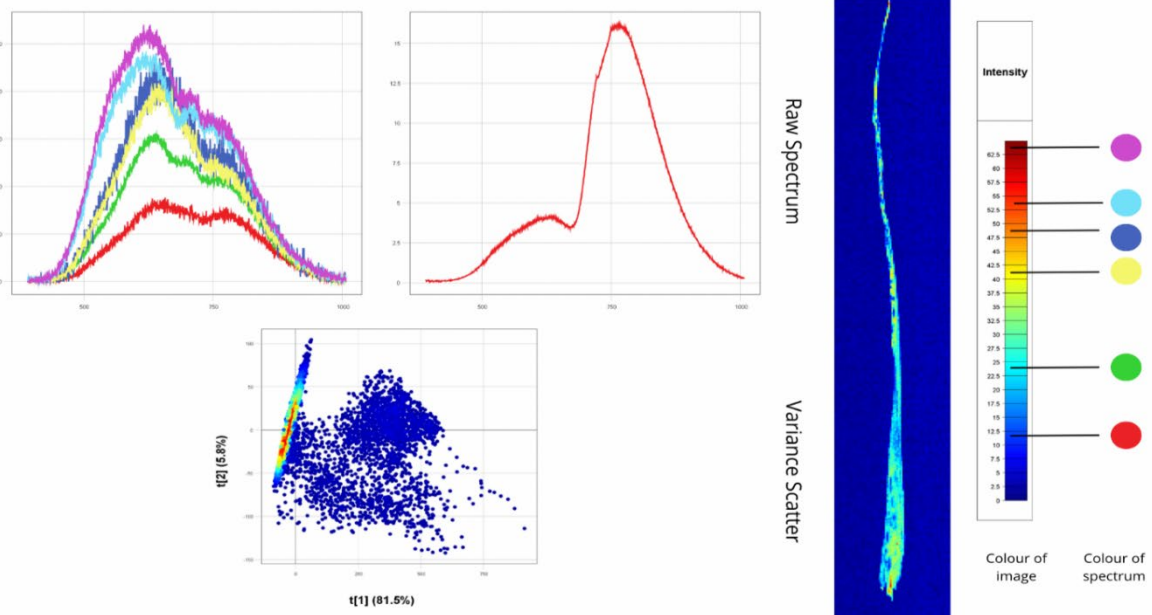
Note: Compiled by the author

Figure 12 depicts a barley leaf with leaf spot. In the hyperspectral image, necrosis is visualised as dark blue spots spread along the entire length of the sample, particularly noticeable at the edges. Red and yellow areas show high reflectance intensity, characteristic of healthy leaf cells, while on the Raw Spectrum graph, the peak of the dark blue spectrum is at 18. In turn, the spectra of light blue, yellow, orange, red, and dark red colours correspond to areas with less damage. As the intensity increases (to dark red), a rise in reflectance peaks is observed, especially in the 700-800 nm range. An important aspect is the consideration of dispersion on the Variance Scatter graph, which presents Principal Component Analysis (PCA): the  $t[1]$  axis (81.5%) represents the main component explaining most of the data variability, while the  $t[2]$  axis (5.8%) represents the second component, complementing the analysis. The visualisation of points on the graph corresponds to spectra from different image pixels, where a strong aggregation of points is observed on the left along the  $t[1]$  axis, but some points significantly deviate to the right, which may correspond to necrotic areas with a distinctly different spectrum. It was also established that the obvious presence of a colour gradient in the points

(from red to blue) emphasises the degree of spectral alteration, where red likely highlights tissues with the greatest degree of damage.

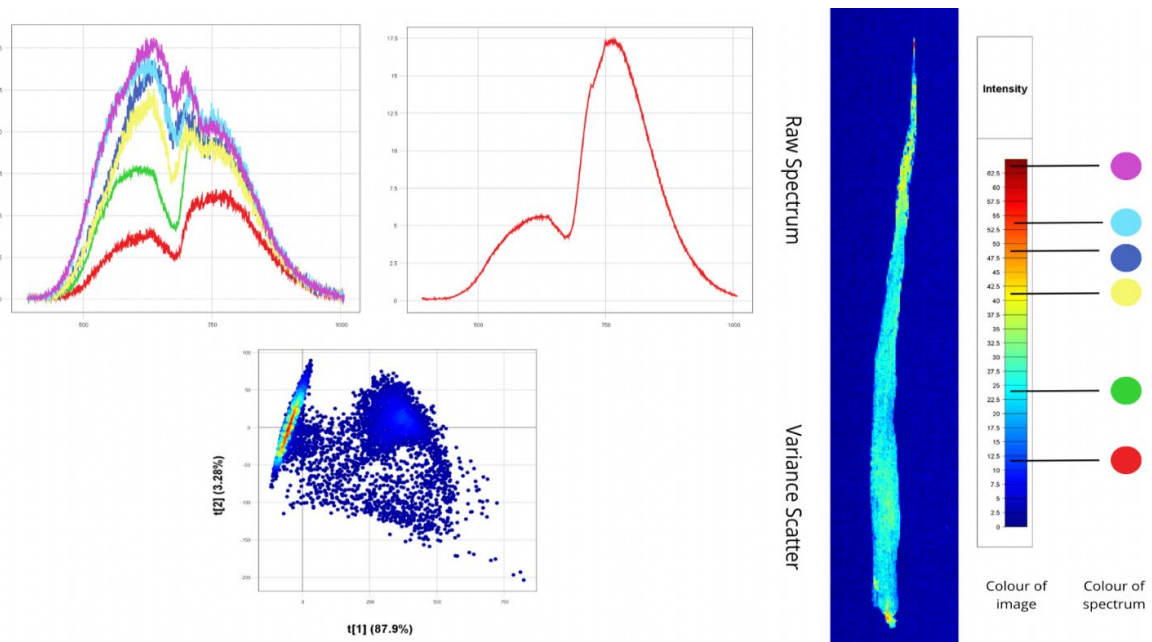
Figure 13 presents a hyperspectral image of a barley leaf affected by leaf spot. This image clearly shows necrotic areas displayed as dark blue dots with low reflectance intensity, particularly at the upper tip of the leaf. There are also light yellow areas indicating medium reflectance, characteristic of the initial stages of leaf spot. The graph with a single curve shows the averaged leaf spectrum and demonstrates a pronounced peak in the range from 600 nm to 780 nm, with a reflectance coefficient equivalent to 17.5, which is presumably characteristic of a diseased plant. The overall spectral graph displays numerous spectra corresponding to different leaf zones, with colours comparable to those in the hyperspectral image. On the Variance Scatter graph obtained by Principal Component Analysis (PCA), the  $t[1]$  axis (87.9%) represents the main direction of spectral variability, while the  $t[2]$  axis (3.28%) complements the analysis. It follows that the distribution of points shows a compact clustering on the left, while a scattered cloud of points is observed further to the right.

**Figure 12**  
Sample I: Leaf spot



Note: Compiled by the author

**Figure 13**  
Sample K: Leaf spot

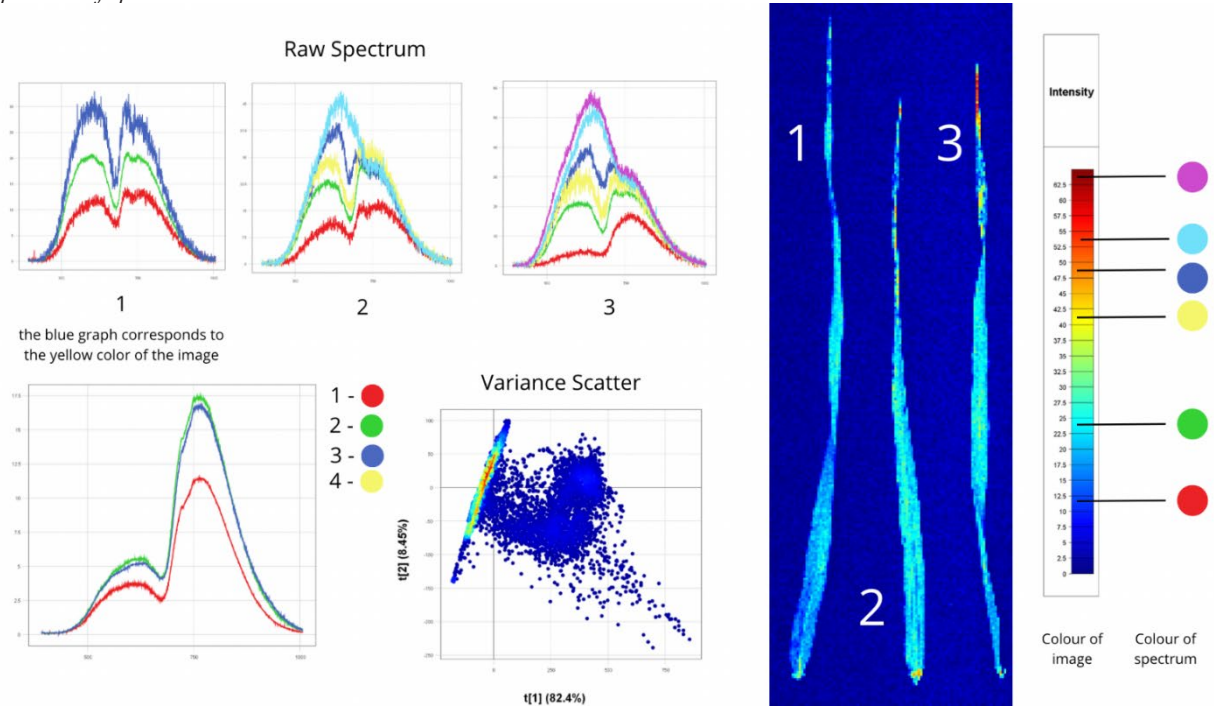


Note: Compiled by the author

Figure 14 presents a hyperspectral image of three barley leaves affected by leaf spot. Examining the colour expression of individual areas, it can be noted that regions coloured dark blue correspond to low reflectance intensity, which may indicate necrosis or other tissue damage. Areas coloured yellow and light blue have medium intensity and belong to affected zones where leaf spot is not pronounced. In the Raw Spectrum graphs, the purple curve corresponds to areas with maximum reflectance, correlating with potentially healthy tissues. Meanwhile, in the graph of the leaves' overall spectra, the first sample is

characterised by the lowest intensity of all, as it contains more affected tissue, while the third sample has the highest reflectance coefficient, as it contains unaffected (i.e., healthy) plant tissues. The Variance Scatter graph clearly displays the result of the Principal Component Analysis (PCA), where the  $t[1]$  axis (82.4%) represents the main component explaining the primary data variability, and the  $t[2]$  axis (8.45%) represents the second component. Each point in this case represents a spectrum from a specific image pixel, and its colour, in turn, reflects the colour of the corresponding spectrum.

**Figure 14**  
Sample J: Leaf spot

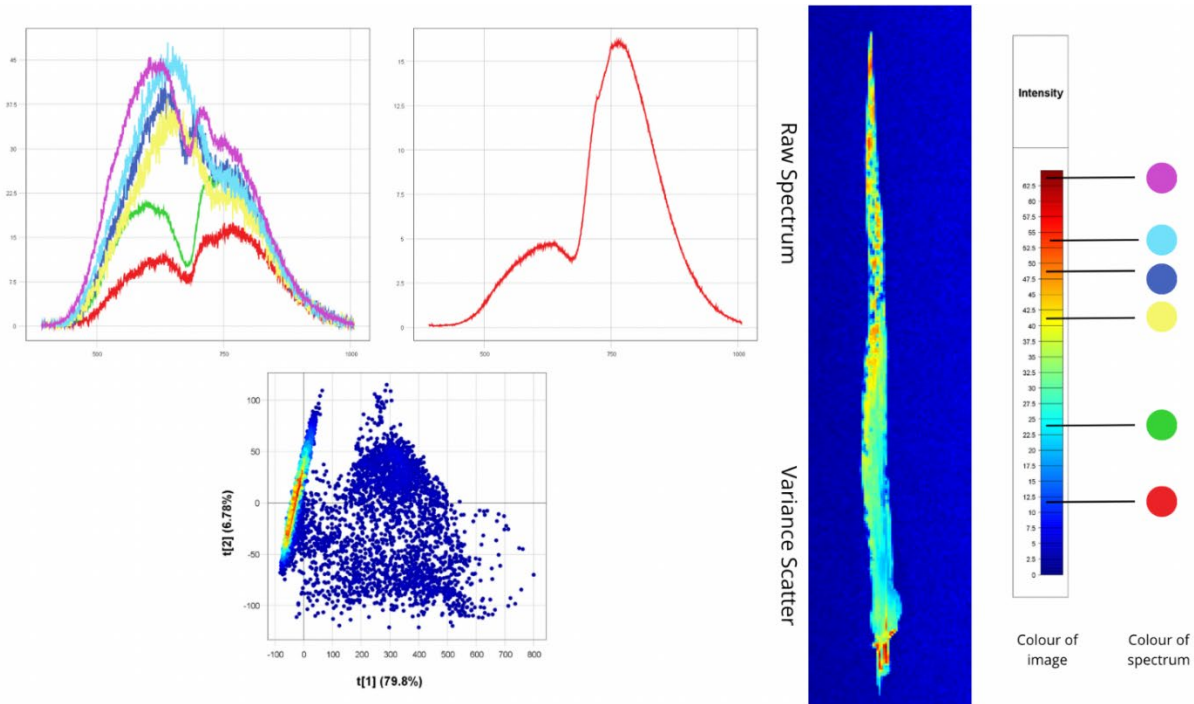


Note: Compiled by the author

Figure 15 clearly shows areas on barley leaves affected by leaf spot. Their manifestation is visualised as dark blue spots, mainly concentrated in the central part. These areas correspond to minimal reflectance intensity (typically recorded in the range of 7.5-10), which appears in varied colouration: for example, areas with the initial stage of leaf spot are coloured yellow and light

blue and have medium spectral intensity, while healthy leaf zones are displayed in red and have high reflectance. Despite the plant containing healthy tissues, the overall reflectance is usually low, which may be a result of the evident disease infection. The overall spectral profile is characterised by a distinct peak in the approximate range of 700 to 800 nm.

**Figure 15**  
Sample L: Leaf spot



Note: Compiled by the author

*Root rot*

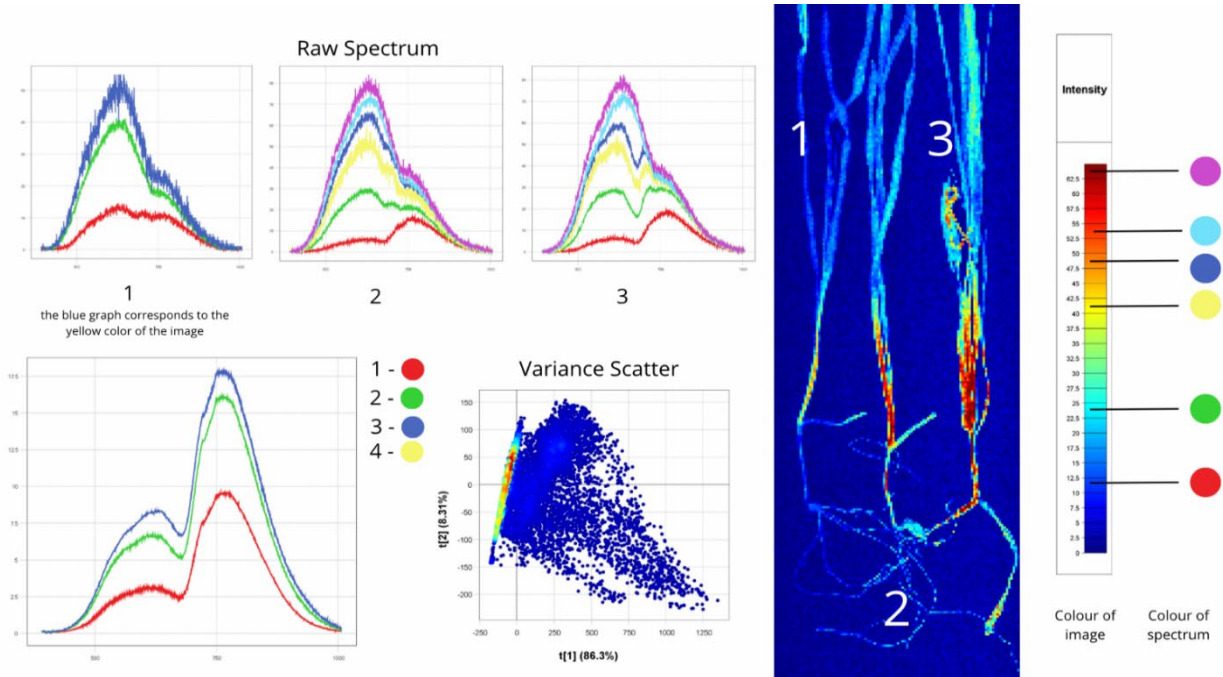
Figure 16 shows that the roots of all samples in the hyperspectral image are coloured blue, indicating infection with root rot. The first sample contains the fewest light areas along its entire length, which may indicate that its spectrum has the lowest intensity. The third sample, in turn, contains the greatest amount of healthy tissue, meaning its roots are less affected by the disease than the others; therefore, its spectrum has the highest intensity. Consequently, on the Variance Scatter diagram, the t[1] axis (86.3%) reflects the main share of variation (almost 90%) in terms of spectral data, while the t[2] axis (8.3%) captures additional differences.

Figure 17 depicts two plant roots affected by root rot. In the Raw Spectrum graphs, the spectra of infected zones (red curve) have low values – typically around 11. In the hyperspectral image itself, they are displayed in blue, while in the overall

graph, the second sample has a higher reflectance coefficient than the first, as it contains more areas with healthy tissue.

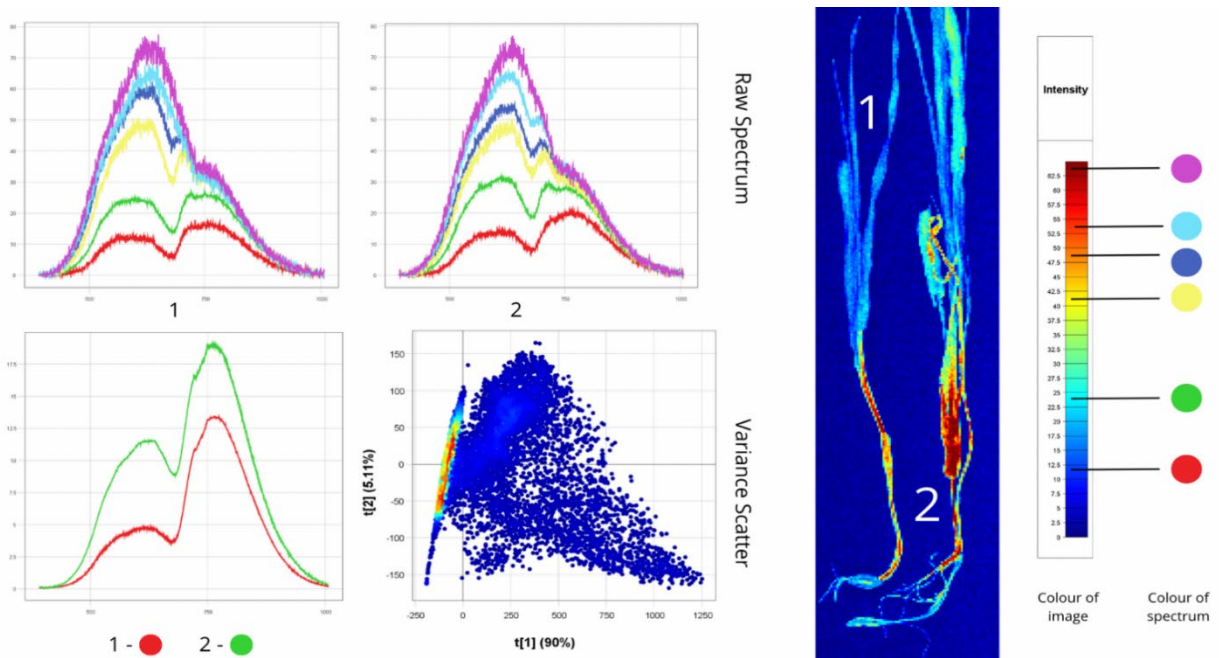
Figure 18 shows a single plant with signs of root rot on the roots. In the hyperspectral image, healthy and infected root sections can be clearly distinguished. It was established that healthy tissues correspond to red zones in the image, while areas of the root affected by rot are displayed in blue and light blue. This colour manifestation is particularly noticeable closer to the lower root branches. Analysis of the Raw Spectrum graphs shows characteristic peaks of reflected light intensity in different spectral ranges. The purple curve on the first graph represents healthy plant tissues and has a high reflectance value- approximately within 80 units – while infected tissues have significantly lower reflectance, most often not exceeding 18.

**Figure 16**  
*Sample M: Root rot*



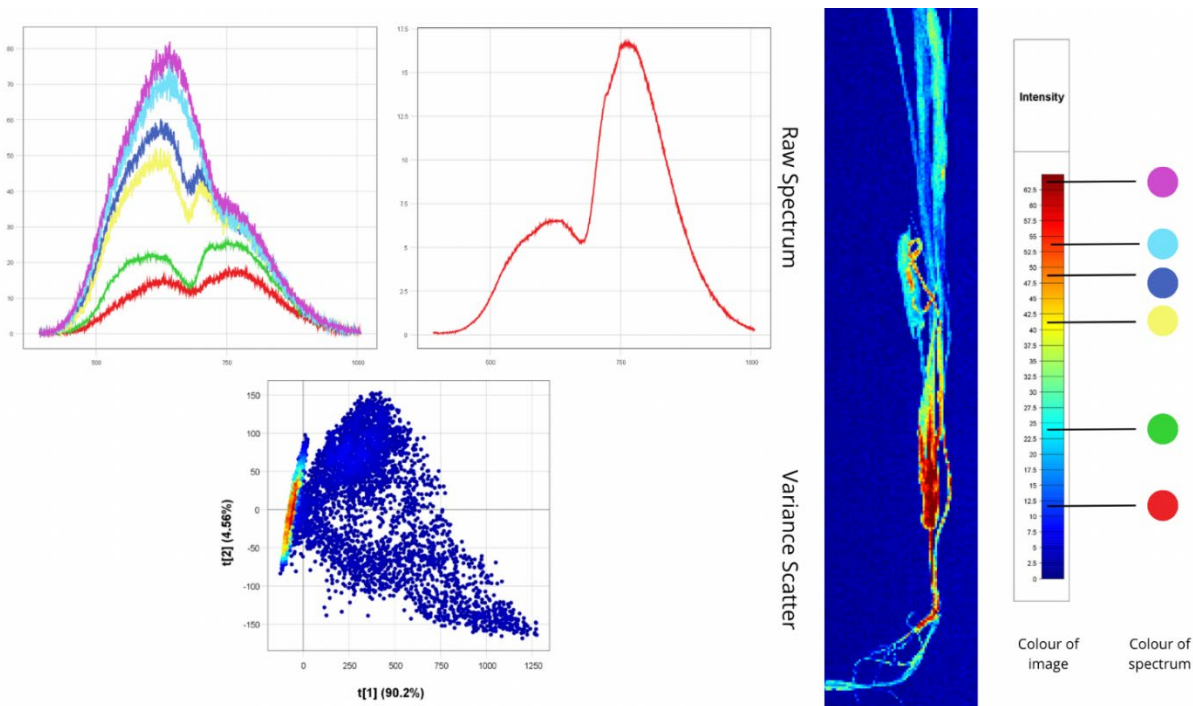
Note: Compiled by the author

**Figure 17**  
*Sample N: Root rot*



Note: Compiled by the author

**Figure 18**  
Sample O: Root rot



Note: Compiled by the author

Thus, it was found that, in general, the overall spectrum of a diseased plant has a maximum reflectance coefficient of 18, while the overall

spectrum of a healthy plant is characterised by a maximum reflectance coefficient around 30. Summarised data on spectral characteristics are presented in Table 1.

**Table 1**  
Spectral characteristics of barley

No	Type	Sample	Wavelength (nm)	Spectral reflectance (%)
1	Healthy		550-750	15-45
2	Loose smut	Sample A	500-780	10-18
		Sample B	500-780	10-18
		Sample C	500-750	8-20
		Sample D	500-780	8-21
		Sample E	500-800	10-20
3	Leaf spot	Sample G	500-800	4-23
		Sample I	500-780	13-30
		Sample J	500-780	5-30
		Sample K	600-780	11-30
4	Plant rust	Sample L	500-800	11-26
		Sample H	500-780	12-19
		Sample P	550-780	15-21
5	Root rot	Sample M	500-800	6-20
		Sample N	500-800	12-21
		Sample O	550-800	15-19

Note: Compiled by the author

For an objective interpretation of the obtained hyperspectral data, comprehensive statistical processing is required to identify patterns, quantitative differences, and statistically significant features of barley's reflective characteristics. Hyperspectral imaging generates a large volume of multidimensional data, necessitating the application of mathematical statistics methods for organisation, summarisation, and interpretation.

The statistical analysis in this study aimed to assess the distribution of spectral indicators and identify variability in reflectance at different wavelengths. Tables 2 and 3 present these statistical data for reflectance coefficient and wavelength, visualised in graphs in Images 19 and 20 using VisualizeFree.

The highest maximum reflectance is observed in the healthy sample due to the reflectance of healthy tissue saturated with the green pigment chlorophyll; the lowest is in leaf spot due to the low reflectance of dark, necrotic plant tissue. The mean reflectance value simplifies complex spectral data into a single numerical indicator, facilitating comparison between diseases. It was determined that samples with loose smut have the lowest mean value, as the disease is characterised by dark-coloured lesions reflecting little light. The highest mean among diseases was found in samples with initial stages of leaf spot, which has not yet progressed to necrosis and exhibits a yellow colour. The highest mean reflectance overall belongs to the healthy barley sample.

**Table 2**  
*Statistical indicators of reflectance and wavelengths*

Type	Sample	Spectral reflectance (%)							Wavelength (nm)			
		Min Reflectance	Max Reflectance	Mean Reflectance	Standard Deviation	CV	Median	Delta Reflectance	Min	Max	Spectral Bandwidth	Spectral Skewness
	Healthy	15	45	27.50	8.66	31.49	27.50	30	550	750	200	0.5
Loose smut	Sample A	10	18	14.00	2.31	16.50	14.00	8	500	780	280	0
	Sample B	5	18	12.00	3.75	31.27	12.00	13	500	780	280	-0.22
	Sample C	8	20	14.00	3.46	24.74	14.00	12	500	750	250	0
	Sample D	8	21	14.75	3.75	25.44	14.75	13	500	780	280	-0.03
	Sample E	10	20	15.00	2.89	19.25	15.00	10	500	800	300	0
Leaf spot	Sample G	4	23	15.50	5.48	35.39	15.50	19	500	800	300	-0.74
	Sample I	13	30	20.00	4.91	24.54	20.00	17	500	780	280	0.45
	Sample J	5	30	18.00	7.22	40.09	18.00	25	500	780	280	-0.16
	Sample K	11	30	20.75	5.48	26.43	20.75	19	500	780	280	-0.1
Plant rust	Sample L	11	26	18.50	4.33	23.41	18.50	15	500	800	300	0
	Sample H	12	19	15.25	2.02	13.25	15.25	7	500	780	280	0.24
	Sample P	15	21	18.00	1.73	9.62	18.00	6	470	780	310	0
Root rot	Sample M	6	20	14.00	4.04	28.87	14.00	14	500	800	300	-0.37
	Sample N	12	21	16.00	2.60	16.24	16.00	9	500	800	300	0.21
	Sample O	15	19	17.00	1.15	6.79	17.00	4	490	800	310	0

*Note:* Compiled by the author

Analysis of standard deviation helps assess the stability, predictability, and homogeneity of data in the study. The standard deviation values among the presented samples are low, confirming measurement reproducibility for each disease. For example, for sample O,  $\sigma = 1.15\%$ , meaning most values lie

within  $\pm 1.15\%$  of the mean. It was noted that the healthy barley sample exhibits moderate variability in the coefficient of variation, as healthy plant tissue has different reflectance depending on the area and the percentage of chlorophyll in the tissues. The

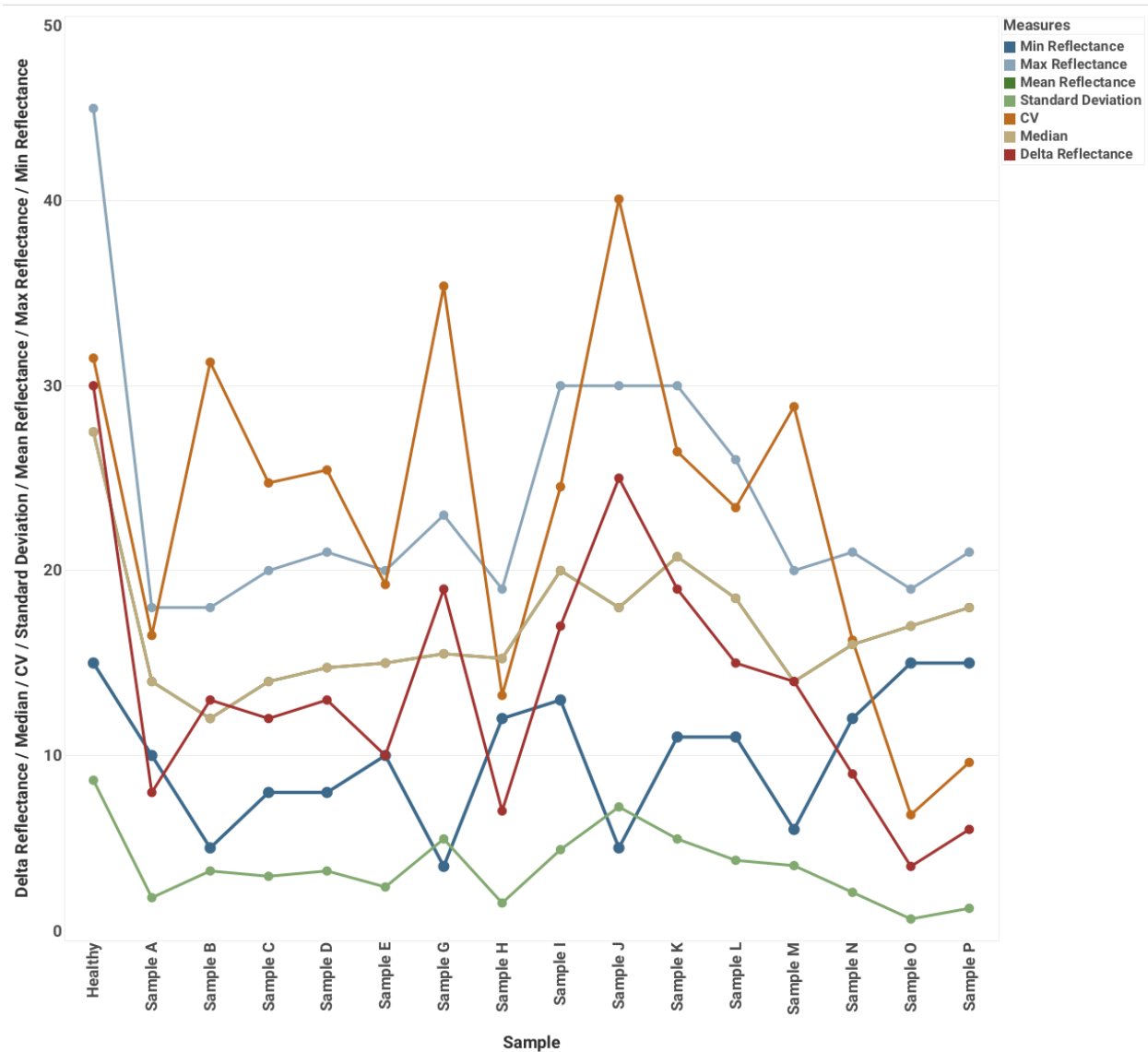
study of the reflectance of various plant parts affected to different degrees by barley disease pathogens showed that:

- samples with loose smut and root rot have low to medium values, depending on the degree of plant infection;

- samples with leaf spot have the highest values of the coefficient of variation, as different disease stages are characterised by varying degrees of reflectance;

- samples affected by rust have the lowest values, indicating data homogeneity and low disease variability.

**Figure 19**  
Visualisation of reflectance coefficient statistics



Note: Compiled by the author

Among all samples studied during the laboratory research, the highest value of reflectance delta is observed in healthy tissues, associated with varying chlorophyll content and,

consequently, different reflectance of plant areas. Among diseases, the highest reflectance deltas are observed in samples with leaf spot due to different stages of leaf infection, where initial stages have

a higher reflectance coefficient than those characteristic of necrosis stages. The most stable indicators were found in samples with rust and root rot.

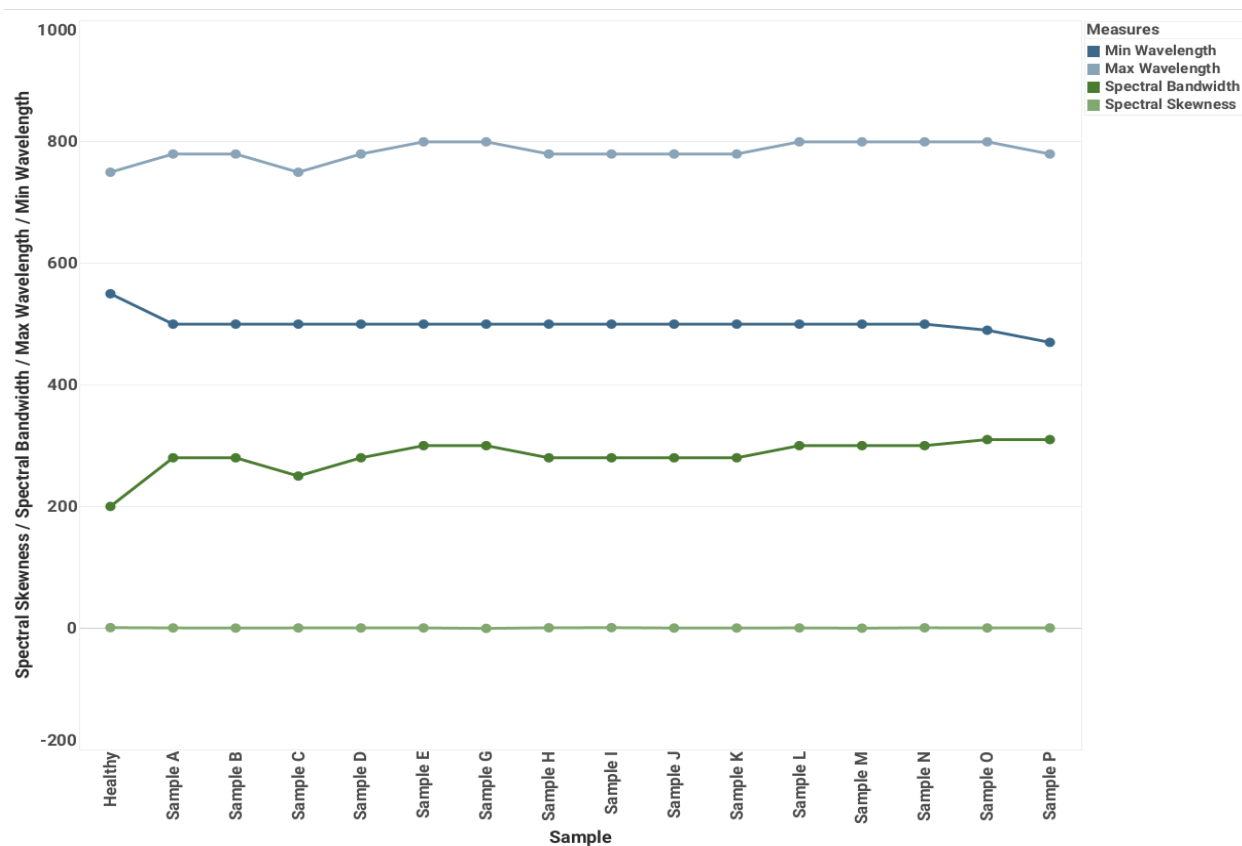
The healthy sample registers the narrowest range, as reflectance is concentrated in the photosynthetically active radiation (PAR) region. A narrow reflectance spectrum may indicate stable leaf structure and sufficient chlorophyll content, resulting in uniform energy reflectance. It was established that the spectral range widens in damaged or altered tissues. An increase in spectral bandwidth is observed primarily in diseased samples, indicating changes in pigment and tissue structure. It is also important to note the appearance of reflectance scattering at additional wavelengths, which is presumably associated with partial cell destruction and the emergence of atypical optical properties. Leaf spot leads to plant deterioration and causes mosaic tissue damage, where some areas are

healthy and others are necrotic. Obviously, loose smut, rust, and root rot have pigmentations different from healthy tissue; therefore, the changes induced by these diseases broaden the spectral range.

This leads to the possibility of determining that the highest value of the spectral band is mainly observed in samples with root rot. An important indicator, alongside those mentioned above, is spectral skewness. Skewness values greater than zero generally indicate a healthy overall plant condition, chlorophyll accumulation, and an active photosynthetic zone noted in the 700-800 nm range. It was noted that the identified spectral limit shifts to the left in the presence of damaged or degraded tissues, which is usually associated with reduced chlorophyll levels in these areas and a predominance of reflectance at shorter wavelengths. Such spectral skewness is often present precisely in diseased samples, which may serve as evidence of their pathogenic vulnerability.

**Figure 20**

*Visualisation of statistical wavelength data*



*Note:* Compiled by the author

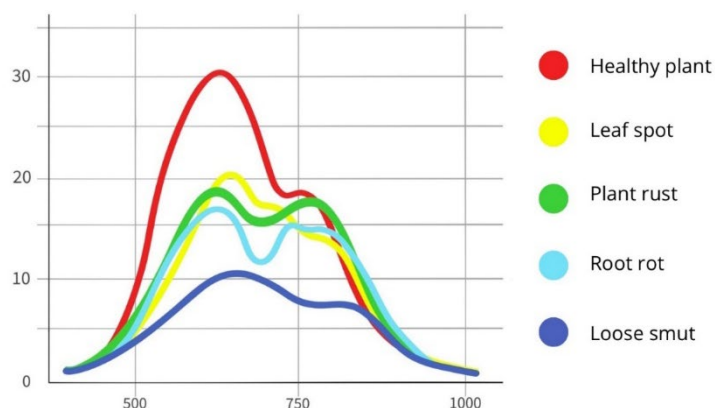
Hyperspectral visualisation can identify pathogens and determine their molecular structure. The dark colour of fungal plant diseases may be due to adaptation for spore dispersal and survival in field conditions. While there is no comprehensive scientific data on melanin content in loose smut to date, the dark colour may be due to the presence of this pigment, as in *Podospora anserina* (Gautier et al., 2021), *Pestalotiopsis microspora* (Yu et al., 2015), and *Ustilago maydis* (Reyes-Fernández et al., 2021). Melanin can protect fungal spores from UV radiation, increase resistance to desiccation, and thicken spore cell walls; due to its dark colour, loose smut absorbs more light than it reflects, so the spectra of plant parts affected by fungi will be sharply distinguished by reduced intensity. Plant rust is caused by the fungus *Puccinia graminis*, which typically spreads spores with melanin-like pigments. Urediniospores contain flavonoid derivatives and carotenoids, such as  $\beta$ -carotene and  $\gamma$ -carotene (Davoli et al., 2002), which protect spores from UV radiation and oxidative processes and impart a rusty colour. Teliospores, in turn, may contain melanin-like pigments, as genes encoding laccase-like proteins (Tao et al., 2017) and laccase enzymes (Zhan et al., 2023) have been identified in rust-causing fungi, which is why rust can appear brown or dark. The principle and possibility of differentiating these lesions from other diseases are interesting, manifested as separately located blue

areas in the hyperspectral image. Regarding root rot, it was found to have dark pigments, making it noticeable by low spectral intensity in the root area. Dark pigments may help pathogenic fungi cause rot, as in the case of white rot (Lujan et al., 2016), promote fungal survival in soil as with black root rot (Netherway et al., 2024), and possess toxicity. Research on enhanced melanin production in studies within this thematic area allowed the authors to establish that the obtained results correlate with an increase in the number of fungal genomes in wheat roots and an intensification of disease symptoms (Aranda et al., 2023; Henson et al., 1999). It was also established that leaf spot in the initial stage, during chlorophyll destruction, has a yellow colour that can be confused with healthy plant tissue; however, with the accumulation of metabolites and necrosis, pigmented spots of brown and dark colours appear. It was determined that in hyperspectral imaging, leaf spot can be differentiated by the presence of blue dots on leaf tips.

Image 21 presents a combined comparative graph of reflectance spectra. The spectrum of the healthy plant shows the highest reflectance. The spectrum of leaf spot has the highest reflectance among all diseases due to disease variability, while the spectrum of loose smut is characterised by the lowest intensity.

Image 22 demonstrates the difference in spectra between a healthy and a diseased plant.

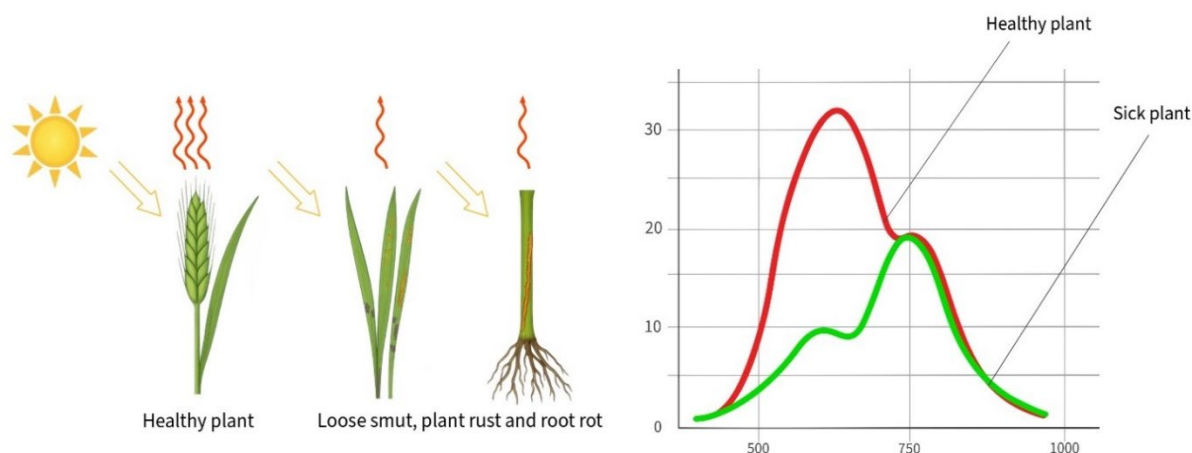
**Figure 21**  
Comparative graph of reflectance spectra



Note: Compiled by the author

**Figure 22**

*A comparative image reflecting the difference between a healthy and a diseased plant*



*Note:* Compiled by the author

The conducted research clearly shows that healthy plant tissue has a high reflectance coefficient due to the green pigment chlorophyll and the white areas of the root base. This is because chlorophyll actively absorbs light in the blue and red ranges (400-500 nm and 600-700 nm) and reflects well in the green range of the visible spectrum (500-600 nm), as well as in the near-infrared range (from 700 nm). It was also established that in the near-infrared range (700-800 nm), chlorophyll does not absorb light, so most of the radiation is reflected by leaf tissues. Moreover, in diseased plants, reflectance decreases across the entire range due to disruption of the overall epidermis structure, darkening of areas, destruction of mesophyll, suppression of chlorophyll synthesis, and lack of photosynthetic activity, which blocks light reflectance.

In general, hyperspectral visualisation allows for the differentiation of healthy and infected barley samples. A healthy plant demonstrates a high level of reflectance, while infected samples are characterised by reduced reflectance and increased spectral variability. It is important to note that the severity of these changes depends on the nature and localisation of the disease: for example, loose smut, rust, and root rot cause systemic disorders, leading to a sharp decrease in reflectance and tissue degradation. Leaf spot, on the other hand, forms a mosaic structure in the late stages of the disease,

manifested in high spectral heterogeneity and variability.

Thus, hyperspectral imaging serves as an effective tool for early and non-destructive detection of phytopathological conditions, enabling precise monitoring of plant physiological status and prompt response to threats in agroecosystems.

### Conclusion

One of the main challenges in agriculture is the inability to achieve early disease diagnosis. Plant infections often remain undetected for long periods, as the parasite's mycelium spreads diffusely within the host plant without causing external changes. In this context, hyperspectral imaging enables disease identification at early stages, preventing its further spread. By studying the spectral characteristics of barley diseases such as loose smut, leaf spot, and root rot, it was revealed that plant areas infected or desiccated have a low reflectance coefficient, initial disease stages have a medium coefficient, and healthy tissue exhibits high spectral intensity.

In hyperspectral images, diseased plant areas are displayed in blue, areas with still-living but already infected tissue appear in yellow, while healthy plant areas are shown in orange, red, and burgundy. It was found that spectra from healthy areas possess high intensity compared to spectra from disease-affected

zones. This is because healthy tissue contains the green pigment chlorophyll, which actively reflects light. The destruction of the epidermis structure, loss of moisture, tissue necrosis, and darkening lead to a pronounced decrease in reflected light intensity. Barley diseases like loose smut, rust, and root rot contain spores with melanin-like pigments. These cause the decay of healthy tissues, suppress the activity of photosynthetic systems, and absorb more light than they reflect. It becomes evident that these diseases can be primarily identified by the reduced reflectance coefficient of infected plant parts. The study of leaf spot at its initial stage showed that during chlorophyll destruction, these lesions exhibit a yellow colour, which can be mistaken for healthy plant tissue. As metabolites accumulate and necrosis develops, pigmented spots of brown and dark colours appear, resulting in high variability in the spectra of this disease. It was established that leaf spot can be differentiated by the non-uniform intensity of spectra detected across different parts of the plant; consequently, a distinguishing feature of all phytopathologies can be considered the overall reduction in the plant's reflective capacity.

The obtained data on barley's spectral profiles position hyperspectral imaging as a method for monitoring barley agrocenoses. It enables the differentiation of phytopathologies, detailed analysis of crop conditions at the level of individual plants, and the detection of anomalies before the manifestation of external symptoms. Further

developments in this area will allow for targeted application of protective agents, reduced pesticide expenditures, and decreased environmental impact. Thus, hyperspectral imaging represents a crucial tool for precision agriculture, aimed at the sustainable and efficient management of barley crops.

### Funding

This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP23485162 “Development of an innovative method for monitoring and early diagnosis of grain crop diseases using hyperspectral sensing technology”).

### Author contribution

*The manuscript was written through contributions of all authors. All authors have given approval to the final version of the manuscript: Conceptualisation, Ualiyeva R.M.; Methodology, Diyanchuk N.A.; Software, Kaverina M.M.; Formal Analysis, Diyanchuk N.A.; Investigation, Kaverina M.M.; Resources, Zhangazin S.B.; Data Curation, Zhangazin S.B.; Writing – Original Draft Preparation, Osipova A.V.; Writing – Review & Editing, Tuyakbayeva A.U.; Visualisation, Osipova A.V.; Supervision, Ualiyeva R.M.; Project Administration, Tuyakbayeva A.U.; Funding Acquisition, Ualiyeva R.M.*

### References

- Thomas, S., Behmann, J., Steier, A., et al. (2018). Quantitative assessment of disease severity and rating of barley cultivars based on hyperspectral imaging in a non-invasive, automated phenotyping platform. *Plant Methods*, 14, 45. <https://doi.org/10.1186/s13007-018-0313-8>
- Zhou, R.-Q., Jin, J.-J., Li, Q.-M., Su, Z.-Z., Yu, X.-J., Tang, Y., Luo, S.-M., He, Y., & Li, X.-L. (2019). Early detection of Magnaporthe oryzae-infected barley leaves and lesion visualization based on hyperspectral imaging. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1962. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01962>
- Senthilkumar, T., Jayas, D. S., White, N. D. G., Fields, P. G., & Gräfenhan, T. (2016). Detection of fungal infection and ochratoxin A contamination in stored barley using near-infrared hyperspectral imaging. *Biosystems Engineering*, 147, 162-173. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.03.010>
- Kuska, M. T., Brugger, A., Thomas, S., Wahabzada, M., Kersting, K., Oerke, E.-C., Steiner, U., & Mahlein, A.-K. (2017). Spectral patterns reveal early resistance reactions of barley against *Blumeria graminis f. sp. hordei*. *Phytopathology*, 107(11), 1388–1398. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-17-0128-R>
- Kuška, M. T. (2017). *Hyperspectral imaging for non-invasive characterization of barley resistances to powdery mildew* (Doctoral dissertation). Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Universitäts- und Landesbibliothek Bonn. URN: urn:nbn:de:hbz:5n-49015
- Yu, K., Leufen, G., Hunsche, M., Noga, G., Chen, X., & Bareth, G. (2014). Investigation of leaf diseases and estimation of chlorophyll concentration in seven barley varieties using fluorescence and hyperspectral indices. *Remote Sensing*, 6(1), 64-86. <https://doi.org/10.3390/rs6010064>

Su, W.-H., Yang, C., Dong, Y., Johnson, R., Page, R., Szinyei, T., Hirsch, C. D., & Steffenson, B. J. (2021). Hyperspectral imaging and improved feature variable selection for automated determination of deoxynivalenol in various genetic lines of barley kernels for resistance screening. *Food Chemistry*, 343, 128507. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128507>

Brugger, A., Schramowski, P., Paulus, S., Steiner, U., Kersting, K., & Mahlein, A.-K. (2021). Spectral signatures in the UV range can be combined with secondary plant metabolites by deep learning to characterize barley–powdery mildew interaction. *Plant Pathology*, 70(7), 1572-1582. <https://doi.org/10.1111/ppa.13411>

Kuska, M., Wahabzada, M., Leucker, M., Dehne, H.-W., Kersting, K., Oerke, E.-C., Steiner, U., & Mahlein, A.-K. (2015). Hyperspectral phenotyping on the microscopic scale: Towards automated characterization of plant-pathogen interactions. *Plant Methods*, 11, 28. <https://doi.org/10.1186/s13007-015-0073-7>

Thomas, S., Wahabzada, M., Kuska, M. T., Rascher, U., & Mahlein, A.-K. (2016). Observation of plant–pathogen interaction by simultaneous hyperspectral imaging reflectance and transmission measurements. *Functional Plant Biology*, 44(1), 23-34. <https://doi.org/10.1071/FP16127>

State Standard 12044-93. (2011). *Methods for Determining Disease Contamination*. Standartinform: Moscow. p. 57.

Ualiyeva, R. M., Kaverina, M. M., Osipova, A. V., Kairbayev, Y. B., Zhangazin, S. B., Iksat, N. N., & Mapitov, N. B. (2025). VNIR hyperspectral signatures for early detection and machine-learning classification of wheat diseases. *Plants*, 14(23), 3644. <https://doi.org/10.3390/plants14233644>

Gautier, V., Levert, E., Giraud, T., & Silar, P. (2021). Important role of melanin for fertility in the fungus *Podospora anserina*. *G3: Genes | Genomes | Genetics*, 11(8). <https://doi.org/10.1093/g3journal/jkab159>

Yu, X., Huo, L., Liu, H., Chen, L., Wang, Y., & Zhu, X. (2015). Melanin is required for the formation of the multi-cellular conidia in the endophytic fungus *Pestalotiopsis microspora*. *Microbiological Research*, 179, 1-11.

Reyes-Fernández, E. Z., Shi, Y.-M., & Grün, P. (2021). An unconventional melanin biosynthesis pathway in *Ustilago maydis*. *Applied and Environmental Microbiology*. <https://doi.org/10.1128/AEM.01510-20>

Davoli, P., & Weber, R. W. (2002). Identification and quantification of carotenoid pigments in aeciospores of the daisy rust fungus *Puccinia distincta*. *Phytochemistry*, 60(3), 309-313. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(02\)00120-6](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(02)00120-6)

Tao, S. Q., Cao, B., Tian, C. M., et al. (2017). Comparative transcriptome analysis and identification of candidate effectors in two related rust species (*Gymnosporangium yamadae* and *Gymnosporangium asiaticum*). *BMC Genomics*, 18, 651. <https://doi.org/10.1186/s12864-017-4059-x>

Zhan, G., Guo, J., Tian, Y., et al. (2023). High-throughput RNA sequencing reveals differences between the transcriptomes of the five spore forms of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*, the wheat stripe rust pathogen. *Stress Biology*, 3, 29. <https://doi.org/10.1007/s44154-023-00107-z>

Lujan, P., Sanogo, S., & Puppala, N. (2016). Factors affecting mycelium pigmentation and pathogenicity of *Sclerotinia sclerotiorum* on Valencia peanut. *Canadian Journal of Plant Science*. <https://doi.org/10.1139/cjps-2015-0258>

Netherway, T., Bengtsson, J., Buegger, F., Fritscher, J., Oja, J., Pritsch, K., Hildebrand, F., Krab, E. J., & Bahram, M. (2024). Pervasive associations between dark septate endophytic fungi with tree root and soil microbiomes across Europe. *Nature Communications*, 15, 159. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44172-4>

Aranda, C., Méndez, I., & Barra, P. J. (2023). Melanin induction restores the pathogenicity of *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* in wheat plants. *Journal of Fungi*, 9(3), 350. <https://doi.org/10.3390/jof9030350>

Henson, J. M., Butler, M. J., & Day, A. W. (1999). The dark side of the mycelium: Melanins of phytopathogenic fungi. *Annual Review of Phytopathology*, 37, 447-471. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.37.1.447>

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

Ualiyeva Rimma Meyramovna (corresponding author) – PhD, Professor of the Department of Biology and Ecology, Toraighyrov University (Pavlodar, Kazakhstan, e-mail: ualiyeva.r@gmail.com).

Osipova Anastasiya Vyacheslavovna – Master's degree student, Department of Biology and Ecology, Toraighyrov University (Pavlodar, Kazakhstan, e-mail: aanastasiyaaa@internet.ru).

Diyanchuk Nikita Aleksandrovich – Bachelor's degree student, Department of Biology and Ecology, Toraighyrov University (Pavlodar, Kazakhstan, e-mail: nik.diyanchuk@gmail.com).

Kaverina Mariya Mikhailovna – Master of Natural Sciences, Junior Researcher at the Department of Biology and Ecology, Toraighyrov University (Pavlodar, Kazakhstan, e-mail: k.ma96@mail.ru).

Zhangazin Sayan Berikovich – PhD, Associate Professor, Acting Deputy Director for Research at the Institute of Natural Sciences, L.N. Gumilyov Eurasian National University (Astana, Kazakhstan, e-mail: sayanzhangazin@gmail.com).

Tuyakbayeva Akmaral Userkhanovna – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Biotechnology and Microbiology, L.N. Gumilyov Eurasian National University (Astana, Kazakhstan, e-mail: akmaral.t@inbox.ru).

#### **Авторлар туралы мәлімет:**

Уалиева Римма Мейрамовна (корреспонденттік автор) – PhD, «Биология және экология» кафедрасының профессоры, Торайғыров университеті (Павлодар, Қазақстан, e-mail: ualiyeva.r@gmail.com).

Осипова Анастасия Вячеславовна – магистрант, «Биология және экология» кафедрасы, Торайғыров университеті (Павлодар, Қазақстан, e-mail: aanastasiyaaa@internet.ru).

Диянчук Никита Александрович – бакалавриат студенті, «Биология және экология» кафедрасы, Торайғыров университеті (Павлодар, Қазақстан, e-mail: nik.diyanchuk@gmail.com).

Каверина Мария Михайловна – жаратылыстану ғылымдарының магистрі, «Биология және экология» кафедрасының кіші ғылыми қызметкері, Торайғыров университеті (Павлодар, Қазақстан, e-mail: k.ma96@mail.ru).

*Жангазин Саян Берикович – PhD, қауымдастырылған профессор, Жаратылыстану ғылымдары институты директорының ғылыми жұмыс жөніндегі орынбасары м.а., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті (Астана, Қазақстан, e-mail: sayanzhangazin@gmail.com).*

*Туякбаева Акмарал Усерхановна – биология ғылымдарының кандидаты, «Биотехнология және микробиология» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті (Астана, Қазақстан, e-mail: aktmaral.t@inbox.ru).*

**Сведения об авторах:**

*Уалиева Римма Мейрамовна (автор-корреспондент) – PhD, профессор кафедры «Биология и экология», Торайғыров университет (Павлодар, Казахстан, e-mail: ualiyeva.r@gmail.com).*

*Осипова Анастасия Вячеславовна – магистрант, кафедра «Биология и экология» Торайғыров университета (Павлодар, Казахстан, e-mail: aanastasiyaaa@internet.ru).*

*Диянчук Никита Александрович – студент бакалавриата, кафедра «Биология и экология», Торайғыров университет (Павлодар, Казахстан, e-mail: nik.diyanchuk@gmail.com).*

*Каверина Мария Михайловна – магистр естественных наук, младший научный сотрудник кафедры «Биология и экология», Торайғыров университет (Павлодар, Казахстан, e-mail: k.ma96@mail.ru).*

*Жангазин Саян Берикович – PhD, ассоциированный профессор, и.о. заместителя директора по научной работе института Естественных наук, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева (Астана, Казахстан, e-mail: sayanzhangazin@gmail.com).*

*Туякбаева Акмарал Усерхановна – кандидат биологических наук, ассоциированный профессор кафедры «Биотехнология и микробиология», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева (Астана, Казахстан, e-mail: aktmaral.t@inbox.ru).*

*Received December 22, 2025*

*Accepted June 15, 2026*

2-бөлім  
**ЗООЛОГИЯ**

---

Section 2  
**ZOOLOGY**

---

Раздел 2  
**ЗООЛОГИЯ**

FTAMP 34.33.33; 69.01.77

<https://doi.org/10.26577/bb107220265>

**С.Е. Шарахметов<sup>1</sup>**, **Ж.М. Бакқожа<sup>1,2</sup>**,  
**Н.С. Сапарғалиева<sup>1\*</sup>**, **А.Т. Сатбек<sup>1,2</sup>**

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

<sup>2</sup>ЖШС «Балық шаруашылығы ғылыми-өндірістік орталығы», Алматы, Қазақстан

\*e-mail: sapargalyeva.nazym@gmail.com

**ҚАПШАҒАЙ СУ ҚОЙМАСЫНДАҒЫ  
ҚАРАКӨЗ *RUTILUS CASPICUS* (YAKOVLEV 1870)  
ПОПУЛЯЦИЯСЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ  
ЖӘНЕ КЕҢІСТІКТЕГІ ТАРАЛУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ**

Мақалада 2024 жылы жүргізілген ихтиологиялық зерттеулердің деректері негізінде Қапшағай су қоймасында қаракөз популяциясының құрылымдық сипаттамалары, оның ішінде жастық құрамы, ұзындық-салмақтық көрсеткіштері және жыныстық құрылымы қарастырылған. Ауланған даралардың ұзындық мәнделері 89–323 мм аралығында ауытқыса, популяциясы бойынша орташа ұзындығы 193 мм құрады. Үлкен салмағы бойынша 11–622 г аралығында ауытқып, орташа көрсеткіші 163 г сәйкес келді. Зерттеу нәтижелеріне сәйкес қаракөз балықтарының жастық қатары 2–8 жас аралығын құраса, олардың 4–6 жастағы дараларының үлесі басым болды. Ұзындық құрамы бойынша модальды класты 150–199 және 200–249 мм ұзындықтағы даралар құраса, салмақтық құрылымы тиісінше 120–179 және 180–239 г аралығындағы даралардың үлесіне тиесілі болды. Аталған сипаттамалар қаракөз балықтарының 30 мм ұяшықты ғылыми ауларға жиі түсуімен де расталады. Кейінгі жылдары аталған су қоймада қаракөз популяциясының құрылымдық көрсеткіштері жоғарылағаны байқалады.

Ғылыми аулардың талдау нәтижесіне сәйкес көктемнен күзге қарай қаракөз балықтарының саны жоғарылайды. Интерполяциялық әдіс бойынша қаракөз популяциясының кеңістіктегі маусымдық таралу динамикасы анықталды. Көктем айларында қаракөз популяциясының кеңістіктегі таралуы Қапшағай су қоймасының оң жағалау акваториясында байқалса, ал жаз және күз мезгілдерінде олардың шоғырлануы сол жағалау акваториясының өзен сағалары маңында болатындығы анықталды. Балықтардың кеңістіктегі маусымдық таралу ерекшелігі де шоғырланған аймақтардағы қоректік базасының жоғары деңгейімен және де басқа да биотикалық факторламен байланысты болуы ықтимал.

**Түйін сөздер:** Қапшағай су қоймасы, қаракөз, жастық қатары, ұзындық-салмақтық көрсеткіштері, жыныстық құрамы, таралуы, интерполяция.

S.E. Sharakhmetov<sup>1</sup>, Zh.M. Bakkozha<sup>1,2</sup>,  
N.S. Sapargaliyeva<sup>1\*</sup>, A.T. Satbek<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>LLP «Fisheries Research and Production Center», Almaty, Kazakhstan

\*e-mail: sapargalyeva.nazym@gmail.com

**Features of the structure and spatial distribution of the roach population  
*Rutilus caspicus* (Yakovlev 1870) in the Kapshagay reservoir**

The article presents the structural features of the roach population in the Kapshagay Reservoir (age composition, size weight indicators, sex composition) based on ichthyological studies in 2024. The length of these captured individuals ranged from 89 to 323 mm and averaged 193 mm. Weight varied from 11 to 622 g with an average of 163 g. The roach was, in fact, two to eight years of age, but most were four to six years old.

Size structure analysis showed the modal length size classes of 150–209 mm and 200–249 mm to be most common and weight size classes of 120–179 g and 180–239 g to be most common. The high frequency of roach catches in the scientific nets (30 mm mesh) supports these findings. In recent years, we have been observing positive trends concerning the structural characteristics of the roach population in the reservoir.

Catches were studied and showed an increase in the roach from spring to autumn. The interpolation method was used to analyze its seasonal spatial distribution, which is the population. In spring, roach was overwhelmingly located in the right bank water area of the reservoir; in summer and autumn, nearly

all were in the river mouth region of the left bank. In these regions, this distribution pattern is probably influenced by food resource availability and different abiotic factors.

**Keywords:** Kapshagay reservoir, roach, age series, size-age indicators, sex composition, distribution, interpolation.

С.Е. Шарахметов<sup>1</sup>, Ж.М. Баккожа<sup>1,2</sup>,  
Н.С. Сапарғалиева<sup>1\*</sup>, А.Т. Сатбек<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан  
<sup>2</sup>ТОО «Научно-производственный центр рыбного хозяйства», Алматы, Казахстан  
\*e-mail: sapargalyevanazym@gmail.com

### Особенности структуры и пространственного распределения популяции воблы *Rutilus caspicus* (Yakovlev 1870) в Капшагайском водохранилище

В статье рассматриваются структурные характеристики популяции воблы Капшагайского водохранилища, включая возрастной состав, размерно-весовые показатели и половую структуру, на основе данных ихтиологических исследований, проведённых в 2024 году. Длина выловленных особей варьировала от 89 до 323 мм, со средним значением 193 мм. Масса рыб составляла от 11 до 622 г, при среднем весе 163 г. Возраст воблы колебался от 2 до 8 лет, при этом преобладающая часть популяции относилась к возрастной группе 4–6 лет.

Анализ размерной структуры показал, что наиболее многочисленными были особи с длиной, соответствующей модальным классам 150<sup>-199</sup> и 200<sup>-249</sup> мм, а по массе – в диапазоне 120<sup>-179</sup> и 180<sup>-239</sup> г. Эти данные подтверждаются высокой частотой поимки воблы в научные сети с ячеей 30 мм. В последние годы отмечается положительная динамика структурных характеристик популяции воблы в водохранилище.

Исследование уловов выявило увеличение численности воблы от весны к осени. Пространственное распределение популяции в разные сезоны анализировалось методом интерполяции. Установлено, что весной вобла концентрировалась преимущественно в правобережной акватории водохранилища, тогда как летом и осенью её основная часть смещалась к устьям рек в левобережной зоне. Вероятно, такая динамика обусловлена доступностью кормовых ресурсов в этих районах, а также влиянием различных абиотических факторов.

**Ключевые слова:** Капшагайское водохранилище, вобла, возрастной ряд, размерно-возрастные показатели, половой состав, распределение, интерполяция.

### Кіріспе

Қапшағай су қоймасы – трансшекаралық Іле өзенінің ортаңғы ағысынан құрылған, Қазақстандағы ірі жасанды суқоймаларының бірі (Турсунов және басқалары, 2014). Бүгінгі таңда оның ауданы 1250 км<sup>2</sup>, су көлемі 14,5 км<sup>3</sup> құрайды, ал су деңгейі 476,5–478,6 м (БЖ) биіктігінде тұрақталып тұр. Су қойманы жоспарлау кезінде жыл сайын 2,8 мың тонна кәсіптік балықтарды, оның ішінде 1/3 бөлігін сазан аулау болжанған. Алайда, су қойманың нақты кәсіптік өнімділік мүмкіндігі бұл шамаға жетпеді, тек 1977 және 2003 жылдары ауланым мөлшері белгіленген шаманың жартысын ғана құрады және оның басым бөлігі тыран балықтарының үлесіне тиді (Исмуханов және басқалары, 2021). Жерсіндіру жұмыстары және кездейсоқ ену нәтижесінде қазіргі кезде Қапшағай су қоймасының ихтиофаунасында балықтардың 33 түрі мекендейді. Олардың 80% астамы бұл бассейн үшін бөгде түрлер (Токсабаева және басқалары, 2024) болып табылады және жыл сайын олардың саны

өсуде (Mamilov et al., 2021). Балықтардың түрлік құрамы ішінде 10 түрі кәсіптік мақсатта игеріледі. Оның ішінде қаракөз балығы кәсіптік болғанымен, мөлшерінің кішілігіне байланысты су қоймада аз игеріледі. Негізінен үлкен көлемдегі даралары ауланады. Соңғы жылдары Қапшағай су қоймасында қаракөз балықтарының ғылыми және жергілікті балықшылардың ауларында саны жоғарылап келеді.

Қаракөз *Rutilus caspicus* (Yakovlev 1870) – Балқаш-Іле бассейні су айдындарына 1965 жылы Билікөлден (Талас өзені бассейні) әкеліп жерсіндірілді. Нәтижесінде жақсы бейімделіп, Балқаш көлі, Іле өзені, сонымен қатар Қапшағай су қоймасы бойынша таралу аймағы кеңейе түсті. Қапшағай су қоймасында кәсіпшілік ауланымда ең алғаш 1975 жылы, яғни Іле өзеніне плотина құрылғаннан кейін кездесе бастады. 1980 жылы ол бақылау ауларында саны бойынша төртінші орында болса, ал кәсіпшілік балық аулауда алтыншы орынды иеленген (Дукровец, 1987).

Популяцияның динамикасын жүйелік тәсілмен зерттеу популяциялардың мөлшері мен



**Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау**

2024 жылы Қапшағай суқоймасынан көктем, жаз және күз айларында ғылыми құрма аулардың көмегімен әртүрлі ұзындық-салмақтық көрсеткіштегі және жастық қатардағы қаракөз балықтарының 791 данасы ауланды. Ауланған даралардың

ұзындық мәндері 89-323 мм аралығында ауытқыса, популяциясы бойынша орташа ұзындығы 193 мм құрады. Үлкен салмағы бойынша 11-622 г аралығында ауытқып, орташа көрсеткіші 163 г сәйкес келді. Фультон бойынша қондылық коэффициентінің мәні 1,37-3,34 аралығында болып, орташасы 2,02 индекске сәйкес келді (1-кесте).

**1-кесте**

*Қапшағай су қоймасындағы қаракөз балығы популяциясының негізгі биологиялық көрсеткіштері, 2024 жыл*

Жасы	Ұзындығы, мм		Салмағы, г		Fulton қондылығы	N	Үлесі, %
	мин-макс	орташа	мин-макс	орташа			
2	8,9-11,4	10,2	11-47	21	1,92	21	2,7
3	11,5-14,9	13,5	26-86	47	1,93	90	11,4
4	15,0 – 18,3	16,8	49-167	95	2,02	147	18,6
5	18,4-21,8	20,2	96-276	172	2,12	353	44,6
6	21,9-25,3	23	187-381	249	2,04	158	20,0
7	25,5-28,6	26,9	359-542	447	2,31	19	2,4
8	29,3-32,3	30,7	492-622	576	2,09	3	0,4
<b>Жалпы</b>	8,9-32,3	19,3	11-622	163	2,11	791	100

Жалпы еліміздің су айдындарында қаракөз балықтарының Фультон бойынша қондылық коэффициенті 1,37-3,34 болуы, олардың қоректену жағдайының қанағаттанарлық екендігін растайды (Дукровец, 1982а). 2024 жылғы Қапшағай суқоймасындағы қаракөз популяциясының қоректік жағдайы қалыпты екендігін айтуға болады. Сонымен қатар, балықтың жастық қатары өскен сайын орташа коэффициент мәні де жоғарылайды. Бұл жағдай ересек даралардың қоректік қатынасының жоғары болуымен түсіндіріледі.

Қаракөз балықтарының жастық қатары 2-8 жас аралығын құраса, олардың 5+ жастағы дараларының үлесі (44,6%) жоғары болды. Ал популяциядағы 4+ (18,6%) және 6+ (20,0%) жастағы даралары субдоминанттылық топқа кірді. Соңғы онжылдағы Қапшағай су қоймасындағы қаракөз балығы популяциясының жастық қатары динамикасын қарайтын болсақ, 2015-2016 жылдары ауланымда 11-12 жастағы даралары тіркелсе, одан кейінгі жылдары біртіндеп кішіреюі байқалады. Алайда, жастық құрылым бойынша 2-4 жастағы даралары модальды класты көрсетсе,

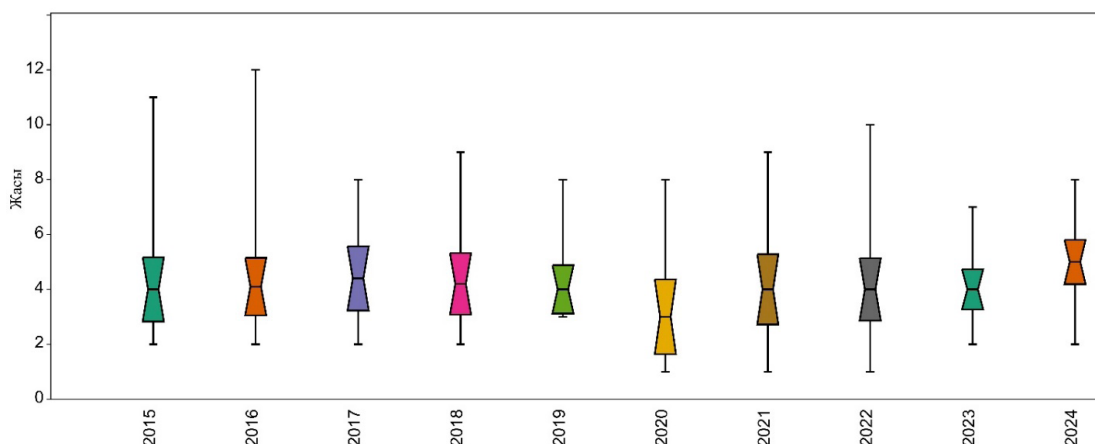
2024 жылы бұл диапазон жоғарылап, мода 4-6 жасты құрады (2-сурет).

Соңғы жылдары Қапшағай су қоймасында қаракөз балығы ғылыми аулауда көп кездескенімен, алайда, оның кәсіптік қорлары нашар игеріледі. Оның себебі су қоймада рұқсат етілген негізгі балық аулау құралдарының төменгі өлшемі 55 мм және одан жоғары, ал бұл өлшемдер қаракөз балығының тек денесінің ұзындығы 26 см-ден асатын және салмағы 400 г-нан жоғары болатын дараларын ғана ұстай алады. Балықтар популяцияларының құрылымындағы өзгерістердің бірнеше салдары болады. Себебі жастық қатары ұлғайса, популяцияның ұзындық-салмақтық көрсеткіштерінің де өсетіні анық.

2024 жылы ғылыми-зерттеу кезінде ауланған қаракөз дараларының қандай ұзындықта және қандай мөлшердегі ау көздеріне түсу бойынша талдау жүргізілді. Талдау нәтижесінде ау ұяшығының мөлшері ұлғайған сайын, ауға түсетін қаракөз балықтарының да орташа ұзындығы да жоғарылай береді (3-сурет).

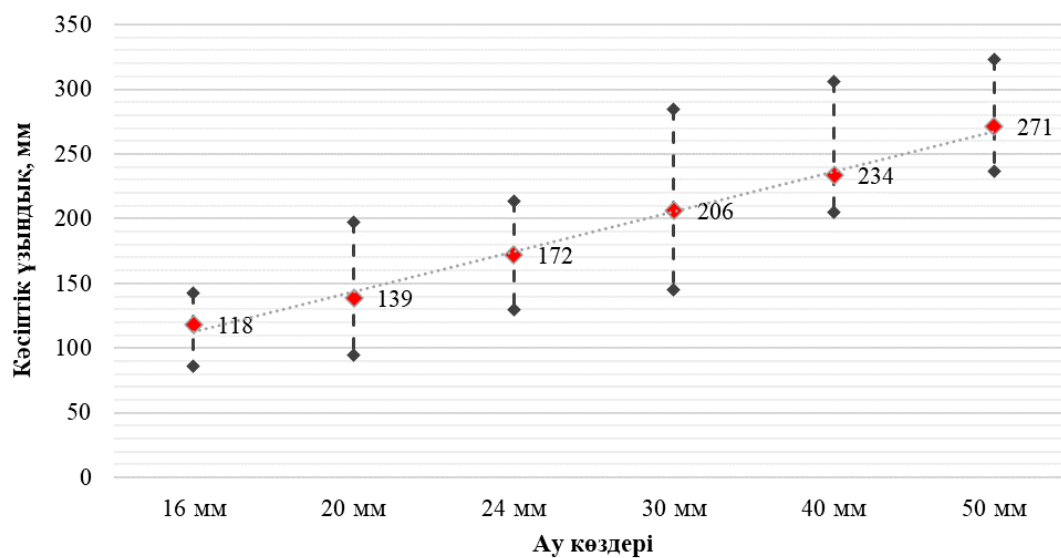
## 2-сурет

Қапшағай су қоймасындағы қаракөз популяциясының жастық құрамының динамикасы және модальды жасы



## 3-сурет

Қапшағай су қоймасындағы ау көздеріне сәйкес қаракөз балықтарының ауланудағы ұзындық диапазоны, 2024 жыл



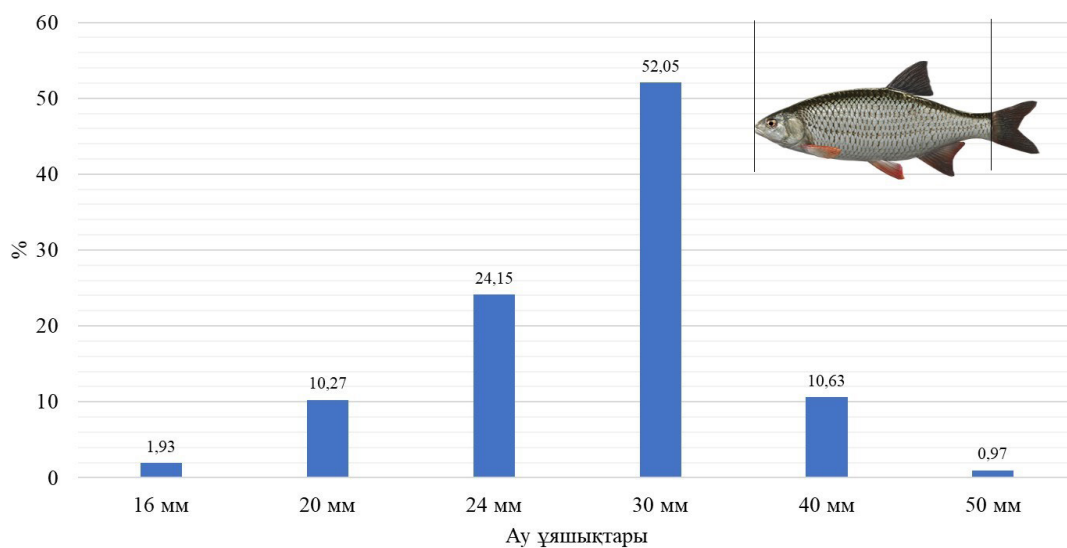
Алайда 30 мм ұяшықты ауларға осы балықтардың кәсіптік дене ұзындығы бойынша түсу диапазоны, басқа ауларға қарағанда біршама жоғары, яғни 145-285 мм ұзындықтағы дараларды қамтып, орташа 206 мм балықтарды ұстайтыны анықталды. Сонымен қатар дәл осы 30 мм ау көздеріне байланысты балықтардың түсу жиілігі де жоғары. Мұнда олардың аулағыштық тиімділігі 52,05% болып, жоғары үлесті көрсетті (4-сурет).

Қапшағай су қоймасындағы қаракөз популяциясының ұзындық құрамын талдау кезінде 2015-

2021 жылдар аралығында 100-150 мм кәсіптік ұзындықтағы модальды кластар басым болса, ал 2022 жылдан бастап ауланымдағы кәсіптік ұзындығы жоғарылап, тиісінше 150<sup>-199</sup> және 200<sup>-249</sup> мм ұзындықтағы даралардың үлесі (72-82%) де басым бола бастады (2-кесте). Бұл көрсеткіш қаракөз балықтарының жастық қатары мен ауға түсу мүмкіндігі бойынша жоғарыда аталған ұзындық құрамдағы даралардың ауға жиі түсуімен де расталады. Бұл алынған нәтижелер Қапшағай суқоймасындағы қаракөз популяциясының бір қалыпты өсіп келе жатқандығының айғағы.

**4-сурет**

Қапшағай су қоймасындағы қаракөз балықтарының ау көздеріне сәйкес аулауының % үлесі, 2024 жыл

**2-кесте**

Қапшағай су қоймасындағы қаракөз балығының ұзындық құрамының (%) динамикасы

Жылдар	Ұзындық құрылымы, SL (мм)							n
	0-49	50-	100-	150-	200-	250-	300-	
2015	-	2,52	<b>50,00</b>	19,46	22,82	4,87	0,34	596
2016	-	0,24	43,17	30,39	25,65	0,47	-	1267
2017	-	0,52	39,22	14,29	40,26	5,45	0,26	385
2018	-	-	36,20	31,14	29,12	3,37	0,17	594
2019	-	-	27,19	44,55	23,96	4,31	-	743
2020	-	10,96	<b>39,40</b>	<b>29,82</b>	19,22	0,60	-	1670
2021	-	2,46	<b>37,12</b>	<b>30,91</b>	<b>27,28</b>	2,11	0,12	854
2022	-	8,51	17,48	32,48	40,06	1,39	-	1293
2023	-	2,06	16,02	<b>46,65</b>	<b>34,42</b>	0,87	-	924
2024	-	1,14	12,90	<b>37,42</b>	<b>45,26</b>	3,03	0,25	791

Қапшағай су қоймасындағы қаракөз балықтарының салмақтық құрамының 10 жылдық динамикасы бойынша да өсу байқалады (3-кесте). Айтар болсақ, 2022 жылдан бас-

тап популяцияның салмақтық құрылымында 120-<sup>179</sup> және 180-<sup>239</sup> г класс аралығындағы даралардың пайыздық үлесі басымдық көрсете бастады.

**3-кесте**

Қапшағай су қоймасындағы қаракөз балығының салмақтық құрамының (%) динамикасы

Жылдар	Салмақтық құрылымы, Q (г)										n
	0- <sup>59</sup>	60- <sup>119</sup>	120-	180-	240-	300-	360-	420-	480-	540-	
2015	46,6	16,4	10,6	8,4	9,2	3,9	1,8	1,8	0,5	0,7	596
2016	42,0	13,3	26,6	13,5	3,2	1,0	0,1	0,2	0,1	0,1	1267

Жылдар	Салмақтық құрылымы, Q (г)										n
	0- <sup>59</sup>	60- <sup>119</sup>	120-	180-	240-	300-	360-	420-	480-	540-	
2017	36,6	9,9	15,3	22,3	8,8	4,7	1,8	0,3	0,3	-	385
2018	32,2	20,0	18,7	14,0	7,2	4,0	2,2	0,5	0,8	0,3	594
2019	25,3	33,1	23,6	8,9	3,9	2,8	1,6	0,7	0,0	0,1	743
2020	37,4	23,4	19,5	12,0	5,4	1,7	0,4	0,2	0,1	0,1	1670
2021	38,5	19,3	18,4	12,9	7,4	1,5	0,9	0,7	0,2	0,1	854
2022	19,5	24,4	30,6	18,3	5,0	1,2	0,5	0,3	0,1	-	1293
2023	16,8	17,2	42,6	16,6	4,7	1,3	0,2	0,5	0,1	-	924
2024	13,0	16,7	30,8	25,5	8,3	2,7	0,9	0,8	0,9	0,4	791

Жоғарыдағы 2 және 3 кестелерге қарап отырып, Қапшағай суқоймасындағы қаракөз популяциясының ұзындық және салмақтық кластары жастық қатар бойынша ілгері жылжығанын байқауға болады. Бұл көрсеткіштерге қарап олардың суқоймада жақсы бейімделгенін, сонымен қатар көбеюіне, дамуына және өсуіне жақсы орта тапқанын сипаттауға болады.

Қапшағай су қоймасындағы бақылау үшін жүргізілген аулау жұмыстарында қаракөз балықтарының жыныстық арақатынасы бойынша аналықтарының үлесінің жоғары болуымен ерекшеленеді (4-кесте). Әдетте, аналық даралар санының артуы популяцияның көбею қабілетін арттыратындығын растайды. Алайда, жыл бойғы антропогендік, яғни жыл сайынғы балықшылардың кәсіптік аулауының артуы популяцияның өзін-өзі толықтыруына мүмкіндік бермейді.

QGIS 3.22 геоақпараттық жүйесі бағдарламасының көмегі арқылы 2024 жылғы Қапшағай суқоймасының мониторингтік станцияларынан ауланған қаракөз балықтарының көктем, жаз және күз айларында кеңістікте таралуы қарастырылды. Мұнда Іле өзені Қапшағай су қоймасының шығысынан құйылып, батысынан шығуына байланысты оң жағалауы картаның солтүстігіне сәйкес келеді.

Қаракөз популяциясы көктем айларында Қапшағай су қоймасының оңтүстік және оңтүстік-шығыс жағалау акваторияларында (5-7 экз./ау) біршама шоғырланады (5-сурет). Сонымен қатар таралудың шоғырланған аймақтарындағы Қаскелең, Шеңгелді және Қараөзек өзендерінің суқоймаға құярлық аумақтары балықтардың уылдырық шашу және қоректену жағдайларына әсер етуі мүмкін.

Жаз айларында Қапшағай су қоймасында қаракөз балығы популяциясы барлық акватория кеңістігінде таралғанымен, барынша шоғырлану аймағы сол жақ жағалаудағы Іле өзені атырауына жақын (аулауға тыйым салу аймағы) маңда болатындығы байқалды (6-сурет). Бұл жерлерде олардың ғылыми аулауға түсу көрсеткіші 8-9 экз./ау құрады.

Бұл айларда су температурасы жылы болуына байланысты, балықтар суқоймада белсенді қоректенеді. Соған байланысты қаракөз балықтарына суқойманың көрсетілген аймақтары олар үшін жақсы қоректік орта болуы мүмкін. Суқоймада ең көп кездескен қаракөз балықтарының орындары суқойманың құмды-қиыршық тасты және таяз аумақтарын құрады. Сонымен қатар бұл жерлер су өсімдіктері мен балдырлар кездесетін аймаққа жатады.

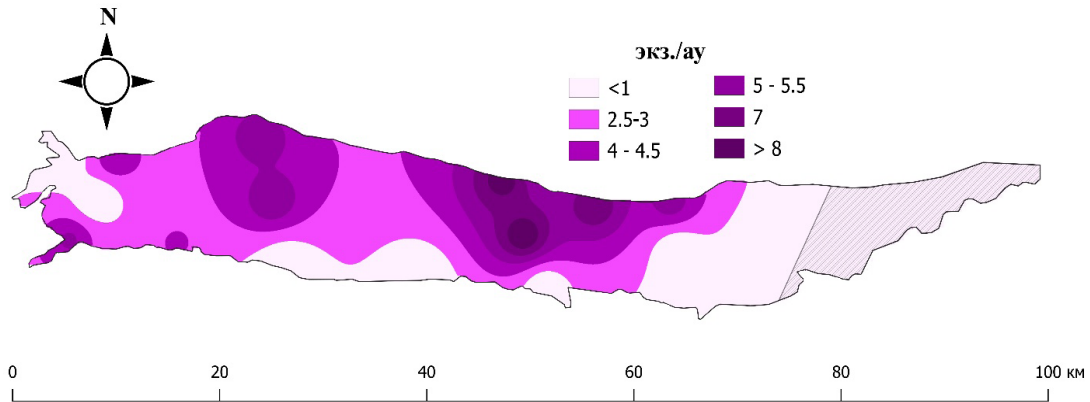
#### 4-кесте

Қапшағай су қоймасындағы қаракөз балығының жыныстық құрамының (%) динамикасы

Жынысы	Жылдар									
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Аналық	47,5	54,6	55,1	48,8	66,8	39,6	34,4	50,1	51,5	53,9
Аталық	43,6	38,6	39,2	32,7	32,2	22,2	20,3	30,9	27,8	38,4
juv.	8,9	6,8	5,7	18,5	1,1	38,3	45,3	19,0	20,7	7,7
Саны, n	596	1267	385	594	743	1670	854	1293	924	791

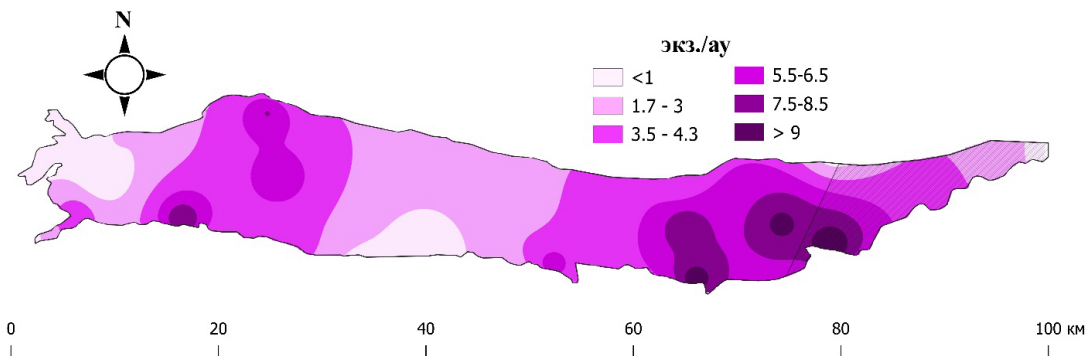
**5-сурет**

2024 жылғы көктемде Қапшағай су қоймасында қаракөз популяциясының кеңістіктегі таралуы (интерполяция аулауға талдау экз./ау бойынша негізделген)



**6-сурет**

2024 жылғы жазда Қапшағай су қоймасында қаракөз популяциясының кеңістіктегі таралуы (интерполяция аулауға талдау экз./ау бойынша негізделген)



Қапшағай су қоймасында күз айларында қаракөз балығы популяциясының кеңістіктегі таралуы суқойманың барлық аумағын қамтыды десе де болады (7-сурет). Салыстырмалы түрде шоғырланудың басымдылығы сол жағалауы акваториясында байқалса және ғылыми аулардағы балық өнімділігі 10-14 экз./ау немесе одан да көп болатындығы айқындалды.

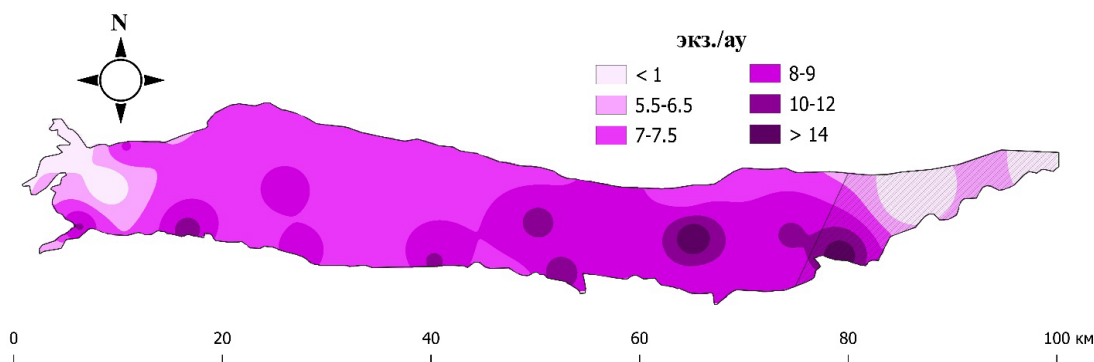
Қапшағай су қоймасының оң жағалауы айтарлықтай терең және құмды, қиыршық тасты болса, ал суқойманың сол жағалауы құмды, сазды және таяз болып келеді (Дукровец, 1982а). Су қойманың оң жағалауына Шеңгелді, Ақөзек және Томартас сияқты шағын өзендер келіп құяды. Көктем айларында қаракөз популяциясының кеңістіктегі таралуы оң жағалау акваториясын қамтыса, жаз айынан күзге қарай таралуы су қойманың сол жағалау акваториясына

қарай жылжиды. Жаз және күз айларында сол жағалаудағы негізгі шоғырланудың орындары Лавар, Шибұқты және Талғар өзендерінің сағалары болды. Ғылыми аулау нәтижелеріне сәйкес Қапшағай су қоймасында көктем айынан күз мезгіліне қарай ғылыми аулауда қаракөз балықтарының балық өнімділігі жоғарлайды және жергілікті балықшылардың ау құралдарында да сандық мөлшері де өсетіндігі расталады.

Дукровец Г.М. (1982b) пайымдауынша Қапшағай су қоймасында қаракөз балығының екі үйірі қалыптасқан: біршама терең аймақта мекендейтін оң жағалау үйірі және жалпы саяз суда мекендейтін сол жағалау үйірі. Бұл үйірлер бір-бірінен ешқандай оқшауланбаған және үнемі миграция арқылы жылжып отырады. Сондай-ақ, оң жағалаудағы қаракөз үйірінің экстерьерлік белгілері, сол жағалаудағыларға қарағанда үлкендеу болған.

**7-сурет**

2024 жылғы күзде Қапшағай су қоймасында қаракөз популяциясының кеңістіктегі таралуы (интерполяция аулауға талдау экз./ау бойынша негізделген)



Барлық суқоймаларда қаракөз эврифаг болып табылады. Оның рационында үнемі қоректік базаның көп кездесетін және оңай табылатын компоненттері басым болады. Бұл осы балықтың жоғары қоректік бейімделгіштігін сипаттайды (Дукровец, 1987). Отандық ғалымдардың жүргізген зерттеулерінде (Мажибаева & Шарапова, 2012; Бараков және басқалары, 2023) Қапшағай су қоймасында қаракөз балықтарының ішегінен 6 түрлі компонент анықталған. Олардың құрамында шаянтәрізділер, насекомдар, моллюскалар, балдырлар, су өсімдіктері және құм түйірлері болған. Басым көпшілігін моллюскалар, монодакна және балдырлар (72-78 % кездесу жиілігі) құраған. Балықтардың кеңістіктегі маусымдық таралу ерекшелігі де шоғырланған аймақтардағы қоректік базасының жоғары деңгейімен байланысты болуы ықтимал. Сонымен қатар, Бараков және басқаларының (Barakov et al., 2024) зерттеулеріне сүйенсек қаракөз балығының су қоймаға жерсінуді сазанның қоректік ресурсына бәсекелестігін күшейткен.

Кейінгі жылдары Қапшағай су қоймасында қаракөз популяциясының саны өскенімен, алайда кәсіптік тұрғыда толық игерілмейді. Себебі су қоймада пайдаланылатын негізгі ау құралдарының минимальды көздері 55 мм және одан жоғары, яғни бұл аулар тек кәсіптік ұзындығы 26 см және салмағы 400 г асатын біршама үлкен дараларын ұстай алады. Қапшағай су қоймасында қаракөз популяциясының санының шамадан тыс көбеюі, өзге де момын балық түрлерінің қоректік рационында бәсекелестік тудыратыны анық (Касымбеков & Пазылбеков, 2020; Абилов және басқалары, 2016).

Көптеген кәсіптік балықтардың суқоймадағы кеңістіктегі таралуы жағалау аймақтарында

байқалса, маусымдық өзгерістеріне байланысты олардың шоғырлану орындары да ауытқып тұратындығы анықталған (Getabu et al., 2003). Сондай-ақ, жаз айларында суқойманың ортаңғы аймақтарында балықтар популяцияларының тығыздығы жоғары болатындығы тіркелген (Jüza et al., 2018). 2007 жылы Қапшағай су қоймасы бойынша жүргізілген балық шаруашылық зерттеулердің жылдық есеп берулерінде (НПЦ РХ, 2007) қаракөздің кеңістіктегі дифференциациясы оң жағалау аймағында шоғырланудың жоғары концентрациясы айқын болғанын көрсетеді. Бұл түрлі биотикалық және абиотикалық факторлармен байланысты болуы келтірілген.

**Қорытынды**

Жүргізілген статистикалық талдауларға сәйкес Қапшағай су қоймасындағы қаракөз популяциясының ұзындық-жастық және салмақтық құрылымдарының динамикасы біршама жоғарылаған. Бұл қорекпен қамтамасыз етудің жақсаруына, аулаудың азаюына, гидрологиялық жағдайдың өзгеруіне, бәсекелестіктің немесе жыртқыш балықтар қысымының төмендеуіне байланысты болуы мүмкін.

Қаракөз популяциясының көктем айларында кеңістіктегі таралуы Қапшағай су қоймасының оң жағалау акваториясында байқалса, ал жаз және күз мезгілдерінде сол жағалау акваториясында өзендердің құятын сағалары аймағында шоғырланатыны анықталды. Ғылыми аулауда көктемнен күзге қарай қаракөз балықтарының саны артатындығы байқалды.

Кейінгі жылдары Қапшағай су қоймасында қаракөз популяциясының саны өскенімен, алайда кәсіптік тұрғыда толық игерілмейді. Себебі

су қоймада пайдаланылатын негізгі ау құралдарының минимальды көздері 55 мм және одан жоғары, яғни бұл аулар тек кәсіптік ұзындығы 26 см және салмағы 400 г асатын біршама үлкен дараларын ұстай алады.

### АЛҒЫС СӨЗ

Авторлар ЖШС «Балық шаруашылығы ғылыми-өндірістік орталығы» ихтиология зертханасының қызметкерлеріне ихтиологиялық материалдарды жинауға және алғашқы материалдарды камералық өңдеуге көмектескені үшін алғыс білдіреді. Ғылыми зерттеулер Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің 2025-2027 жылдарға ар-

налған гранттық қаржыландыруымен «Алатау ихтиофаунасының таксономиялық және функционалдық алуантүрлілігін зерттеу» жобасы (АР26100721) аясында орындалды.

### Авторлардың үлесі

С.Е. Шарахметов: Ғылыми жетекшілік, интерполяциялық модельдер жасау, мәтінді редакциялау және толықтыру, тұжырымдама жасау; Ж.М. Баққожа: Деректерді өңдеу және басқару, зерттеу процесін жүргізу, көрнекі материалдар дайындау; Н.С. Сапарғалиева: Мақаланың бастапқы нұсқасын жазу, зерттеу деректерін талдау, тұжырымдама жасау; А.Т. Самбек: зерттеу қызметін жоспарлау және үйлестіру жауапкершілігі, әдістемені әзірлеу.

### References

- Abilov B.I., Barakbaev T.T., Ablajsanova G.M. (2016) Қапшағай сукожмасындағы касиптік ихтиофаунаның калыптасуы [Formation of professional ichthyofauna in the Kapshagay reservoir] «KR UGA Хабарлары. Биология және медициналық сериясы». vol. 317, no. 5, pp. 94-98.
- Allen M. S., Hightower J. E. (2010) Fish population dynamics: mortality, growth, and recruitment /Inland fisheries management in North America. vol. 3, pp. 43-79.
- Barakov R.T., Koporikov A.R., Isbekov K.B., Nurtazin S.T. (2024) Assessment of the Dynamics of the Number of Commercial Fish Species in the Kapshagay Reservoir (Kazakhstan) from 1974 to 2021 Due to the Influence of Environmental Factors. *Russian Journal of Ecology*. vol. 55, no. 6, pp. 436-449.
- Barakov R.T., Konyshbaev T.G., Mazhibayeva Zh.O., Nurtazin S.T., Murzashev T.K. (2023) Характер питанија и пishhevye vzaimootnosheniya treh vidov Cyprinidae – Abramis brama L., Cyprinus carpio L., Rutilus rutilus caspicus J. v vodohranilishhe Kapshagaj [Nutritional characteristics and food relationships of three species of Cyprinidae – Abramis brama L., Cyprinus carpio L., Rutilus rutilus caspicus J. in the Kapshagay Reservoir]. *Gylym zhane Bilim*. vol. 3. №. 2 (71). pp. 257-267. <https://doi.org/10.1134/S1067413624602173>
- «Balyk aulau kagidalaryn bekitu turaly» (2015) [On approval of fishing rules] Qazaqstan Respublikasy Auyl sharuashylygy ministrinin mindetin atqarushynyn № 18-04/148 bujrygy.
- Barletta M., Amaral C.S., Corrêa M.F.M., Guebert F., Dantas D.vol., Lorenzi L., Saint-Paul U. (2008) Factors affecting seasonal variations in demersal fish assemblages at an ecocline in a tropical-subtropical estuary. *Journal of Fish Biology*. vol. 73, no. 6, pp. 1314-1336. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2008.02005.x>
- Biologicheskoe obosnovanie. (2007) Opredelenie ryboproduktivnosti promyslovyh uchastkov obshhih dopustimyh ulovov krupnyh rybohozjajstvennyh vodoemov respublikanskogo znachenija. podrazdel: Kapshagajskoe vodohranilishhe [Determination of fish productivity of fishing areas of total permissible catches of large fishery water bodies of national importance. Subsection: Kapshagay Reservoir]. *Otchet o NIR, TOO «NPC RH» – Almaty*. 128 p.
- Dukravec G.M. (1982) Formirovanie ihtiofauny Kapshagajskogo vodohranilishha [Formation of the ichthyofauna of the Kapshagay reservoir]. *Izuchenie zooproducentov v vodoemah bassejna r. Ili*. Alma-Ata. pp. 59-66.
- Dukravec G.M. (1982) Dinamika chislennosti i biologija plotvy i sudaka Kapshagajskogo vodohranilishha [Dynamics of abundance and biology of roach and pike-perch of the Kapshagay reservoir] *Izuchenie zooproducentov v vodoemah bassejna r. Ili*. Alma-Ata: KazGU. pp. 68-99.
- Dukrovec G.M. (1987) Rod Rutilus Rafinesque, 1820 – Plotva [Genus Rutilus Rafinesque, 1820 – Roach] *Ryby Kazahstana*. Alma-Ata: Nauka. vol.2, pp.8-74.
- Getabu A., Tumwebaze R., MacLennan D. N. (2003) Spatial distribution and temporal changes in the fish populations of Lake volictoria. *Aquatic Living Resources*. vol. 16. no. 3, pp. 159-165. [https://doi.org/10.1016/S0990-7440\(03\)00008-1](https://doi.org/10.1016/S0990-7440(03)00008-1)
- Ismuhanov H.K., Sansyzbaev E.T., Tairova B.T., Mazhibayeva Zh.O. (2021) Sovremennoe sostojanie razvitiya rybnogo hozjajstva Kapshagajskogo vodohranilishhai vlijanie osnovnyh faktorov na formirovanie ego bioresursov [Current state of development of fisheries of Kapshagay reservoir and influence of main factors on formation of its bioresources]. *volestnik nauki Kazhskogo agrotehnicheskogo universiteta im. S.Sejfullina: Mezhdisciplinarnyj*. vol.110, no. 3, pp. 113-123.
- Jüza T., Blabolil P., Čech M., Kubečka J., Mrkvička T., Říha M., Peterka J. (2018) Spatial distribution of four freshwater fish species in different types of artificial European water bodies. *Biologia*. vol. 73. pp. 647-658. <https://doi.org/10.2478/s11756-018-0075-9>
- Kalajda M.L. (2013) Metody rybohozjajstvennyh issledovanij [Methods of fisheries research]. *SPb.: Prospekt Nauki*. pp. 288.
- Kasymbekov E.B., Pazyzbekov M.Zh. (2020) Sovremennoe sostojanie vodnyh bioresursov Balhash-Ilijskogo bassejna [Current state of aquatic bioresources of the Balkhash-Ili basin]. *volodnye bioresursy i sreda obitanija*. vol. 3, no. 1, pp. 89-105.

Kushnarenko A. I., Lugarev E. S. (1983) Ocenka chislenosti ryb po ulovam passivnymi orudijami lova [Estimation of fish abundance based on catches with passive fishing gear]. *voloprosty ihtiologii*. vol. 23, no. 6, pp. 921-926.

Lakin G.F. (1990) Biometriya [Biometrics] M.: volysshaya shkola, 352 p.

Mamilov N.S., Konysbaev T.G., Magda I.N., volasil'eva E.D. (2021) Taxonomic status of four rare alien fish species of the Kapchagay Reservoir (Balkhash basin, central Asia). *Journal of Ichthyology*. vol. 61, no. 3, pp. 339-347.

Mazhibaeva Zh.O., Sharapova L.I. (2012) O haraktere pitaniya bentosojadnyh ryb Kapshagajskogo vodohranilishha [On the nature of nutrition of benthic-eating fish of the Kapshagay Reservoir]. *Doklady nacional'noj akademii nauk Respubliki Kazakhstan*. No 6. pp. 33-37.

Pravdin I.F. (1966) Rukovodstvo po izucheniju ryb [Fish Study Guide]. M.: Pishhevaja promyshlennost', 376 p.

QGIS Development Team (2021). QGIS 3.22.1. Geographic InformationSystem. *Open-Source Geospatial Foundation Project*: <http://qgis.osgeo.org>.

Sudakov A. (2012) Populjacija ryb kak dinamicheskaja sistema s jelementami samoreguljicii [Fish population as a dynamic system with elements of self-regulation]. *Jug Rossii: jekologija, razvitie*. no. 2. – pp. 56-59.

Tereshhenko V. G., Nadirov S. N. (1996) Formirovanie struktury rybnogo naselenija predgornogo vodohranilishha [Formation of the structure of the fish population of a foothill reservoir]. *voloprosty ihtiologii*. vol. 36, no. 2, pp. 169-178.

Toksabaeva B.S., Isbekov K.B., Bajbatshanova M.K., Barinova G.K., Ramazan K.B. (2024) Kapshagaj suqojmasy men Ile ozeninin ihtiofaunasynyn kazirgi zhagdajy [Current status of the ichthyofauna of the Kapchagai Reservoir and the Ili River]. *Saken Seifullin atyndagy Qazaq agrotehnikalyq zertteu universitetinin Gylym zharshysy (panaralyq)*. vol. 120, no. 1, pp. 208-218. doi.org/10.51452/kazatu.2024.1(120).1626

Tursunov E.A., Madibekov A.S., Ranova S.U., Galaeva A.vol. (2014) Sovremennye batigraficheskie harakteristiki Kapshagajskogo vodohranilishha [Modern bathygraphic characteristics of the Kapshagay reservoir]. *Gidrometeorologija i jekologija*. vol. 73, no. 2, pp. 105-110.

#### **Авторлар туралы мәлімет:**

Шарахметов Саят Ермұханбетұлы – PhD, зоология, гистология және цитология кафедрасының доцент-зерттеушісі, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: sharakhmetov@gmail.com).

Баққожа Жарқын Мейіржанұлы – зоология, гистология және цитология кафедрасының 1-курс докторанты, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, ЖШС «Балық шаруашылығы ғылыми-өндірістік орталығы, ихтиология зертханасының ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: zarkynbakkoza@gmail.com).

Сапарғалиева Назым Сапарғалиқызы – б.ғ.к., зоология, гистология және цитология кафедрасының доценті, Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: sapargalyeva.nazym@gmail.com).

Сатбек Аңсар Талғатұлы – зоология, гистология және цитология кафедрасының 2-курс докторанты, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан), ЖШС Балқаш филиалы «Балық шаруашылығы ғылыми-өндірістік орталығы» кешенді балық шаруашылық зертханасының экспедиция жасақ басшысы (Балқаш, Қазақстан, e-mail: a.s\_9393@list.ru).

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

Sharakhmetov Sayat – PhD, Associate Professor-Researcher of the Department of Zoology, Histology, and Cytology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: sharakhmetov@gmail.com).

Department of Zoology, Histology, and Cytology, Al-Farabi Kazakh National University, Research Fellow of the Ichthyology Laboratory LLP «Fisheries Research and Production Center» (Almaty, Kazakhstan, e-mail: zarkynbakkoza@gmail.com).

Sapargaliyeva Nazym – candidate of biological sciences, Associate Professor of the Department of Zoology, Histology, and Cytology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: sapargalyeva.nazym@gmail.com).

Bakkozha Zharkyn – 1st year doctoral student of the Satbek Angsar – 2nd year doctoral student of the Department of Zoology, Histology, and Cytology, Al-Farabi Kazakh National University, (Almaty, Kazakhstan), Head of the expeditionary unit of the integrated fisheries laboratory, Balkhash branch LLP «Fisheries Research and Production Center» (Balkhash, Kazakhstan, e-mail: a.s\_9393@list.ru).

#### **Сведения об авторах:**

Шарахметов Саят Ермұханбетович – PhD, доцент-исследователь кафедры зоологии, гистологии и цитологии, Казахский национальный университет имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: sharakhmetov@gmail.com).

Баққожа Жарқын Мейіржанұлы – докторант 1-курса кафедры зоологии, гистологии и цитологии, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, научный сотрудник лаборатории ихтиологии ТОО «Научно-производственный центр рыбного хозяйства» (Алматы, Казахстан, e-mail: zarkynbakkoza@gmail.com).

Сапарғалиева Назым Сапарғалиевна – к.б.н., доцент кафедры зоологии, гистологии и цитологии, Казахский национальный университет имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: sapargalyeva.nazym@gmail.com).

Сатбек Аңсар Талғатович – докторант 2-курса кафедры зоологии, гистологии и цитологии, Казахский национальный университет имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан), начальник экспедиционного отряда комплексной рыбохозяйственной лаборатории Балхашский филиал ТОО «Научно-производственный центр рыбного хозяйства» (Балхаш, Казахстан, e-mail: a.s\_9393@list.ru).

Келін түсті: 25 желтоқсан 2025 жыл  
Қайта жүктелді: 31 наурыз 2026 жыл  
Қабылданды: 15 маусым 2026 жыл

3-бөлім  
**МОЛЕКУЛАЛЫҚ БИОЛОГИЯ  
ЖӘНЕ ГЕНЕТИКА**

---

Section 3  
**MOLECULAR BIOLOGY  
AND GENETICS**

---

Раздел 3  
**МОЛЕКУЛЯРНАЯ БИОЛОГИЯ  
И ГЕНЕТИКА**

FTAMP 34.23.59

https://doi.org/10.26577/bb107220266

Б.О. Бекманов<sup>1\*</sup>, Т.Н. Карымсаков<sup>2</sup>, П.Ж. Сайлаубек<sup>2</sup>,  
 К.Ж. Досыбаев<sup>1</sup>, Қ. Ерғали<sup>1</sup>, М.А. Тореханов<sup>1</sup>, Т. Қапасұлы<sup>1</sup>,  
 А. Қожахмет<sup>1</sup>, А. Тапелов<sup>1</sup>, З. Бектасов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ҚР ҒЖБМ ҒК Генетика және физиология институты, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup> Қазақ мал шаруашылығы және жемшөп өндірісі ғылыми зерттеу институты, Алматы, Қазақстан

\*e-mail: bobekman@ Rambler.ru

## ӘУЛИЕКӨЛ ТҰҚЫМЫНЫҢ ГЕНЕТИКАЛЫҚ ӘРТҮРЛІЛІГІН SNP-МАРКЕРЛЕРДІ ҚОЛДАНА ОТЫРЫП БАҒАЛАУ

Бұл зерттеуде Қостанай облысы Әуликөл ауданы «Тимофеев-Агро» шаруашылығынан алынған 308 бас Әуликөл ірі қара популяциясының генетикалық құрылымы *BovineSNP50* микрочипінің негізінде алынған мәліметтер арқылы талданды. Сапалық бақылаудан кейінгі талдауда 22,865 аутосомалық SNP болды және үлгілердің орташа генотиптеу тазалығы 0.99947 мәнін құрады. Популяциялық құрылымды бағалау мақсатында негізгі компоненттерге талдау (PCA), ADMIXTURE және *identity-by-descent* (IBD) негізіндегі генетикалық ұқсастық зерттеулері жүргізілді. PCA нәтижелері үлгілердің басым бөлігінің орталық аймақта шоғырланып, айқын популяциялық стратификацияның жоқ болатындығын көрсетті, ал жекелеген үлгілердің орталық кластерден салыстырмалы түрде алшақ орналасуы популяция ішіндегі генетикалық вариацияның бар екенін аңғартты. IBD талдауы нәтижесінде алынған генетикалық ұқсастық қатнастары популяцияның тұтастығын және үлгілер арасындағы генетикалық жақындықтың үздіксіз сипатын көрсетті. ADMIXTURE талдауы (K=2-5) зерттелген популяцияда бір негізгі ата-тектік компоненттің басым болатындығын, ал қосымша компоненттердің әртүрлі пропорцияда көрінуі дербес субпопуляцияның болмайтындығын көрсетті. PCA, ADMIXTURE және IBD нәтижелері бірін-бірі толықтыра отырып, Әуликөл ірі қара популяциясының генетикалық құрылымы біртекті екенін, айқын субпопуляциялық бөлінудің жоқтығын және популяция ішіндегі генетикалық әртүрліліктің табиғи деңгейде екенін көрсетті. Алынған нәтижелер бұл популяцияның әрі қарай геномдық зерттеулер мен селекциялық бағдарламалар үшін сенімді генетикалық негізге ие екенін айғақтайды.

**Түйін сөздер:** Әуликөл тұқымы, SNP-талдау, PCA, ADMIXTURE, IBD.

B.O. Bekmanov<sup>1\*</sup>, T.N. Karymsakov<sup>2</sup>, P.Zh. Sailaubek<sup>2</sup>,  
 K.Zh. Dossybayev<sup>1</sup>, K. Yergali<sup>1</sup>, M.A. Torekhanov<sup>1</sup>, T. Kapassuly<sup>1</sup>,  
 A. Kozhakhmet<sup>1</sup>, A. Tapelov<sup>1</sup>, Z. Bektassov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Genetics and Physiology SC MSHE RK, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Kazakh Research Institute of Livestock and Foraging, Almaty, Kazakhstan

\*e-mail: bobekman@ Rambler.ru

### Assessment of genetic diversity of auliekol cattle breed using SNP-markers

This study investigated the genetic structure of an Auliekol cattle population comprising 308 individuals sampled from the “Timofeev-Agro” farm located in the Auliekol district of the Kostanay region, Kazakhstan, using *BovineSNP50* data. After quality control, 22,865 autosomal SNPs were retained for analysis, and the average genotype call rate reached 0.99947. Population structure was assessed using principal component analysis (PCA), ADMIXTURE, and *identity-by-descent* (IBD)-based genetic similarity analyses. PCA revealed a compact clustering of most samples, indicating the absence of pronounced population stratification, while a limited number of samples showed moderate deviations from the central cluster, reflecting within-population genetic variation. IBD analysis further confirmed the genetic integrity of the population, revealing a dense and continuous genetic similarity network without clear separation into discrete groups. ADMIXTURE analysis performed for K values ranging from 2 to 5 demonstrated the predominance of a single major ancestry component across the population. The presence of additional ancestry components at varying proportions in some individuals did not support the existence of distinct subpopulations. Overall, the concordant results of PCA, ADMIXTURE, and IBD analyses

tion structure, and exhibits a natural level of within-population genetic diversity. These findings suggest that this population represents a stable and reliable genetic resource for further genomic studies and breeding programs.

**Keywords:** Auliekol breed, SNP analysis, PCA, ADMIXTURE, IBD.

Б.О. Бекманов<sup>1\*</sup>, Т.Н. Карымсаков<sup>2</sup>, П.Ж. Сайлаубек<sup>2</sup>,  
К.Ж. Досыбаев<sup>1</sup>, К. Ергали<sup>1</sup>, М.А. Тореханов<sup>1</sup>, Т. Капасулы<sup>1</sup>,  
А. Кожамет<sup>1</sup>, А. Тапелов<sup>1</sup>, З. Бектасов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт генетики и физиологии КН МНВО РК, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Казахстанский научно-исследовательский институт животноводства  
и кормопроизводства, Алматы, Казахстан

\*e-mail: bobekman@rambler.ru

### Оценка генетического разнообразия аулиекольской породы с использованием SNP-маркеров

В настоящем исследовании изучена генетическая структура популяции Аулиекольского крупного рогатого скота, представленной 308 особями, отобранными в хозяйстве «Тимофеев-Агро» Аулиекольского района Костанайской области, с использованием чипа *BovineSNP50*. После проведения контроля качества (QC) в анализ было включено 22,865 аутосомных SNP, при этом средний уровень генотипирования составил 0,99947. Для оценки популяционной структуры были применены анализ главных компонент (PCA), ADMIXTURE и анализ генетического сходства на основе *identity-by-descent* (IBD). Результаты PCA показали компактное распределение основной массы образцов, что свидетельствует об отсутствии выраженной популяционной стратификации. Небольшие отклонения отдельных особей от центрального кластера отражают естественную внутривидовую генетическую вариативность. Результаты IBD-анализа дополнительно подтвердили генетическую целостность популяции, продемонстрировав плотную и непрерывную сеть генетического сходства без четко выраженного разделения на группы. Анализ ADMIXTURE, выполненный для значений K от 2 до 5, выявил доминирование одного основного компонента происхождения в популяции. Наличие дополнительных компонентов в различной пропорции у отдельных особей не свидетельствует о существовании обособленных субпопуляций. В целом, согласованные результаты PCA, ADMIXTURE и IBD-анализов указывают на генетическую однородность Аулиекольской породы, отсутствие выраженной субпопуляционной структуры и наличие естественного уровня внутривидовой генетической изменчивости. Полученные данные подтверждают перспективность данной популяции в качестве стабильного генетического ресурса для дальнейших геномных исследований и селекционных программ.

**Ключевые слова:** Аулиекольская порода, SNP анализ, PCA, ADMIXTURE, IBD.

### Кіріспе

Етті бағыттағы ірі қара малдарына жүргізілетін селекциялық және молекулалы-генетикалық жұмыстар қай кезеңде болмасын өзекті мәселелердің біріне жатады. Әсіресе, мұнда жергілікті ірі қара тұқымдарын зерттеу маңызды, өйткені жергілікті тұқымдар сол жердің климатына, жалпы жағдайына бейімделген болып табылады. Одан бөлек, Қазақстан аумағында өсірілетін етті бағыттағы ірі қаралардың, соның ішінде сырттан әкелінген, мысалы, Абердин-ангус, Герефорд, Шароле, Лимузин және басқа да шетелдік тұқымдарды атап өтуге болады. Ал, Қазақстанда етті бағыттағы ірі қара малдың жергілікті тұқымдарына Қазақтың ақбас сиыры мен Әулікөл сиыр тұқымдары жатады (Khamzina et al., 2025; Бисекенов и др., 2014; Губашев, 2007). Аталған тұқымдар республика аумағының табиғи-кли-

маттық жағдайларына жоғары деңгейде бейімделген және ет өнімділігімен ерекшеленеді. Бұл тұқымдар ұлттық генетикалық ресурстар ретінде мал шаруашылығын тұрақты дамытуда маңызды рөл атқарады. Қазіргі мәліметтерге қарағанда қазақтың ақбас сиыры Батыс, Солтүстік және Орталық Қазақстанда өсіріледі. Ал, Әулікөл тұқымы негізінен Қостанай, Ақмола, Солтүстік Қазақстан, Павлодар, Қарағанды облыстарында кеңінен таралған (Гиззатова и др., 2023). Әулікөл сиыр тұқымы ХХ ғасырдың екінші жартысында Қазақстанның солтүстік өңірлерінің табиғи-климаттық жағдайларына бейімделген, жоғары ет өнімділігімен және өндірістік қасиеттерінің тұрақтылығымен ерекшеленетін мал алу мақсатында шығарылған. Әулікөл тұқымын қалыптастыру барысында жергілікті сиырларды шетелдік етті бағыттағы тұқымдармен (Шароле (Франция) және Абердин-ангус (Ұлыбритания)

тұқымдары) мақсатты түрде будандастыру қолданылған. Нәтижесінде жоғары өнімді әрі жергілікті климатқа бейімделген тұқым қалыптасты (Жанбуршинов и др., 2012).

Соңғы жылдары Әулікөл тұқымының генетикалық ерекшеліктерін молекулалы-генетикалық деңгейде зерттеуге деген қызығушылық артып келеді. Геномдық технологияларды, соның ішінде SNP-маркерлерді пайдалану тұқымның генетикалық құрылымын, популяция ішіндегі әртүрлілік деңгейін және селекциялық маңызды белгілермен байланысты генетикалық варианттарды анықтауға мүмкіндік береді (Beishova et al., 2022; Kasarda et al., 2023; Niyazbekova et al., 2025). Мұндай зерттеулер асылдандыру бағдарламаларын оңтайландыруға, генетикалық әртүрлілікті сақтауға және тұқымның ұзақ мерзімді тұрақтылығын қамтамасыз етуге бағытталған ғылыми негізді шешімдер қабылдауға жол ашады.

Осыған орай, аталған жұмыстың мақсаты етті бағыттағы Әулікөл сиыр тұқымының генетикалық әртүрлілігін молекулалық-генетикалық маркерлер негізінде бағалау және алынған нәтижелерді тұқымды одан әрі жетілдіруге бағытталған селекциялық бағдарламаларда пайдалану мүмкіндіктерін қарастыру болып табылады.

## Зерттеу материалдары мен әдістері

### *Зерттеу материалдары*

Зерттеу материалдары ретінде Қостанай облысы Әулікөл ауданы Тимофеевка ауылында орналасқан Тимофеевка-Агро шаруа қожалығында өсірілетін етті бағыттағы Әулікөл сиыр тұқымынан жиналған түк фолликулдары үлгілері қолданылды (308 үлгі).

### *Зерттеу әдістері*

*ДНҚ молекуласын бөлу және геномтеу жүргізу.* Геномдық ДНҚ молекуласы зерттеуге жиналған үлгілерден *QIAamp DNA Blood Mini Kit (Qiagen, Германия)* жиынтығы көмегімен, шығарушы фирманың хаттамасына сай жүзеге асырылды. Бөлініп алынған геномдық ДНҚ молекуласының концентрациясы *NanoDrop 2000* құралында және сапасы агарозды электрофорез арқылы тексерілді. Геномдық ДНҚ молекуласы *BovineSNP50 v.3 BeadChip* жиынтық көмегімен *iScan (Illumina, АҚШ)* жүйесінде геномтеуден өткізілді. Аталған жиынтық құрамына 53,218 SNP мәліметтері кіреді. Ары қарай алынған мәліметтер *GenomeStudio (Illumina, АҚШ)* бағ-

дарламасы арқылы *.map* және *.ped* файлдары алынды.

*Генотиптік деректерді сапалық бақылау және негізгі компоненттерді талдау (PCA).* Біріктірілген генотиптік мәліметтердің сапасын қамтамасыз ету мақсатында сапалық бақылау (*quality control*) PLINK 1.09 бағдарламасын қолдану арқылы жүргізілді (Chang et al, 2015). Алғашқы өңдеулер *.map* және *.ped* форматындағы файлға жүргізілді. Өңдеуде *--geno* (0.05), *--mind* (0.01), *--maf* (0.05) және *--hwe* (0,001) опциялары қолданылды. Сонымен қатар, жақын тепе-теңдікте болатын маркерлерді алып тастау үшін *--indep-pairwise* 50 5 0.2 алгоритмі қолданылды. Нәтижесінде, сапалық бақылаудан өткен 308 үлгінің SNP-мәліметтері 22,865 тең және ондағы тазалық деңгейі 0.99947 мәніне ие болды.

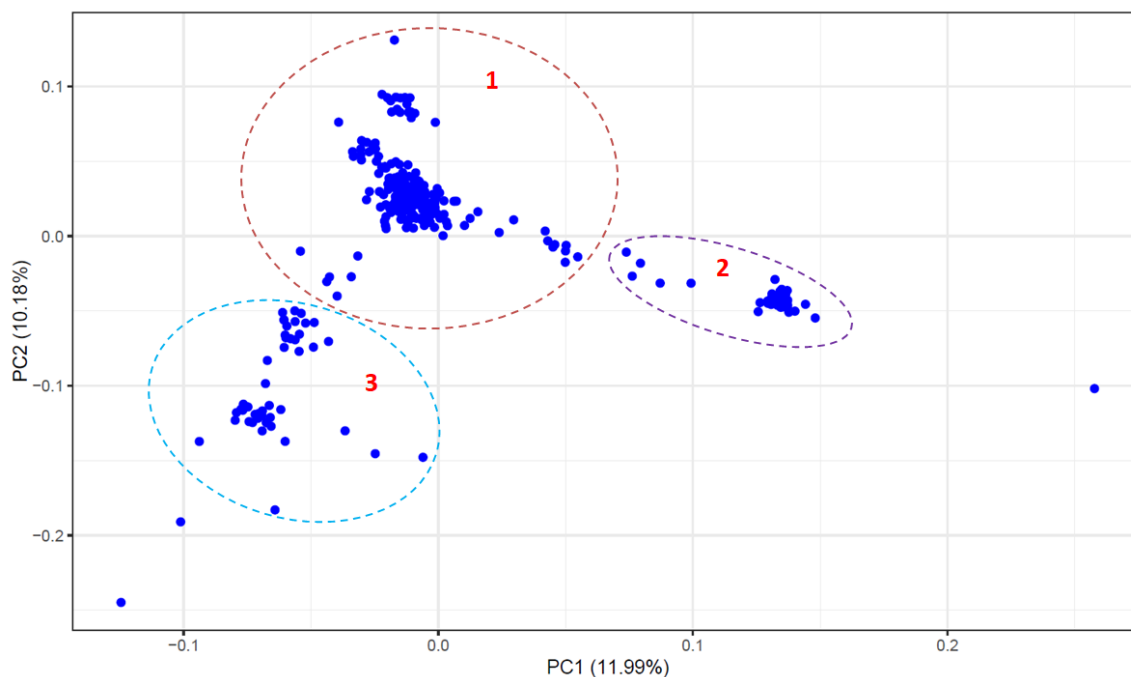
*Популяциялық құрылымды, генетикалық әртүрлілік және филогенетикалық талдау.* Популяциялық құрылымды және генетикалық қоспалардың деңгейін бағалау үшін ADMIXTURE (Alexander & Lange, 2011) бағдарламасы қолданылды. Талдау 2-5 кластер саны (*K*) арасында жүргізілді. Популяциялар арасындағы генетикалық айырмашылық деңгейін сандық бағалау мақсатында жұптық *Fst* көрсеткіштері анықталды. Популяциялар арасындағы байланыстарды анықтау үшін шекті мән қолданылған IBD-ге негізделген генетикалық ұқсастық қатынастары анықталды (Sticca et al., 2021). Нәтижелерді визуализациялау *RStudio* бағдарламасы көмегімен жүзеге асырылды (Wickham, 2016).

*Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау*

Қостанай облысы Әулікөл ауданы Тимофеевка ауылында орналасқан Тимофеев-Агро шаруа қожалығынан жиналған 308 Әулікөл ірі қара тұқымына жүргізілген SNP генотиптеудің мәліметтері қолданылды. Сапалық бақылаудан кейінгі негізінде зерттеуде қалған SNP саны 22,865 тең болды. Үлгілердің тазалық деңгейі 0.99947. Бұл көрсеткіш зерттеу үлгілерінің келесі реттегі талдауына толық жарамдылығын көрсетеді. Ары қарай, осы SNP-мәліметтерінің негізінде PC1 және PC2 компоненттерінің салыстырмалы талдауы жүргізілді. Айта кету керек, мұндағы SNP-мәліметтері аутосомалық хромосомаларда орналасқан полиморфизмдерге негізделген. Талдау нәтижесінде бірінші негізгі компоненттің (PC1) жалпы генетикалық вариациясы 11.99% құраса, екінші негізгі компоненттің мәні (PC2) 10.18% тең болды (1-сурет).

**1-сурет**

Тимофеев-Агро шаруашылығынан жиналған үлгілердің PC1 және PC2 негізгі компоненттердің таралуын көрсететін график



PC1-PC2 координаттық жазықтығында үлгілердің басым бөлігі орталық аймақта шоғырланып, генетикалық тұрғыдан салыстырмалы түрде біртекті негізгі кластерді (1) қалыптастырады. Бұл негізгі ядролық кластер популяцияның басым бөлігін қамтып, зерттелген үлгілер арасында айқын популяциялық стратификацияның жоқтығын көрсетеді. Сонымен қатар, негізгі орталық кластерден оң жақ бағытта салыстырмалы түрде жинақы орналасқан шағын топ (2) байқалады. Аталған топ дербес популяция немесе жеке субпопуляция ретінде бөлінбегенімен, оның кеңістіктегі орналасуы популяция ішіндегі генетикалық вариацияның бар екенін және кейбір үлгілердің негізгі ядродан белгілі бір деңгейде ерекшеленетінін көрсетеді. Бұдан бөлек, PC1 және PC2 осьтері бойынша төменгі сол жақ бағытта орналасқан үлгілер тобы (3) анық байқалады. Бұл үлгілер негізгі кластерден салыстырмалы түрде алшақ орналасқанымен, олар да жеке дербес кластер түзбейді және жалпы популяциялық құрылымнан бөлініп шықпайды.

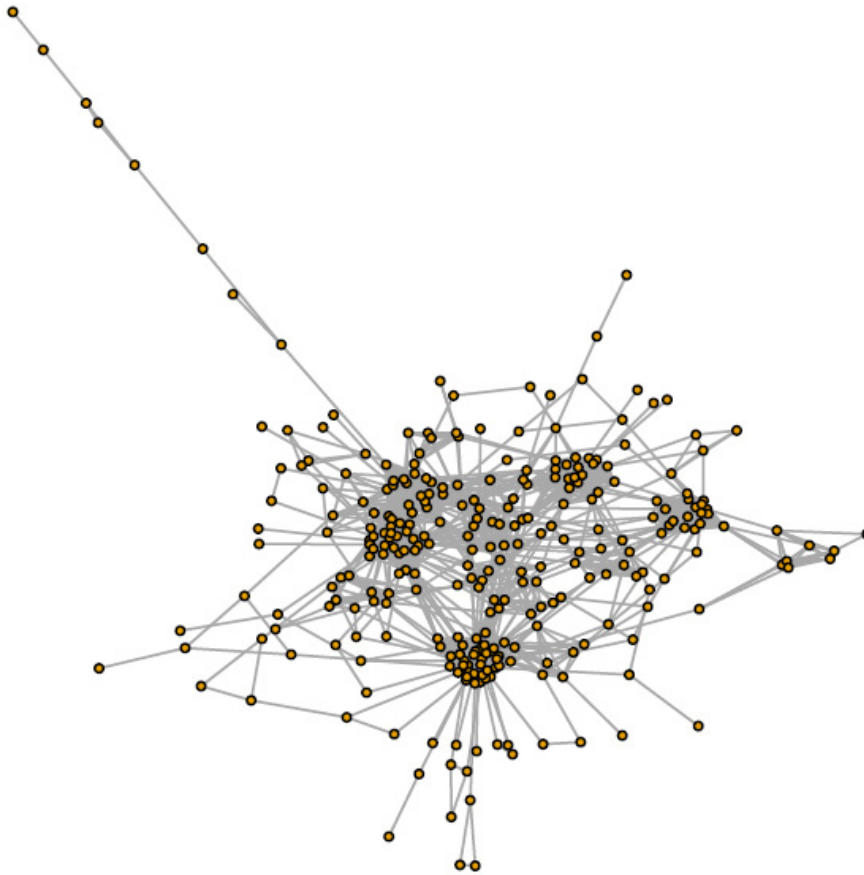
Жалпы алғанда, PCA нәтижелері зерттелген Әуликөл ірі қара популяциясының генетикалық құрылымы біртекті екенін, ал байқалған бағытты топтасулар популяция ішіндегі табиғи генетикалық вариацияның көрінісі екенін көрсетеді.

Келесі ретте зерттеудегі Әуликөл тұқымы үлгілерінің SNP-мәліметтеріне негізделген «ортақ ата-тектен таралу» (*identity-by-descent*, IBD) талдауы арқылы генетикалық ұқсастық анықталды. IBD талдауы нәтижесінде үлгілер арасындағы генетикалық ұқсастық қатнастары құрылды (2-сурет). Бұл байланыста шекті мәнді қолдану арқылы тек ең жақын генетикалық жұптар ғана тартылды. Алынған сипаттама бойынша орталық ядро және одан тарайтын шеткі тармақтар болатыны анықталды. Негізгі ядро зерттелген популяцияның басым бөлігін қамтып, үлгілер арасындағы жоғары генетикалық ұқсастықты көрсетті. Шеткі тармақтар мен тізбектелген құрылымдар популяция ішіндегі генетикалық вариацияның болатындығын және жекелеген туыстық қатынастар көрінісі ретінде қарастыруға болады. Бұл нәтиже PCA талдауында алынған мәліметтермен толық сай келеді.

Жұмыстың келесі бағыты бойынша Тимофеев-Агро шаруашылығына тиесілі 308 Әуликөл ірі қара үлгілері үшін аутосомалық SNP-мәліметтер негізінде ADMIXTURE талдауы жүзеге асырылды. Популяциялық құрылымның ықтимал деңгейін бағалау мақсатында кластер саны  $K=2$ -ден  $K=5$ -ке дейінгі мәндер аралығында есептелді (3-сурет).

**2-сурет**

*Шекті мән қолданылған IBD-ге негізделген генетикалық ұқсастық желісі (Әулікөл ірі қара малдары)*



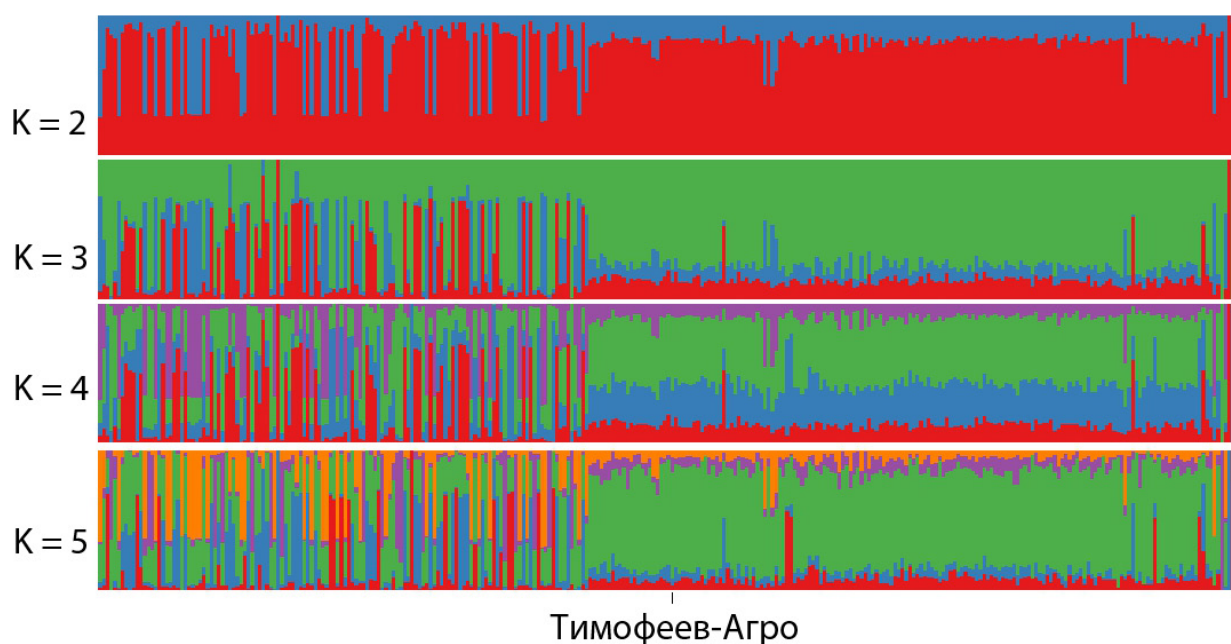
Мұндағы  $K=2$  жағдайында үлгілердің геномдық құрылымы екі ата-тектік компоненттің араласуымен сипатталады. Дегенмен, үлгілердің басым бөлігінде бір компоненттің басымдығы айқын байқалып, екінші компоненттің үлесі жекелеген үлгілерде ғана жоғары дәрежеде көрінеді. Бұл нәтиже зерттеу популяциясының біртекті екенін, ал байқалған айырмашылықтар популяция ішіндегі генетикалық вариацияға тікелей байланысты екенін көрсетеді.

Келесі  $K=3$  және  $K=4$  есептеулерінде қосымша ата-тектік компоненттер бөлініп көрсетілгенімен, олардың үлгілер арасында кең ауқымда және біркелкі таралуы айқын субпопуляциялық құрылымды қалыптастырмайтынын көрсетеді.

Аталған компоненттер жекелеген үлгілерде әртүрлі пропорцияда ғана көрініс беріп, геномдық құрамның күрделілігін және популяция ішіндегі тарихи немесе селекциялық факторлардың ықпалы екендігін көрсетеді. Соңғы  $K=5$  мәнінде ата-тектік компоненттердің араласу құрылымы айқын көрінеді. Үлгілердің басым бөлігінде бір негізгі компоненттің жоғары үлесі сақталғанымен, кейбір үлгілерде қосымша компоненттердің үлесі салыстырмалы түрде жоғарырақ байқалады. Алайда бұл үлгілер жеке дербес популяциялар немесе айқын субпопуляциялар түзеді деген сөз емес, керісінше жалпы зерттелген популяция ішіндегі генетикалық әртүрліліктің табиғи деңгейін көрсетеді.

**3-сурет**

Әуликөл ірі қара популяциясы үшін ADMIXTURE талдауының нәтижелері ( $K=2-5$ ). Әрбір тік баған бір үлгіні, ал түстер әртүрлі ата-тектік компоненттердің үлесін көрсетеді. Үлгілер Тимофеев-Агро шаруашылығынан алынған



ADMIXTURE нәтижелері алдыңғы жүргізілген PCA және IBD талдауларымен өзара үйлесімділік табады. PCA және IBD кеңістігінде негізгі орталық кластерді құрайтын үлгілер ADMIXTURE талдауында да бір негізгі ата-тектік компоненттің басымдылығымен сипатталады. Ал PCA барысында орталық кластерден екі бағытқа қарай салыстырмалы түрде алшақ орналасқан үлгілерде ADMIXTURE нәтижелері бойынша да қосымша ата-тектік компоненттердің үлесінің артуы байқалады. Жалпы алғанда, PCA, IBD және ADMIXTURE талдаулары бірін-бірі толықтыра отырып, Әуликөл ірі қара популяциясының генетикалық құрылымы тұтастай алғанда біртекті екенін, ал байқалған айырмашылықтар популяция ішіндегі табиғи генетикалық вариацияның көрінісі екенін растайды.

**Қорытынды**

Жүргізілген кешенді геномдық талдаулар (PCA, ADMIXTURE және IBD) зерттеудегі Тимофеев-Агро шаруашылығынан алынған Әуликөл ірі қара популяциясының генетикалық құрылымын жан-жақты сипаттауға мүмкіндік берді. PCA нәтижелері үлгілердің басым бөлі-

гінің орталық аймақта шоғырланып, мұнда айқын популяциялық стратификацияның болмауының көрсеткіші. Сондай-ақ, PCA кеңістігінде орталық кластерден екі бағытқа қарай орналасқан жекелеген үлгілер, бұл популяция ішіндегі генетикалық вариацияның бар екенін көрсетеді. Келесі реттегі IBD талдауынан алынған генетикалық ұқсастық сипаты популяцияның тұтастығын қосымша растады. Шекті мән қолданылған IBD қатнасында орталық ядро және одан тарайтын шеткі тармақтардың болуы популяция ішіндегі генетикалық ұқсастық болатынын көрсетеді. ADMIXTURE талдауы ( $K=2-5$ ) зерттелген популяцияда бір негізгі ата-тектік компоненттің басым екенін растады. Қосымша ата-тектік компоненттердің жекелеген үлгілерде әртүрлі пропорцияда көрінуі популяция ішіндегі геномдық әртүрлілікті көрсеткенімен, дербес субпопуляциялардың немесе айқын генетикалық бөлінуінің болатынын көрсетпеді. Жалпы алғанда, PCA, ADMIXTURE және IBD талдаулары бірін-бірі толықтыра отырып, зерттелген Әуликөл ірі қара популяциясының генетикалық құрылымы біртекті екенін, айқын субпопуляциялық бөлінуінің жоқтығын және ішкі генетикалық әртүрліліктің табиғи деңгейде екенін көрсетті. Алынған

нәтижелер бұл популяцияның әрі қарай геномдық зерттеулер мен селекциялық бағдарламалар үшін жарамды әрі тұрақты генетикалық негізге ие екенін көрсетеді.

### Қаржыландыру көзі

Бұл жұмыс Қазақстан Республикасы Ауыл шаруашылығы министрлігінің 2024-2026 жылдарға арналған «BR22885686 «Молекулалы-генетиканың, селекцияның және цифрлық технологиялардың тиімді әдістерін қолдана отырып, ет бағытындағы тұқымдарды дамытуға арналған генетикалық жүйені әзірлеу» нысаналы-мақсатты қаржыландыру көмегі арқылы жүзеге асырылды.

### Авторлардың үлесі

*Бекманов Б.О.: концептуализация, ресми талдау, мақаланың бастапқы нұсқасын жазу, бақылау; Карымсаков Т.Н.: жобаны басқару, қаржыландыру, ресми талдау, бақылау; Сайлаубек П.Ж.: ресурстармен қамтамасыз ету, әдістеме, мәтінді редакциялау; Досыбаев Қ.Ж.: биоинформатикалық талдау, деректерді өңдеу, мәтінді редакциялау; Ергали Қ.: зерттеу, әдістеме, генотиптеу; Тореханов М.А.: әдістеме, мәтінді редакциялау; Қапасұлы Т.: зерттеу, әдістеме, нәтижелерді тексеру; Қожяхмет А.: зерттеу, әдістеме, нәтижелерді тексеру; Тапелов А.: зерттеу, әдістеме, нәтижелерді тексеру; Бектасов З.: зерттеу, әдістеме, нәтижелерді тексеру.*

### Әдебиеттер

- Alexander, D., Lange, K. (2011). Enhancements to the ADMIXTURE algorithm for individual ancestry estimation. *BMC Bioinformatics*, 12:246. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-12-246>.
- Beishova, I., Dossybayev, K., Shamshidin, A., Belaya, A., Bissembayev, A., Khamzin, K., Kovalchuk, A., Nametov, A. (2022). Distribution of homozygosity regions in the genome of Kazakh cattle breeds. *Diversity*, 14(4):279. <https://doi.org/10.3390/d14040279>
- Chang, C., Chow, C., Tellier, L., Vattikuti, S., Purcell, M., Lee, J. (2015). Second-generation PLINK: Rising to the challenge of larger and richer datasets. *Gigascience*, 4:s13742-015. <https://doi.org/10.1186/s13742-015-0047-8>
- Kasarda, R., Moravcikova, N., Meszaros, G., Simcic, M., Zaborski, D. (2023). Classification of cattle breeds based on the random forest approach. *Livestock Science*, 267:105143. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.105143>.
- Khamzina, A., Igoshin, A., Muslimova, Zh., Turgumbekov, A., Khussainov, D., Yudin, N., Ussenbekov, Y., Larkin, D. (2025). Resequencing composite Kazakh Whiteheaded Cattle: insights into ancestral breed contributions, selection signatures, and candidate genetic variants. *Animals*, 15(3):385. <https://doi.org/10.3390/ani15030385>.
- Niyazbekova, Zh., Xu, Y., Qiu, M., Wang, H., Ibragimov, P., Nanaei, H., Ussenbekov, Y., Kassen, K., Liu, Y., Gao, C., Akhmetadykova, Sh., Ruzikulov, N., Jiang, Y., Cai, Y. (2025). Whole-genome sequencing reveals genetic architecture and selection signatures of Kazakh cattle. *Zoological Research*, 46(2):301-311. <https://doi.org/10.24272/j.issn.2095-8137.2024.235>.
- Sticca, E., Belbin, G., Gignoux, C. (2021). Current Developments in Detection of Identity-by-Descent Methods and Applications. *Frontiers in Genetics*, 12:722602. <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.722602>
- Wickham, H. *Ggplot2: Elegant graphics for data analysis* (2nd ed.). (2016). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4>
- Bisekenov, N., Kaldygulov, S., Kayumov, F., Tyulebaev, S. (2014). Auliekol'skaya myasnaya poroda krupnogo rogatogo skota [Auliekol beef cattle breed] // *Vestnik myasnogo skotovodstva*, 4(87), 20-24. (in Russian). <https://cyberleninka.ru/article/n/auliekolskaya-myasnaya-poroda-krupnogo-rogatogo-skota>
- Gizatova, A., Esengalieva, S., Rakhimgaliev, B., Kazambaeva, A. (2023). Problemy povysheniya ekonomicheskoy effektivnosti plemennoy raboty v skotovodstve [Problems of increasing the economic efficiency of breeding work in cattle breeding] // *Gylim zhane Bilim*. 3(70), 237-248. (in Russian) <https://doi.org/10.52578/2305-9397-2023-1-3-237-248>.
- Gubashev, N. (2007). Puti sovershenstvovaniya kazakhskogo belogolovogo skota v Zapadnom Kazakhstane [Ways of improving Kazakh Whiteheaded cattle in Western Kazakhstan] // *Vestnik myasnogo skotovodstva, Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, 60, 54-59. (in Russian).
- Zhanburshinov, Z., Zhuzenov, Sh., Kryuchkov, V., Akhmetalieva, A. (2012). Vyvedenie i sovershenstvovanie auliekol'skoy porody myasnogo skota [Breeding and improvement of the Auliekol beef cattle breed] // *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 4(36), 99-102. (in Russian). <https://cyberleninka.ru/article/n/vyvedenie-i-sovershenstvovanie-auliekolskoy-porody-myasnogo-skota>

**Авторлар туралы мәлімет:**

Бекманов Бақытжан Орақбайұлы (корреспонденттік автор) – б.ғ.к., профессор, Жетекші ғылыми қызметкер, ҚР ҒЖБМ ҒК «Генетика және физиология институты (Алматы, Қазақстан, e-mail: bobekman@rambler.ru).

Карымсаков Талгат Николаевич – а.-ш.ғ.д., қауымдастырылған профессор, Басқарма төрағасының ғылым жөніндегі орынбасары, Қазақ мал шаруашылығы және жемісөп өндірісі ғылыми зерттеу институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: kartalगत@mail.ru).

Сайлаубек Пернебек Жеңісбекұлы – PhD-доктор, Ірі қара мал шаруашылығы секторының меңгерушісі, Қазақ мал шаруашылығы және жемісөп өндірісі ғылыми зерттеу институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: kazakh\_93\_bbn@mail.ru).

Досыбаев Қайрат Жумағалиевич – PhD-доктор, Биоинформатика және биостатистика зертханасының меңгерушісі, ҚР ҒЖБМ ҒК «Генетика және физиология институты (Алматы, Қазақстан, e-mail: doskairat1987.11@gmail.com).

Ергали Қанагат – магистр, Кіші ғылыми қызметкер, молекулалық генетика зертханасы, ҚР ҒЖБМ ҒК «Генетика және физиология институты (Алматы, Қазақстан, e-mail: ergaly.qanagat@gmail.com).

Тореханов Мерей Әдепханұлы – PhD-доктор, Аға ғылыми қызметкер, экспериментальды мутагенез зертханасы, ҚР ҒЖБМ ҒК «Генетика және физиология институты (Алматы, Қазақстан, e-mail: merei\_torehanov@mail.ru).

Қанасұлы Тілек – магистр, Ғылыми қызметкер, Биоинформатика және биостатистика зертханасы, ҚР ҒЖБМ ҒК «Генетика және физиология институты (Алматы, Қазақстан, e-mail: tilek.kapas@mail.ru).

Қожахмет Алтынай – PhD-докторант, Кіші ғылыми қызметкер, Биоинформатика және биостатистика зертханасы, ҚР ҒЖБМ ҒК «Генетика және физиология институты (Алматы, Қазақстан, e-mail: altynait@gmail.com).

Тапелов Айдар – аға лаборант, Биоинформатика және биостатистика зертханасы, ҚР ҒЖБМ ҒК «Генетика және физиология институты, (Алматы, Қазақстан, e-mail: tapelov.aidar@gmail.com).

Бектасов Зұлқарнай – аға лаборант, Биоинформатика және биостатистика зертханасы, ҚР ҒЖБМ ҒК «Генетика және физиология институты (Алматы, Қазақстан, e-mail: bekhtasov2004@mail.ru).

**Information about the authors:**

Bekmanov Bakytzhan Orakbaevich (corresponding author) – PhD, Professor, Leading Researcher, RSE “Institute of Genetics and Physiology” SC MSHE RK (Almaty, Kazakhstan, e-mail: bobekman@rambler.ru).

Karymsakov Talgat Nikolaevich – Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Deputy Chairman of the Board for Science, Kazakh Research Institute of Livestock and Foraging (Almaty, Kazakhstan, e-mail: kartalगत@mail.ru).

Sailaubek Pernebek Zhenisbekuly – PhD, Head of the Cattle Breeding Sector, Kazakh Research Institute of Livestock and Foraging (Almaty, Kazakhstan, e-mail: kazakh\_93\_bbn@mail.ru).

Dossybayev Kairat Zhumagalievich – PhD, Head of the Bioinformatics and Biostatistics Laboratory, RSE “Institute of Genetics and Physiology” SC MSHE RK (Almaty, Kazakhstan, e-mail: doskairat1987.11@gmail.com).

Yergali Kanagat – Master’s Degree, Junior Researcher, Molecular Genetics Laboratory, RSE “Institute of Genetics and Physiology” SC MSHE RK (Almaty, Kazakhstan, e-mail: ergaly.qanagat@gmail.com).

Torekhanov Merey Adepkhanovich – PhD, Senior Researcher, Experimental Mutagenesis Laboratory, RSE “Institute of Genetics and Physiology” SC MSHE RK (Almaty, Kazakhstan, e-mail: merei\_torehanov@mail.ru).

Kapassuly Tilek – Master’s Degree, Researcher, Laboratory of Bioinformatics and Biostatistics, RSE “Institute of Genetics and Physiology” SC MSHE RK (Almaty, Kazakhstan, e-mail: tilek.kapas@mail.ru).

Kozhakhmet Altynay – PhD-student, Junior Researcher, Laboratory of Bioinformatics and Biostatistics, RSE “Institute of Genetics and Physiology” SC MSHE RK (Almaty, Kazakhstan, e-mail: altynait@gmail.com).

Tapelov Aidar – Senior Laboratory Assistant, Laboratory of Bioinformatics and Biostatistics, RSE “Institute of Genetics and Physiology” SC MSHE RK (Almaty, Kazakhstan, e-mail: tapelov.aidar@gmail.com).

Bekhtasov Zulkarnay – Senior Laboratory Assistant, Laboratory of Bioinformatics and Biostatistics, RSE “Institute of Genetics and Physiology” SC MSHE RK (Almaty, Kazakhstan, e-mail: bekhtasov2004@mail.ru).

**Сведения об авторах:**

Бекманов Бақытжан Орақбаевич (корреспондент автор) – к.б.н., профессор, ведущий научный сотрудник, РГП «Институт генетики и физиологии» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан, e-mail: bobekman@rambler.ru).

Карымсаков Талгат Николаевич – д.с.-х.н., ассоциированный профессор, Заместитель председателя правления по науке, Казахский научно-исследовательский институт животноводства и кормопроизводства (Алматы, Казахстан, e-mail: kartalगत@mail.ru).

Сайлаубек Пернебек Женисбекулы – PhD-доктор, Заведующий сектором разведения крупного рогатого скота, Казахский научно-исследовательский институт животноводства и кормопроизводства (Алматы, Казахстан, e-mail: kazakh\_93\_bbn@mail.ru).

Досыбаев Кайрат Жумағалиевич – PhD-доктор, Заведующей лабораторией биоинформатики и биостатистики, РГП «Институт генетики и физиологии» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан, e-mail: doskairat1987.11@gmail.com).

Ергали Қанагат – магистр, младший научный сотрудник, лаборатория молекулярной генетики, РГП «Институт генетики и физиологии» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан, e-mail: ergaly.qanagat@gmail.com).

*Тореханов Мерей Адепханович – PhD-доктор, Старший научный сотрудник, лаборатория экспериментального мутагенеза, РГП «Институт генетики и физиологии» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан, e-mail: merei\_torehanov@mail.ru)*

*Капасулы Тілек – магистр, научный сотрудник, лаборатория биоинформатики и биостатистики, РГП «Институт генетики и физиологии» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан, e-mail: tilek.kapas@mail.ru).*

*Кожяхмет Алтынай – PhD-докторант, Младший научный сотрудник, биоинформатики и биостатистики, РГП «Институт генетики и физиологии» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан, e-mail: altynaitg@gmail.com).*

*Тарелов Айдар – старший лаборант, биоинформатики и биостатистики, РГП «Институт генетики и физиологии» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан, e-mail: tarlov.aidar@gmail.com).*

*Бектасов Зұлқарнай – старший лаборант, биоинформатики и биостатистики, РГП «Институт генетики и физиологии» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан, e-mail: bekhtasov2004@mail.ru).*

*Келіп түсті: 8 қаңтар 2026 жыл  
Қабылданды: 15 маусым 2026 жыл*

4-бөлім  
**БИОТЕХНОЛОГИЯ**

---

Section 4  
**BIOTECHNOLOGY**

---

Раздел 4  
**БИОТЕХНОЛОГИЯ**

МРНТИ 62.13.99

<https://doi.org/10.26577/bb107220268>

А.Т. Бигараева<sup>1\*</sup> , Н. Алибаев<sup>1</sup> , О. Бекетауов<sup>1</sup> ,  
Т.С. Биғара<sup>2</sup> , А.Т. Ермекбаева<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Научный центр «Биотехнология» НАО Южно-Казахстанского университета имени М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан

<sup>2</sup>Университет имени Ж.А. Ташенева, Шымкент, Казахстан

<sup>3</sup>Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, Шымкент, Казахстан

\*e-mail: bigarayeva94@mail.ru

## ИНДУКЦИЯ СУПЕРОВУЛЯЦИИ КАРАКУЛЬСКИХ ОВЕЦ БЕЖЕВОЙ ОКРАСКИ ДЛЯ ТРАНСПЛАНТАЦИИ ЭМБРИОНОВ

В работе проведено аргументированное обоснование в пользу сохранения генетических ресурсов каракульских овец бежевой окраски и разработан способ ускоренного размножения и эффективного сохранения высокоценных генотипов каракульских овец, особо редких бежевых окрасок путем, многократного получения эмбрионов у доноров, включающие выявление в охоте, обработку гонадотропным гормоном СЖК в дозе 26 МЕ/кг живой массы на 13-14 день полового цикла, осеменение по мере прихода в охоту их с баранами соответствующей окраской и извлечение эмбрионов, отличающиеся тем, что с целью повышения числа получения эмбрионов дополнительно после хирургической операции доноров с перерывом 18-22 дней обрабатывают гормональным препаратом ГСЖК на 14-16 день эстрального цикла доноров в дозе 26 МЕ/кг живой массы и в последующем осуществляют технологические процедуры – выборку в охоте, осеменения и вымывания эмбрионов.

Таким образом, предлагаемый способ позволяет дополнительно получить 3,1 эмбриона больше на донора высокого качества от овцематок редких окрасок по сравнению с традиционным способом, что указывает о возможности использования доноров в два раза в течении случного сезона в качестве продуцентов эмбрионов. Многократное извлечение эмбрионов от одних тех же доноров непосредственно в практике воспроизводство особо ценных в племенном отношении является дополнительным ресурсом сельскохозяйственных животных для решения ряда теоретических и практических вопросов по сохранению и размножению каракульских овец бежевой окраски.

**Ключевые слова:** половой цикл, половая охота, сывороточный гонадотропин, суперовуляция, эмбрион, стадия развития.

А.Т. Bigarayeva<sup>1\*</sup>, N. Alibayev<sup>1</sup>, O. Beketauov<sup>1</sup>,  
T.S. Bigara<sup>2</sup>, A.T. Yermekbayeva<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Biotechnology Research Centre, M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan

<sup>2</sup>Zh.A.Tashenev University, Shymkent, Kazakhstan

<sup>3</sup>M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan

\* e-mail: bigarayeva94@mail.ru

### Induction of superovulation in beige-colored Karakul sheep for embryo transplantation

This study provides a reasoned justification for the conservation of genetic resources of beige-colored Karakul sheep and develops a method for accelerated reproduction and effective preservation of high-value Karakul genotypes, particularly those with rare beige coat colors, through repeated embryo recovery from donor ewes. The method involves detecting estrus, administering pregnant mare serum (PMS) gonadotropin at a dose of 26 IU/kg body weight on days 13-14 of the estrous cycle, mating ewes with rams of the corresponding coat color upon estrus onset, and subsequent embryo collection. To increase the number of recovered embryos, donor ewes are additionally treated with PMS gonadotropin at the same dose on days 14-16 of the estrous cycle, following a surgical procedure and an 18-22 day interval. Subsequent technological procedures include estrus detection, mating, and embryo flushing.

Application of this method allows the recovery of, on average, 3.1 additional embryos per high-quality donor from ewes with rare coat colors compared to conventional methods. This indicates the feasibility of using the same donors twice within a single breeding season as embryo producers. Re-

peated embryo recovery from the same donors in practical breeding programs represents an additional resource for addressing both theoretical and applied challenges in the conservation and propagation of beige-colored Karakul sheep.

**Keywords:** estrous cycle, estrus, serum gonadotropin, superovulation, embryo, developmental stage.

А.Т. Бигараева<sup>1\*</sup>, Н. Алибаев<sup>1</sup>, О. Бекетауов<sup>1</sup>,  
Т.С. Биғара<sup>2</sup>, А.Т. Ермекбаева<sup>3</sup>

<sup>1</sup>М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университетінің  
«Биотехнология» ғылыми орталығы, Шымкент, Қазақстан

<sup>2</sup>Ж.А. Ташенев атындағы университет, Шымкент, Қазақстан

<sup>3</sup>М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан

\*e-mail: bigarayeva94@mail.ru

### **Сарғылт түсті қаракөл қойларының эмбриондарын трансплантациялауда суперовуляциялауды индукциялау**

Зерттеу жұмысында селекциялық құндылығы жоғары, сирек кездесетін сарғылт түсті қаракөл қойларының генетикалық ресурстарын сақтау маңыздылығы ғылыми тұрғыдан негізделіп, олардың генотиптерін көбейту және мал басын тиімді сақтау әдісі әзірленді. Ұсынылған әдіс саулықтардың жыныстық күйітін анықтау, жыныстық циклдің 13-14 күндері тірідей салмағына 26 МЕ/кг СЖК гонадотропты гормонымен өңдеу, сәйкес түсті қошқарлармен қолдан ұрықтандыру және эмбриондарды жуып алуды қамтиды, бұл әдістің ерекшелігі эмбриондар санын арттыру мақсатында осы саулықтарды екінші мәрте донор ретінде пайдаланады, ол үшін эмбриондарын жуып алғаннан кейін донорларға 18-22 күндік үзілістен кейін олардың эстральдық циклінің 14-16 күндері тірідей салмағына 26 МЕ/кг мөлшерінде гонадотропты ГСЖК препаратымен қайта өңдейді, одан кейін күйітке келген саулықтарды іріктеу, ұрықтандыру және эмбриондарды жуып алу технологиялық процесстері орындалады.

Нәтижесінде, ұсынылған әдіс дәстүрлі тәсілмен салыстырғанда сирек түсті саулықтардан орта есеппен 3,1 дана жоғары сапалы эмбрионды қосымша алуға мүмкіндік береді. Сонымен қатар бұл әдіс күйіттеу маусымында сирек сарғылт түсті саулықтарды эмбрион доноры ретінде екі рет пайдалануға мүмкіндік береді. Бір донордан эмбриондарды бірнеше мәрте жуып алу тәсілі ауыл шаруашылығында селекциялық тұрғыдан құндылығы жоғары, сирек кездесетін сарғылт түсті қаракөл қойлар популяцияларын сақтау мен көбейтуге бағытталған бірқатар теориялық және практикалық мәселелерді шешуде маңыздылығы жоғары.

**Түйін сөздер:** жыныстық цикл, жыныстық күйіт, сарысу гонадотропині, суперовуляция, эмбрион, даму сатысы.

### **Сокращения и обозначения**

ГСЖК – гонадотропин сыворотки жеребых кобыл; СЖК – сыворотка жеребых кобыл; АА – гомозиготный организм, имеет две одинаковые аллели по данному гену (обе доминантные или обе рецессивные); Аа – гетерозиготный организм, имеет две разные аллели по данному гену; аа – гомозиготный рецессивный; F<sub>1</sub> – первое генотипное потомство; F<sub>2</sub> – второе генотипное потомство.

### **Введение**

Генетические ресурсы сельскохозяйственных животных не только обеспечивают население продуктами питания, но и являются частью природных богатств каждой страны (Gizaw et al., 2011). Современное производство продукции

овцеводства главным образом ориентировано на производство баранины и ягнятины и направлено на обеспечение потребностей внутреннего и внешнего рынка (Есенғалиева и др., 2021).

Такое одностороннее отношение привело к массовому расширению ареала разведения курдючных мясо-сальных овец, тогда как каракульские овцы, которые лучше приспособлены к экстремальным условиям пустынь (Mamatov, 2020), не только подвергались жесткому селекционному давлению, но и оказались искусственно изолированы от конкуренции, хотя каракульские шкурки благодаря высоким эстетическим и товарным свойствам пользовались повышенным спросом на потребительских рынках многих стран. Кроме того, каракульская порода овец отличается своим богатым генофондом, поскольку каждая внутривидовая популяция имеет сложную генетическую структуру по окраске, от-

тенкам, расцветками и смушковым признакам и это многообразие образует полиморфизм породы, не имеющие ни одна порода сельскохозяйственных животных. При разведении цветных каракульских овец, кроме стандартных окрасок и расцветок наблюдается расщепление особей особо редчайших оригинальных окрасок и расцветок – бежевой (шатури), камар (коричневая), пепельной, бурой, червонной, песочный и другие (Гигинейшвили, 1976), что представляют из себя источником генетического материала для селекции будущего (Охапкин и др., 1997).

Однако селекция на получение таких животных не проводится из-за низкой частоты их встречаемости в популяциях каракульских овец, хотя эти окраски и расцветки могут значительно обогатить фенотипическое разнообразие генофонда породы. Такая специфическая особенность породы указывает на ее высокую гетерозиготность и является ценнейшим резервом генетической изменчивости в селекции каракульских овец. Подобное многообразие генетических ресурсов каракульских овец сформировалось под влиянием как естественного, так и направленного человеком отбора, адаптированного к конкретным условиям среды, в которых развивались различные внутривидовые типы, а также в результате случайных генетических процессов, протекающих в популяциях (Алибаев&Бекетауов,2002).

Бежевая окраска – одно из наиболее оригинально-красивых и редких окрасок каракульских овец. Генетическая особенность бежевой окраски заключается в том, что она обладает рецессивным аллеломорфом. Так, например, согласно закону частоты гамет Г. Менделя (Айала&Кайгер, 1987), можно рассмотреть явление доминирования, правило единообразия гибридов первого поколения и расщепления их во втором поколении на примере моногибридного скрещивания коричневого (AA) с бежевой (aa) окраской. При таком скрещивании особи первого поколения (F1) в соответствии с правилом единообразия все коричневые, но они образуют двух типов аллелей «А» и «а». При скрещивании на основе равновероятного сочетания этих двух типов аллелей получается три типа генотипа особи: «AA» (гомозиготную по доминантному признаку), «Aa» (гетерозиготную особь) и «aa» (гомозиготную по рецессивному признаку). Коричневая окраска доминирует над бежевой окраской, поэтому во втором поколении (F2) происходит расщепление

особей в соотношении: 3 коричневые и 1 бежевая окраска. Бежевая окраска F2 при дальнейшем размножении будет давать только бежевое потомство.

Приведенный генетический анализ свидетельствует о том, что размножение бежевой окраски традиционным селекционным разнородным подбором по окраске очень требует длительный срок. Как отмечают исследователи, получение значительного поголовья животных с ценными характеристиками за короткий период традиционными методами разведения невозможно (Naqvi et al., 2001). Из-за сложности проведение селекционных работ и малочисленности овец бежевой окраски их генетические ресурсы с каждым годом интенсивно сокращаются. Эти обстоятельства настаивают сохранения особей бежевой окраски и разработку прогрессивных нетрадиционных методов ускоренного их размножения. В этом аспекте большую роль играет биотехнология воспроизводства животных с использованием метода трансплантации эмбрионов. Как показывают исследования, применение технологий суперовуляции и трансплантации эмбрионов позволяет значительно увеличить выход эмбрионов от одной самки-донора и ускорить воспроизводство ценных генотипов (Gharbi et al., 2012; Khan et al., 2022)

Кроме того, использование различных схем гормональной стимуляции обеспечивает повышение эффективности получения и качества эмбрионов у овец (Ayubazov et al., 2022; Bari et al., 2000; Sherzer et al., 2008).

Трансплантация эмбрионов – эффективное достижение в биотехнологии воспроизводства сельскохозяйственных животных, особенно у моноплодных животных. Основным назначением метода трансплантации эмбрионов в животноводстве – рациональное и интенсивное использование ценных генотипов – самок в качестве доноров.

В этом аспекте для эффективного использования метода трансплантации эмбрионов наибольший интерес представляет получение как можно большего количества потомства от каждой ценной в селекционно-генетическом плане самки-донора. Поэтому зарубежные ученые (Cherardi & Martin, 1978; Гордон, 1988) и исследователи СНГ (Эрнст & Сергеев, 1989, Мухамедгалиев & Тойшибеков, 1981) придавали и придают большое значение вопросам разработки наиболее надежных приемов индукции суперовуляции у самок-доноров.

Принципиальные вопросы направленные на регуляцию плодовитости овец путем инъекции и в определенные периоды полового цикла гонадотропных гормонов разработаны еще в 30-40-х годах М.М. Завадовским и его последователями (Belozergov, 2018). В их исследованиях ставилась задача получения как можно большего процента двоен.

Индукция более высокого уровня суперовуляции путем обработки самок гонадотропными гормонами приобретает особое значение в исследованиях по трансплантации эмбрионов сельскохозяйственных животных, ибо отпадает необходимость вынашивания плодов донорскими самками (Амарбаев, 1969; Заверьяев, 1989; Алибаев & Бекетауов, 2002), и тем самым повышает эффективность получения жизнеспособных эмбрионов и уровень воспроизводства животных (Maciel et al., 2017; Ramos & Silva, 2018).

Поэтому изыскание возможностей получения максимального количества пригодных для трансплантации эмбрионов, было, есть и остается проблемным вопросом при широком ее внедрении в практику разведения сельскохозяйственных животных.

Особенно актуальное значение приобретает многократное вызывание суперовуляции у маток-доноров бежевой окраски и данное направление исследования позволит получить качественно новые данные, раскрывающий механизм действия гонадотропных гормонов на организм редко встречающихся в популяциях овцематок бежевой окраски с рецессивными аллелями и на качество получаемых от них эмбрионов.

### Материалы и методы исследования

Исследования проводились в к/х «Төре» Сарыагашского района Туркестанской области.

Объектом исследования послужили каракульские овцы разных оттенков бежевой окраски в количестве 7 голов овцематок и 3 голов баранов – производителей, а материалом для исследований явились яичники овцематок и эмбрионы.

Экспериментальные работы проводились по следующей схеме:

В качестве гормональной индукции суперовуляции у доноров использовали препарат ГСЖК, приготовленного в научно-исследовательской лаборатории «Сельскохозяйственная лаборатория» Южно-Казахстанского университета имени М. Ауезова.

**Таблица 1**  
Схема исследования

Овцематки бежевой окраски	
Первый этап	Второй этап
Выборка овцематок в охоте	Выборка овцематок в охоте на 22-25 день после вымывания
Инъекция препарата ГСЖК на 13-14 день полового цикла	Инъекция препарата ГСЖК на 14-16 день полового цикла
Выявление в охоте доноров и осеменение их с баранами бежевой окраски	Выявление в охоте доноров и осеменение их с баранами бежевой окраски
Вымывание эмбрионов на 3-4 день после осеменения	Вымывание эмбрионов на 3-4 день после осеменения
Оценка качества эмбрионов	

По мере прихода овцематок бежевой окраски в охоту после гормональной обработки их осеменяли соответствующими баранами по окраске.

Хирургическую операцию по извлечению эмбрионов проводили по общепринятой методике, разработанной в ВНИИЖ «Методические рекомендации по трансплантации эмбрионов у овец» (Минсельхозпрод РФ, 2000).

Качество эмбрионов оценивали по «Инструкция по технологии работы организаций по искусственному осеменению и трансплантации эмбрионов сельскохозяйственных животных» (Романов и др., 2003).

Полученные материалы обработаны биометрическим методом (Плохинский, 1980).

### Результаты исследования и их обсуждение

В начало случного периода отобраны 7 голов каракульских овцематок бежевой окраски пришедших естественно в охоту и изучали их длительность полового цикла (таблица 2). Продолжительность полового цикла у овцематок были разными в зависимости от их интенсивности бежевой окраски. Так, длительность полового цикла у маток светло-бежевой окраски составила в среднем 15,5 дней, у овец бежевой окраски со средним оттенком – 16,5 дней и у овцематок бежевой окраски с темной вариацией – 17,3 дней. Разница между этими группами овцематок по продолжительности полового цикла примерно 1 день. Отсюда можно отметить, что с потемне-

нием оттенков у овец бежевой окраски половой цикл удлиняется.

В целом, длительность первого полового цикла у изученных групп овец колебалась между 15 и 18 днями со средним показателем  $16,57 \pm 0,340$  дней.

Аналогичная тенденция по продолжительности полового цикла у овец установлена и во вто-

ром цикле. Однако, мы заметили, что половой цикл во второй половине случного периода удлиняется в пределах от 1 до 3 дней (17-20 дней) в зависимости от интенсивности бежевой окраски т.е. составил в среднем  $18,57 \pm 0,340$  дней. Разница продолжительности полового цикла между первым и вторым циклом статистически высоко достоверны ( $P < 0,001$ ).

**Таблица 2**

*Продолжительность полового цикла у доноров*

Группа овцематок по интенсивности окраски	Овцематка	Длительность полового цикла, дней		Дни прихода в охоту после извлечения эмбрионов	Дни от прихода в охоту до повторного инъекции препарата
		до извлечения эмбрионов	после извлечения эмбрионов		
Первая группа (светлая)	Первая	16	17	22	36
	Вторая	15	18	21	35
Вторая группа (средняя)	Первая	16	19	19	34
	Вторая	17	18	21	35
Третья группа (тёмная)	Первая	17	20	19	35
	Вторая	18	19	19	34
	Третья	17	19	18	33
В среднем	7	$16,57 \pm 0,340$	$18,57 \pm 0,340$	$19,86 \pm 0,510$	$34,57 \pm 0,340$

Использование многократно в качестве доноров особо ценных в племенном отношении овец с редкой окраской при трансплантации эмбрионов имеет большое экономическое значение. Однако, длительность инволюции организма после гормональной обработки и сроки восстановления незначительной травмы рога матки и яйцевода, полученные во время хирургического извлечения эмбрионов, существенно ограничивают возобновление их половой цикличности.

Нами экспериментально установлено, что длительность процесса инволюции репродуктивных органов у овцематок после первого хирургического вмешательства, значительно отличается в зависимости от выраженности окраски. Например, овцематки светло-бежевой окраски отличались более удлиненным периодом инволюции (в среднем 21,5 дней), у овцематок со средним оттенком бежевой окраски составил в среднем 20 дней, а у доноров темно-бежевой окраски, укороченный срок восстановления и составил в среднем 18,7 дней. В целом продолжительность инволюционного периода после первого извлечения эмбрионов составила в среднем  $19,86 \pm 0,510$  дней.

Приведенные данные показывают, что после восстановления половой цикличности у доноров, высокий порог активности яичников у овцематок светло бежевой окраски соответствуют к 35-36 дню после прихода в охоту второй раз, у овец-доноров со средним оттенком – к 34-35 дню и у темно-бежевых овцематок к 33-35 дню. А эти данные являются важными показателями при повторной индукции полиовуляции у овцематок редких окрасок.

На основании этих результатов можно предполагать, что оптимальным днем первой обработки овец-доноров гонадотропином СЖК является 13-14 день первого эстрального цикла, а для повторного использования их в качестве доноров, эффективным днем обработки считаем 14-16 день второго полового цикла после восстановления их половой цикличности (18-22 дней).

Изучение чувствительности яичников доноров на инъекции гонадотропина в дозе 26 МЕ/кг живой массы показало, что число индуцированных к росту фолликулов при первой обработке в среднем на донора составило  $11,14 \pm 0,649$  штук, а во второй –  $8,71 \pm 0,388$  штук, что ниже на 21,8% с достоверностью  $P < 0,01$ .

**Таблица 3***Реакция яичников овцематок доноров на повторную индукцию полиовуляции*

Показатели	Ед. изм.	Кратность обработки		В среднем
		первая	вторая	
Обработано овцематок-доноров	гол.	7	7	14
Число фолликулов	шт.	78	61	139
На донора	шт.	11,14 ± 0,649	8,71 ± 0,388	9,93 ± 0,508
Из них овулировавших фолликулов	шт.	64	41	105
	%	82,1	67,2	75,5
На донора	шт.	9,14 ± 0,739	5,86 ± 0,318	7,50 ± 0,596
Неовулировавшие фолликулы	шт.	17,9	32,8	24,5

Степень овуляции фолликулов в первом варианте составила 82,1% и во втором – 67,2%. Число овуляций соответственно составило на донора 9,14 ± 0,739 и 5,86 ± 0,318 штук. Больше

неовулировавших фолликулов отмечено во второй обработке (32,8%), чем первой (17,9%). В среднем число овуляций составило 7,50 ± 0,596 штук на донора (таблица 3).

**Таблица 4***Число вымытых эмбрионов в зависимости от кратности обработки доноров*

Показатели	Ед. изм.	Кратность обработки		В среднем
		первая	вторая	
Число овцематок-доноров	гол.	7	7	14
Всего вымыто эмбрионов и яйцеклетки	шт.	62	39	101
На донора	шт.	8,86 ± 0,792	5,57 ± 0,275	7,21 ± 0,607
Из них эмбрионы	шт.	57	36	93
	%	91,9	92,3	92,1
На донора	шт.	8,14 ± 0,740	5,14 ± 0,241	6,64 ± 0,559
Неоплодотворенных яйцеклеток	шт.	5	3	8
	%	8,1	7,7	7,9

Выход эмбрионов на донора при первой обработке был выше и составил 8,14 ± 0,740 штук, во второй ниже на 3 эмбрион и в среднем составил на донора 5,14 ± 0,241 штук (таблица 4). В целом,

число эмбрионов при повторной обработке, хотя ниже, но обеспечивают дополнительно получить 36 эмбрионов, что важно при размножении особо ценных редко наследуемых окрасок.

**Таблица 5***Качество эмбрионов в зависимости от повторности обработки доноров*

Показатели	Ед. изм.	Кратность обработки		В среднем
		первая	вторая	
Всего исследовано эмбрионов	шт.	57	36	93
Качество эмбрионов: отличное	%	21,1	13,9	18,3
хорошее	%	45,6	47,2	46,2
удовлетворительное	%	21,1	33,3	25,8
непригодное	%	12,2	5,6	9,7

Из данных таблицы 5 видно, что эмбрионы, полученные от овцематок, повторно использованных в качестве доноров, почти не уступают по качеству эмбрионов в сравнительном аспекте от первой обработки. При этом, число эмбрионов отличного и хорошего качества составило соответственно 66,7% и 61,1% ( $P > 0,05$ ).

Таким образом, предлагаемый способ позволяет дополнительно получить 3,1 эмбриона на донора высокого качества от овцематки редких окрасок по сравнению с традиционным способом и указывают о возможности использования два раза в течении случного сезона, качество продуцента эмбрионов и многократного извлечения эмбрионов от одних и тех же доноров непосредственно в практике воспроизводства особо ценных в племенном отношении сельскохозяйственных животных для решения ряда теоретических и практических вопросов по сохранению и размножению каракульских овец редких окрасок.

### **Заключение**

На основе анализа влияние гормонального препарата на реакции яичников, качество эмбрионов каракульских овец бежевой окраски можно сделать следующие выводы:

- уровень суперовуляции каракульских маток бежевой окраски очень высока и в среднем составило 9,14 овуляции на донора;

- установлено, что выраженность бежевой окраски существенно оказывает влияние на степень овуляции фолликулов, особенно светло-бежевые генотипы имели более высокую реакцию на гормональный препарат (11,5 овуляции), а темно-бежевые генотипы имели более низкую (7,33 овуляции);

- установлено, что разница по числу овуляции у доноров-овцематки с разной выраженностью бежевой окраски была статистически достоверной в пределах от  $P < 0,01$  до  $P < 0,001$ , значит, при отборе в качестве доноров эмбрионов, необходимо придавать особое внимание на выраженность их бежевой окраски;

- установлено, что инволюционный период репродуктивных органов, после первого извлечения эмбрионов у доноров хирургическим методом значительно отличается в зависимости от выраженности их бежевой окраски т.е. овцематки светло-бежевой окраски отличались более удлиненным периодом инволюции (в среднем 21,5 дней), у овцематок со средним оттенком бежевой окраски составил в среднем 20 дней, а у доноров темно-бежевой окраски, укороченный срок восстановления и составил 18,7 дней в среднем;

- повторная обработка для вызывания суперовуляции у овцематок бежевой окраски позволила получить дополнительно 5,86 овуляции на каждого донора, то есть уровень овуляции можно увеличить в 1,6 раз и количество качественных эмбрионов в 1,7 раз за год.

### **Конфликт интересов**

Все авторы прочитали и ознакомлены с содержанием статьи и не имеют конфликта интересов.

### **Вклад авторов**

*Бигараева А.Т.: Исследование, проведение исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных; Алибаев Н.: Научное руководство, Концептуализация – идеи; формулирование или развитие общих целей и задач исследования; Бекетауов О.: Формальный анализ, применение статистических, математических, вычислительных или других формальных методов для анализа или синтеза данных исследования; Бигара Т.С.: Визуализация, подготовка, создание и/или представление опубликованной работы, в частности визуализация и представление данных; Ермакбаева А.Т.: Исследование, проведение исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных; Еркекулова К.Е.: Исследование, проведение исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных.*

## References

- Alibaev, N., & Beketauov, O. (2002). *Biotehnologicheskie issledovaniya v Alibaev, N., & Beketauov, O. (2002). Biotehnologicheskie issledovaniya v karakulevodstve: dostizheniya i perspektivy razvitiya* [Biotechnological research in Karakul sheep breeding: achievements and development prospects]. In *Karakulevodstvo Kazahstana: istoriya i problemy razvitiya* (pp. 55–59). Bastau.
- Alibaev, N., & Beketauov, O. (2002). *Sushchnost' problemy sohraneniya geneticheskikh resursov karakul'skoj porody ovec* [The essence of the problem of conserving genetic resources of the Karakul sheep breed]. *Vestnik sel'skohozyajstvennoj nauki Kazahstana*, 12, 11–13.
- Amarbaev, A.-Sh. M. (1969). *Gormonal'nye metody povysheniya plodovitosti ovec* [Hormonal methods for increasing sheep fertility]. Kainar. 189 p.
- Ayala, F., & Kiger, J. (1987). *Sovremennaya genetika* [Modern genetics] (Vol. 1, pp. 37–50). Mir Publishers.
- Aybazov, M., Selionova, M., Trukhachev, V., Malorodov, V., Yuldashbayev, Y., & Easa, A. A. (2023). Embryo production and transplantation in non-breeding season of meat sheep breeds by stimulating superovulation with different follicle-stimulating hormone preparations. *Reproduction in domestic animals = Zuchthygiene*, 58(2), 230–237. <https://doi.org/10.1111/rda.14279>
- Bari, F., Khalid, M., Haresign, W., Murray, A., & Merrell, B. (2000). Effect of mating system, flushing procedure, progesterone dose and donor ewe age on the yield and quality of embryos within a MOET program in sheep. *Theriogenology*, 53(3), 727–742. [https://doi.org/10.1016/S0093-691X\(99\)00270-8](https://doi.org/10.1016/S0093-691X(99)00270-8)
- Belozеров, O. P. (2018). *M. M. Zavadovskij i dinamika razvitiya organizma, ili ob odnoj zabytoj programme izucheniya individual'nogo razvitiya* [M. M. Zavadovsky and the dynamics of organism development, or on a forgotten program for studying individual development]. *Istoriko-biologicheskie issledovaniya*, 10(4), 39–71. doi: 10.24411/2076-8176-2018-11976
- Cherardi, P. B., & Martin, G. B. (1978). The effect of multiple injections of pregnant mare's serum gonadotrophin on the ovarian activity of Merino ewes. *Proceedings of the Australian Society of Animal Production*, 12, 185.
- Ernst, L. K., & Sergeev, N. I. (1989). *Transplantaciya embrionov sel'skohozyajstvennykh zivotnykh* [Embryo transplantation in farm animals]. Agropromizdat. 302 p.
- Esengalieva, S. M., Mansurova, M. A., Mahmudov, A. D., & Fedorchenko, L. V. (2021). *Sovremennoe sostoyanie i tendenciya razvitiya zivotnovodstva v Respublike Kazahstan* [Current state and development trend of animal husbandry in the Republic of Kazakhstan]. *Ekonomika: strategiya i praktika*, 16(2), 134–144. <https://doi.org/10.51176/1997-9967-2021-2-134-144>
- Gharbi, M., Trigui-Gerrouche, N., Sassi, T., & Ben Hmida, M. (2012). Lengthening the superstimulatory treatment protocol from 4 to 7 days results in an increase in the superovulatory response with no adverse effects on oocyte/embryo competence in beef cows. *Theriogenology*, 78(1), 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2012.02.010>
- Gigineishvili, N. S. (1976). *Plemennaya rabota v cvetnom karakulevodstve* [Breeding work in colored Karakul sheep breeding] (pp. 32–33). Kolos.
- Gizaw, S., Komen, H., Hanotte, O., & van Arendonk, J.A.M. (2011). Characterization and conservation of indigenous sheep genetic resources: a review. *Animal*, 5 (1), 27-38. Available at: <https://hdl.handle.net/10568/5371>
- Gordon, I. (1988). *Kontrol' vosпроизводства sel'skohozyajstvennykh zivotnykh* [Control of reproduction in farm animals] (M. D. Gel'bert, Trans.; A. F. Orlov, Ed.). Agropromizdat. 415 p.
- Khan, S. U., Jamal, M. A., Su, Y., Wei, H. J., Qing, Y., & Cheng, W. (2022). Towards Improving the Outcomes of Multiple Ovulation and Embryo Transfer in Sheep, with Particular Focus on Donor Superovulation. *Veterinary sciences*, 9(3), 117. <https://doi.org/10.3390/vetsci9030117>
- Maciel, G.S., Rodrigues, M.G.K., da Silva, K.P.C., Nociti, R.P., Uzcatequi, R.A.R., Santos, V.E.K., Feliciano, M.A.R., Vicente, W.R.R., & Oliveira, M.E.F. (2017). Ovarian superstimulation treatment for multiple ovulation and embryo transfer programs in sheep. *Investigacao*, 16 (8). <https://doi.org/10.26843/investigacao.v16i8.1888>
- Ministry of Agriculture and Food of the Russian Federation. (2000). *Instrukciya po tekhnologii raboty organizacij po iskusstvennomu osemeneniyu i transplantacii embrionov sel'skohozyajstvennykh zivotnykh* [Instructions on the technology of organizations for artificial insemination and embryo transplantation in farm animals]. VNIIPlem. 23 p.
- Mukhamedgaliev, F. M., & Toishibekov, M. M. (1981). *Transplantaciya zigot v plemennom ovcevodstve* [Zygote transplantation in pedigree sheep breeding]. Nauka. 168 p.
- Naqvi, S. M., Joshi, A., Das, G. K., & Mittal, J. P. (2001). Development and application of ovine reproductive technologies: an Indian experience. *Small ruminant research : the journal of the International Goat Association*, 39(3), 199–208. [https://doi.org/10.1016/s0921-4488\(00\)00200-5](https://doi.org/10.1016/s0921-4488(00)00200-5)
- Okhapkin, S. K., Zakharov, V. M., Khrunova, A. I., & Bogatnov, N. P. (1997). *Sohranenie genofonda redkih i ischezayushchih porod krupnogo rogatogo skota* [Preservation of the gene pool of rare and endangered cattle breeds]. In *Sovremennye aspekty selekcii, biotekhnologii, informacii v plemennom zivotnovodstve* (pp. 98–105). VNIIPlem.
- Plokhinskiy, N. A. (1980). *Algoritmy biometrii* [Algorithms of biometry] (B. V. Gnedenko, Ed.). Moscow State University Publishing House. 150 p.
- Ramos, A. F., & Silva, B. D. M. (2018). Hormonal protocols in small ruminants. In *Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia* (Vol. 74, pp. 618–626). ALICE.
- Romanov, A. A., Sovetkin, S. V., & Smirnov, V. T. (2003). *Instrukciya po tekhnologii raboty organizacij po iskusstvennomu osemeneniyu i transplantacii embrionov sel'skohozyajstvennykh zivotnykh* [Instructions on the technology of organizations for artificial insemination and embryo transplantation in farm animals]. VNIIPlem. 100 p.

Scherzer, J., Fayrer-Hosken, R. A., Ray, L., Hurley, D. J., & Heusner, G. L. (2008). Advancements in large animal embryo transfer and related biotechnologies. *Reproduction in domestic animals = Zuchthygiene*, 43(3), 371–376. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2007.00921.x>

Variability of some selection parameters of Karakul sheep in the conditions of the sandy desert. (2022). *Texas Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 9, 59–61. <https://zienjournals.com/index.php/tjabs/article/view/2551>

Zavertyaev, B. P. (1989). *Biotehnologiya v vosпроизводстве i selekcii krupnogo rogatogo skota* [Biotechnology in reproduction and selection of cattle]. Agropromizdat. 225 p.

**Сведения об авторах:**

Бигараева Айгерим Туреқызы – докторант кафедры «Биотехнология» Южно-Казахстанского университета имени М. Ауэзова» (Шымкент, Казахстан, e-mail: bigarayeva94@mail.ru).

Алибаев Нурадин – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, директор научного центра «Биотехнология» Южно-Казахстанского университета им. М. Ауэзова, (Шымкент, Казахстан, e-mail: nuradinkz@mail.ru).

Бекетауов Орынбек – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, старший научный сотрудник НИИ «Сельскохозяйственная биотехнология» Южно-Казахстанского университета имени М. Ауэзова (Шымкент, Казахстан, e-mail: obeketauov@inbox.ru).

Бигара Төре Сейдуалыұлы – кандидат сельскохозяйственных наук, старший преподаватель, доцент кафедры «Химия и биология», университет имени Ж.А. Ташенева (Шымкент, Казахстан, e-mail: tore.bigara@bk.ru).

Ермекбаева Акбопе Тонтаевна – доцент кафедры «Биотехнология», Южно-Казахстанского университета им. М. Ауэзова (Шымкент, Казахстан, e-mail: akbope.1988@mail.ru).

**Information about the authors:**

Bigarayeva Aigerim Turekyzy – Doctoral student of the Department of Biotechnology of M. Auezov South Kazakhstan University, specialty 8D05120 Biotechnological aspects in the agro-industrial complex (Shymkent, Kazakhstan, e-mail: bigarayeva94@mail.ru).

Alibayev Nuradin – doctor of agriculture Sciences, Professor, Director of the Research Center “Biotechnology” of the M. Auezov South Kazakhstan University (Shymkent, Kazakhstan, e-mail: nuradinkz@mail.ru).

Beketauov Orynбек – doctor of agriculture Sciences, professor, Senior Researcher at the Research Institute of Agricultural Biotechnology of the M. Auezov South Kazakhstan University (Shymkent, Kazakhstan, e-mail: obeketauov@inbox.ru).

Bigara Tore Seidualyuly – Candidate of Agricultural Sciences, Senior Lecturer, Associate Professor of the Department of Chemistry and Biology, Zh.A. Tashenev University (Shymkent, Kazakhstan, e-mail: tore.bigara@bk.ru).

Yermekbayeva Akbope Tontaevna – PhD, Associate Professor, Department of Biotechnology, M. Auezov South Kazakhstan University (Shymkent, Kazakhstan, e-mail: akbope.1988@mail.ru).

**Авторлар туралы мәлімет:**

Бигараева Айгерим Туреқызы – М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университетінің «Биотехнология» кафедрасының докторанты (Шымкент, Қазақстан, e-mail: bigarayeva94@mail.ru).

Алибаев Нурадин – ауыл шаруашылығы ғылымдарының докторы, профессор, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университетінің «Биотехнология» Ғылыми орталығының директоры (Шымкент, Қазақстан, e-mail: nuradinkz@mail.ru).

Бекетауов Орынбек – ауыл шаруашылығы ғылымдарының докторы, профессор, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университетінің «Ауыл шаруашылығы биотехнологиясы» ғылыми-зерттеу зертханасының аға ғылыми қызметкері (Шымкент, Қазақстан, e-mail: obeketauov@inbox.ru).

Бигара Төре Сейдуалыұлы – ауыл шаруашылығы ғылымдарының кандидаты, аға оқытушы, Ж.А. Ташенов атындағы университетінің «Химия және биология» кафедрасының доценті (Шымкент, Қазақстан, e-mail: tore.bigara@bk.ru).

Ермекбаева Ақбопе Тонтаевна – М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университетінің «Биотехнология» кафедрасының доценті (Шымкент, Қазақстан, e-mail: akbope.1988@mail.ru).

Поступило 17 декабря 2025 года  
Повторно загружено 6 марта 2026 года  
Принято 15 июня 2026 года

IRSTI 68.37.33

<https://doi.org/10.26577/bb107220269>

M.A. Khusnitdinova<sup>1,2</sup> \*, A.S. Pozharskiy<sup>1</sup> , A.S. Mendybayeva<sup>1,2</sup> ,  
G.A. Suleimanova<sup>3</sup> , G.N. Kairova<sup>3</sup> , A.O. Sagitov<sup>1,2</sup> 

<sup>1</sup>Laboratory of Molecular Biology, Institute of Plant Biology and Biotechnology, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Research Center AgriBioTech, Almaty, Kazakhstan

<sup>3</sup>«The Kazakh National Agrarian Research University», Almaty, Kazakhstan

\*e-mail: germironame@gmail.com

## MAPPING OF WEED DISTRIBUTION IN SOUTHERN KAZAKHSTAN

This study presents the results of mapping the distribution of economically important and quarantine weed species in southern Kazakhstan. Field surveys were conducted in the Almaty, Zhetysu, Zhambyl, and Turkestan regions, covering agricultural lands, roadside habitats, fallow fields, and irrigated areas. Georeferenced sampling was carried out to determine the current distribution range and infestation level of major weed species.

A total of 1,078 specimens of *Rhaponticum repens* (Russian knapweed), 1,153 specimens of *Ambrosia artemisiifolia* (common ragweed), and 1,027 specimens of *Cuscuta campestris* (field dodder) were collected and analyzed. Weed distribution mapping was performed using QGIS 3.28, while geographic coordinates were processed with the Lat Lon Tools plugin. The resulting thematic maps enabled visualization of infestation hotspots and distribution patterns across the study area.

The results showed that transportation corridors, irrigated agroecosystems, and intensively managed agricultural landscapes represent major pathways for weed dispersal. *R. repens* was primarily associated with arid and foothill environments, *C. campestris* was mainly distributed in irrigated croplands and roadside habitats, whereas *A. artemisiifolia* exhibited a fragmented but expanding distribution near urbanized and highly disturbed areas. The study demonstrates the value of GIS-based mapping as an effective tool for monitoring quarantine weeds, assessing phytosanitary risks, and supporting weed management strategies in southern Kazakhstan.

**Keywords:** quarantine weeds, distribution mapping, GIS, *Rhaponticum repens*, *Ambrosia artemisiifolia*, *Cuscuta campestris*, QGIS, phytosanitary monitoring.

М.А. Хуснитдинова<sup>1,2\*</sup>, А.С. Пожарский<sup>1</sup>, А.С. Мендыбаева<sup>1,2</sup>,  
Г.А. Сулейманова<sup>3</sup>, Г.Н. Қайрова<sup>3</sup>, А.О. Сағитов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Молекулалық биология зертханасы, Өсімдіктер биологиясы  
және биотехнологиясы институты, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>«AgriBioTech» ғылыми-зерттеу орталығы» ЖШС, Алматы, Қазақстан

<sup>3</sup>«Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті», Алматы, Қазақстан

\*e-mail: germironame@gmail.com

### Қазақстанның оңтүстігіндегі арамшөптердің таралуын картаға түсіру

Осы зерттеуде Қазақстанның оңтүстік өңірлерінде таралған шаруашылық тұрғысынан маңызды және карантиндік арамшөп түрлерінің таралуын картографиялау нәтижелері ұсынылған. Далалық зерттеулер Алматы, Жетісу, Жамбыл және Түркістан облыстарының аумағында жүргізіліп, ауыл шаруашылығы алқаптарын, жол бойындағы аумақтарды, тыңайған жерлерді және суармалы егістіктерді қамтыды. Негізгі арамшөп түрлерінің қазіргі таралу аймағы мен таралу қарқындылығын нақтылау мақсатында географиялық координаттармен белгіленген үлгілер жиналды.

Зерттеу барысында *Rhaponticum repens* (жатаған кекіре) түрінің 1078 үлгісі, *Ambrosia artemisiifolia* (жусан жапырақты амброзия) түрінің 1153 үлгісі және *Cuscuta campestris* (дала арамсоюуы) түрінің 1027 үлгісі жиналып, талданды. Арамшөптердің таралуын картографиялау QGIS 3.28 бағдарламалық ортасында жүзеге асырылды, ал географиялық координаттарды өңдеу үшін Lat Lon Tools плагині қолданылды. Алынған мәліметтер негізінде таралу ошақтары мен зерттелген түрлердің кеңістіктік орналасу ерекшеліктерін көрсететін тақырыптық карталар жасалды.

Зерттеу нәтижелері көлік дәліздері, суармалы агроэкожүйелер және қарқынды

*C. campestris* көбінесе суармалы егістіктер мен жол бойындағы учаскелерде кездескен, ал *A. artemisiifolia* урбандалған және антропогендік әсерге ұшыраған аумақтарда үзік-үзік, бірақ кеңірек үрдісін көрсеткен. Зерттеу нәтижелері карантиндік арамшөптерді мониторингтеу, фитосанитариялық тәуекелдерді бағалау және оларды басқару стратегияларын әзірлеу үшін ГАЖ-негізіндегі картографиялаудың маңыздылығын дәлелдейді.

**Түйін сөздер:** карантиндік арамшөптер, картографиялау, ГАЖ, *Rhaponticum repens*, *Ambrosia artemisiifolia*, *Cuscuta campestris*, QGIS, фитосанитариялық мониторинг.

М.А. Хуснитдинова<sup>1,2\*</sup>, А.С. Пожарский<sup>1</sup>, А.С. Мендыбаева<sup>1,2</sup>,  
Г.А. Сулейманова<sup>3</sup>, Г.Н. Кайрова<sup>3</sup>, А.О. Сағитов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Лаборатория молекулярной биологии, Институт биологии  
и биотехнологии растений, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>ТОО «Научно-исследовательский центр AgriBioTech», Алматы, Казахстан

<sup>3</sup>«Казахский национальный аграрный исследовательский университет», Алматы, Казахстан

\*e-mail: germironame@gmail.com

### Картографирование распространения сорных растений на юге Казахстана

В настоящем исследовании представлены результаты картографирования распространения хозяйственно значимых и карантинных видов сорных растений на территории южного Казахстана. Полевые обследования проводились в Алматинской, Жетысуской, Жамбылской и Туркестанской областях и охватывали сельскохозяйственные угодья, придорожные территории, залежные земли и орошаемые участки. Отбор образцов с географической привязкой осуществлялся с целью уточнения современного ареала и степени распространения основных видов сорных растений.

Всего было собрано и проанализировано 1078 образцов *Rhaponticum repens* (горчак ползучий), 1153 образца *Ambrosia artemisiifolia* (амброзия полыннолистная) и 1027 образцов *Cuscuta campestris* (повилика полевая). Картографирование распространения сорных растений выполнялось с использованием программного обеспечения QGIS 3.28, а обработка географических координат осуществлялась с помощью плагина Lat Lon Tools. На основе полученных данных были созданы тематические карты распространения, позволяющие визуализировать очаги засорённости и особенности пространственного размещения исследуемых видов.

Установлено, что транспортные коридоры, орошаемые агроэкосистемы и интенсивно используемые сельскохозяйственные ландшафты являются основными путями распространения сорных растений. Вид *R. repens* был преимущественно приурочен к засушливым и предгорным территориям, *C. campestris* чаще встречалась на орошаемых сельскохозяйственных землях и вдоль автомобильных дорог, тогда как *A. artemisiifolia* характеризовалась фрагментированным, но расширяющимся распространением вблизи урбанизированных и нарушенных местообитаний. Полученные результаты подтверждают высокую эффективность ГИС-картографирования для мониторинга карантинных сорных растений, оценки фитосанитарных рисков и разработки мер по ограничению их дальнейшего распространения.

**Ключевые слова:** карантинные сорные растения, картографирование, ГИС, *Rhaponticum repens*, *Ambrosia artemisiifolia*, *Cuscuta campestris*, QGIS, фитосанитарный мониторинг.

## Introduction

Biological invasions have long been recognized as a major ecological process shaping species distributions worldwide, with early conceptual frameworks highlighting their historical, biogeographical, and evolutionary dimensions (Di Castri, 1989; Bradley et al., 2011).

In recent decades, the ecological and economic impacts of invasive and quarantine weed species have intensified under the combined effects of climate change, land-use transformation, and increasing global connectivity. Rising temperatures, shifts in precipitation regimes, and the growing frequency

of extreme climatic events enhance the establishment, persistence, and spread of invasive plants by weakening crop competitiveness and destabilizing native plant communities (Clements & DiTommaso, 2012; Kairova et al., 2025; Liu et al., 2020). At the same time, global trade, expansion of transport infrastructure, and agricultural intensification facilitate long-distance dispersal of propagules, accelerating the accumulation of alien species across regions and national borders (Early et al., 2016; Seebens et al., 2021). These interacting drivers are particularly pronounced in arid and semi-arid regions, where limited ecological resilience increases the vulnerability of agroecosystems to biological invasions.

Central Asia represents a critical hotspot for weed invasions due to its continental climate, extensive irrigated agriculture, increasing anthropogenic pressure, and long history of land disturbance. The region is characterized by highly heterogeneous environmental conditions, including arid and semi-arid ecosystems, large-scale agricultural landscapes, and extensive transport networks that facilitate the introduction and spread of alien plant species. Recent assessments indicate that invasive weeds such as *Rhaponticum repens*, *Cuscuta campestris*, and *Ambrosia artemisiifolia* are actively expanding their distributions within Kazakhstan and neighboring countries, posing increasing threats to agricultural productivity, native biodiversity, ecosystem stability, and phytosanitary security (Kochorov et al., 2025). These species are capable of forming dense populations that compete with native vegetation and cultivated crops for water, nutrients, light, and space, resulting in substantial economic losses and ecological degradation.

The invasion success of these species is largely attributed to their high ecological plasticity, broad environmental tolerance, efficient reproductive systems, persistent soil seed banks, and multiple dispersal pathways. In addition, many invasive weeds demonstrate resistance or tolerance to conventional mechanical and chemical control measures, making their management increasingly difficult once populations become established. Climate change may further accelerate invasion processes by creating favorable conditions for range expansion and increasing the likelihood of successful establishment in previously unsuitable habitats. Recent phytosanitary studies conducted in Kazakhstan have reported a continuing increase in the occurrence and distribution of quarantine weed species, emphasizing the urgent need for region-specific monitoring programs, risk assessment tools, and science-based management strategies (Kochorov et al., 2025).

From a theoretical perspective, these patterns are consistent with ecological niche theory, which emphasizes the importance of niche conservatism, environmental filtering, propagule pressure, and non-equilibrium dynamics in determining the distribution and expansion of invasive species. Understanding these mechanisms is essential for improving predictive modeling approaches and developing effective long-term strategies for invasive weed management under changing environmental conditions (Peterson et al., 2011).

Despite growing recognition of the threat posed by invasive alien species, spatially explicit and har-

monized data on their current distribution in Central Asia remain limited. This information gap constrains the development of effective early-warning systems and evidence-based management strategies. Recent global syntheses have highlighted invasive species as one of the major drivers of biodiversity loss worldwide, with impacts exacerbated by climate change and insufficiently coordinated biosecurity responses (Pyšek et al., 2020; Roy et al., 2024). In response, international initiatives such as the InvasiBES project have emphasized the need to integrate ecological data, spatial analyses, and management frameworks to better understand and mitigate the impacts of invasive alien species on biodiversity and ecosystem services (Gallardo et al., 2023).

In the context of increasing pressure on agricultural systems, invasive and quarantine weeds represent not only an ecological challenge but also a significant economic constraint for crop production. Yield losses, increased management costs, and restrictions on agricultural trade associated with quarantine species underscore the need for improved surveillance and control strategies. In regions with intensive irrigation and rapidly expanding agricultural infrastructure, such as southern Kazakhstan, the risk of weed introduction and secondary spread is particularly high. Despite this, regional-scale assessments integrating field observations with GIS-based mapping remain scarce. Addressing this gap is essential for developing proactive phytosanitary measures, improving early-warning systems, and supporting evidence-based decision-making aimed at reducing the long-term impacts of invasive weeds on agroecosystem sustainability.

Advances in geospatial technologies now provide powerful tools for addressing these challenges. Geographic Information Systems (GIS), combined with georeferenced field surveys, enable the identification of invasion hotspots, dispersal pathways, and key environmental drivers of weed spread at regional and landscape scales. GIS-based approaches have proven effective for early detection, invasion risk mapping, and prioritization of control measures in agricultural and semi-natural ecosystems. Spatial information on weed distribution is particularly important for supporting non-chemical and integrated weed management strategies, which are increasingly promoted as sustainable alternatives to herbicide-based control (Pala & Mennan, 2022). In regions undergoing rapid environmental and socio-economic change, such as southern Kazakhstan, spatial analyses represent a critical decision-support tool for phytosanitary surveillance and integrated

weed management under current and future climate scenarios.

Beyond documenting invasion patterns, recent studies emphasize the importance of integrating restoration and adaptive management strategies to mitigate the impacts of invasive plant species under ongoing climate change. Restoration-based approaches, including habitat rehabilitation and ecosystem resilience enhancement, are increasingly recognized as essential components of long-term invasion management (Selvakumar et al., 2026).

The objective of this study was to map the current distribution of major invasive and quarantine weed species in southern Kazakhstan using georeferenced field surveys and GIS-based mapping. Particular attention was given to species-specific occurrence patterns, infestation hotspots, and landscape features potentially associated with weed spread, with the aim of supporting phytosanitary monitoring and region-specific management strategies.

Unlike previous phytosanitary surveys in Kazakhstan, the present study provides a unified GIS-based mapping framework for three major quarantine weed species (*Rhaponticum repens*, *Cuscuta campestris*, and *Ambrosia artemisiifolia*) across four southern regions of Kazakhstan. The study generates one of the first published GIS-based distribution datasets for major quarantine weeds in southern Kazakhstan that may support future phytosanitary monitoring, invasion-risk assessment, and long-term surveillance programs.

## Materials and methods

### *Study Area and Sampling*

Field surveys were conducted in southern Kazakhstan, covering the Almaty, Zhetysu, Zhambyl, and Turkestan regions. Weed sampling was performed across agricultural fields, roadside habitats, fallow lands, and irrigated agroecosystems. A total of 30 georeferenced sampling sites were surveyed. Field surveys were conducted during the period of 28 April to 26 October 2025 within the active vegetation period of the target species, when plants could be reliably detected and identified under field conditions. The surveys were carried out during a single growing season. Sampling sites were selected using a targeted survey approach to represent the main habitat types and potential dispersal pathways of quarantine weeds in southern Kazakhstan. Priority was given to agricultural fields, irrigated croplands, field margins, roadside habitats, fallow lands, and areas located near transport or irrigation

infrastructure. At each site, weed presence was visually confirmed, GPS coordinates were recorded, and representative plant specimens were collected for further identification. Sampling intensity varied among sites depending on local infestation density; therefore, the number of collected specimens was interpreted as an indicator of local occurrence and infestation level rather than as a standardized density estimate.

Three invasive and quarantine weed species were investigated: *Rhaponticum repens*, *Cuscuta campestris* Yunck., and *Ambrosia artemisiifolia* L.

In total, 1078 specimens of *R. repens* were collected from 13 sites, 1027 specimens of *C. campestris* from 8 sites, and 1153 specimens of *A. artemisiifolia* from 9 sites. Sampling intensity varied among locations depending on infestation density.

To ensure data consistency, all field observations were recorded following a standardized sampling protocol. Sampling sites were selected to represent major land-use types, including croplands, irrigation zones, roadside habitats, and fallow lands. At each site, weed presence was visually confirmed, and representative specimens were collected for species identification. Collected specimens were labeled and documented to link field records with spatial data.

### *GIS-based mapping*

The geographic coordinates were recorded for each studied weed (30 points) across the study area using a Garmin Montana 750i GPS device (Kansas City, MO, USA). To map of the sampling locations based on the GPS coordinates, the Lat Lon Tools plugin (Lat Lon Tools, 2026) in the Quantum Geographic Information System (QGIS 3.28) (Gizachew et al., 2016; Khusnitdinova et al., 2024; Khusnitdinova et al., 2025; QGIS Association, 2026) was utilized (Figure 1, Table 1,2).

A similar GIS-based spatial framework has previously been applied for mapping plant pathogen distribution in natural ecosystems of Kazakhstan (Kerimbek et al., 2025). In the present study, georeferenced occurrence records obtained during field surveys were integrated into a GIS environment to visualize species distributions, identify infestation hotspots, and compare spatial patterns among regions. In addition to mapping the occurrence points, the distribution patterns were interpreted in relation to major habitat and landscape characteristics recorded during field surveys, including land-use type, irrigation influence, roadside disturbance, fallow vegetation, and agricultural management intensity.

**Table 1***Quarantine weed species sampling locations in the southern Kazakhstan*

	Region	No. on Map	Coordinates
<i>Rhaponticum repens</i> (1078)	Almaty Region	1	43.5369453, 77.15861351
		2	43.46000082, 79.38916905
	Zhetysu Region	3	45.75222303, 78.43444692
	Almaty Region	4	43.39638975, 76.91333573
	Turkestan Region	5	42.33305656, 69.7138913
		6	43.22416766, 69.86472466
	Almaty Region	7	43.66500087, 76.51361352
		8	44.33861198, 75.82139133
	Zhambyl Region	9	43.67638976, 76.50472463
		10	43.83666757, 74.68222465
	Almaty Region	11	43.53666752, 77.16972463
		12	43.43500084, 78.35250239
		13	43.4350009, 78.35250241
<i>Cuscuta campestris</i> (1027)	Turkestan Region	14	42.33305656, 69.7138913
	Zhetysu Region	15	44.9813897, 78.34444689
		16	43.1363898, 74.62333574
	Almaty Region	17	43.2894453, 77.17833573
		18	43.28972308, 77.17833573
	Zhetysu Region	19	44.17527857, 80.12139129
		20	44.17138968, 80.08139129
	Almaty Region	21	43.60083415, 79.42805794
	<i>Ambrosia artemisiifolia</i> (1153)	Zhetysu Region	22
23			44.976111926, 78.395280223
24		44.976111926, 78.395280223	
25		43.536667522, 77.170002402	
Almaty Region		26	43.384167524, 77.164724619
		27	43.311389743, 77.373057948
		28	43.289723081, 77.178335727
	29	43.289167525, 77.178057949	
30	43.211389757, 76.712780172		

These factors were not analyzed as independent quantitative predictors in the present study; however, they were used to support ecological interpretation of the observed spatial patterns and to identify potential habitats associated with weed establishment and spread. Particular attention was paid to areas characterized by intensive agricultural activity, transportation corridors, and disturbed habitats, which are commonly recognized as important pathways facilitating the introduction and secondary dispersal of invasive plant species. The incorporation of field observations with spatial visualization also

enabled the identification of potential relationships between weed occurrence and anthropogenic landscape modification.

This integrated methodological approach allowed for a consistent spatial comparison of infestation patterns among species and regions, providing a robust basis for subsequent analysis and interpretation. Furthermore, the generated distribution maps constitute an important baseline dataset for future phytosanitary monitoring, risk assessment, and long-term surveillance of invasive and quarantine weed species in southern Kazakhstan.

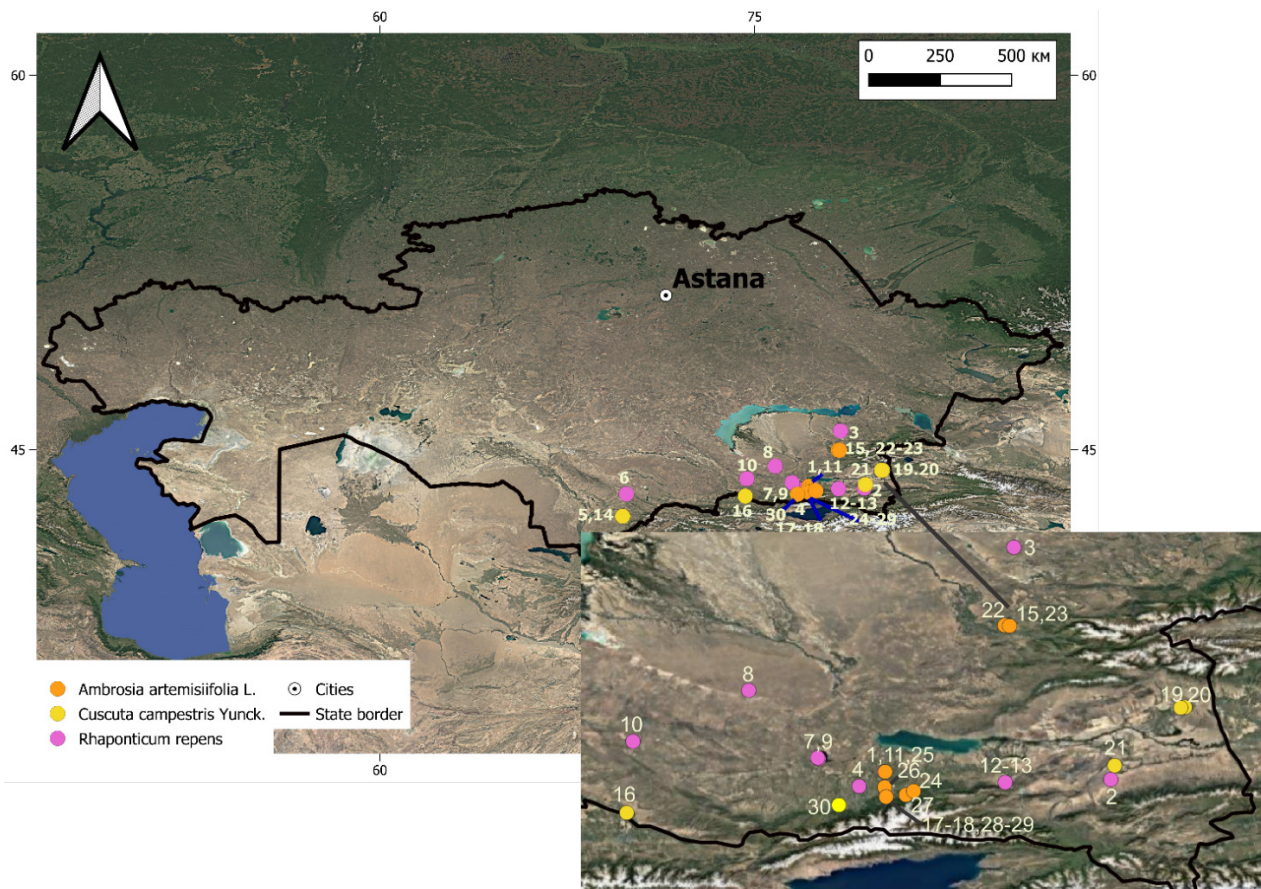
**Table 2**

Summary of occurrence records and infestation intensity of quarantine weed species in southern Kazakhstan

Species	Sites	Specimens	Mean specimens/site
<i>R. repens</i>	13	1078	82.9
<i>C. campestris</i>	8	1027	128.4
<i>A. artemisiifolia</i>	9	1153	128.1

**Figure 1**

Spatial distribution of quarantine weed species in southern Kazakhstan



## Results and discussion

GIS-based mapping revealed distinct distribution patterns among the studied weed species. Species differed in geographic coverage, infestation intensity, and habitat associations across southern Kazakhstan.

Species differed considerably in terms of geographic coverage and local infestation intensity. *R. repens* occupied 43.3% of all sites surveyed (13 of 30 locations), representing the widest geographic distribution among the weeds studied. *A. artemisiifolia* accounted for the largest number of collected

specimens (1153 individuals), whereas *C. campestris* showed the highest average infestation intensity per occupied site (128.4 specimens per site), indicating the formation of dense local populations despite its more restricted distribution.

*Rhaponticum repens* showed the broadest geographic distribution, being recorded at 13 sampling sites across arid and semi-arid landscapes of the Almaty, Zhetysu, Turkestan, and Zhambyl regions. The highest occurrence was observed in Almaty Region. This pattern may be associated with favorable climatic conditions, intensive agriculture, and high landscape connectivity; however, these factors were

not quantitatively evaluated in the present study. The species' tolerance to drought, soil disturbance, and mechanical control, together with its extensive underground root system, contributes to its successful establishment and persistence in these environments (EPPO, 2026; Jacobs & Denny, 2006). Its frequent detection in agricultural and roadside habitats also indicates that repeated mechanical disturbance, movement of soil, and landscape connectivity may contribute to local persistence and secondary spread. Therefore, disturbed habitats such as field margins, fallow lands, irrigation-adjacent areas, and roadsides may serve as important reservoirs for local persistence and further spread.

The potential consequences of *R. repens* expansion are particularly relevant for agricultural landscapes of southern Kazakhstan. Dense populations of perennial rhizomatous weeds may reduce crop competitiveness by limiting access to soil moisture, nutrients, and light. In dry regions, where water availability is one of the main constraints for crop production, such competition may increase yield instability and complicate weed management. Once established, *R. repens* populations are difficult to eradicate because mechanical control alone may stimulate vegetative regrowth from remaining root fragments. This indicates that areas with repeated soil disturbance should be considered priority zones for monitoring and long-term integrated control.

*Cuscuta campestris* was detected at 8 sites and was primarily associated with irrigated croplands, field margins, and roadside habitats. Despite fewer sampling locations, the high number of collected specimens indicates substantial local infestation levels. This pattern suggests that *C. campestris* forms dense populations once established, particularly in irrigated agroecosystems where host availability and suitable microclimatic conditions promote rapid spread. Its close association with irrigation infrastructure and transport routes highlights the importance of anthropogenic dispersal pathways. The spread of *C. campestris* may be facilitated by several human-mediated pathways, including contaminated crop seed, movement of infested plant residues, agricultural machinery, irrigation water, and transportation networks (Parker, 2012, 2022). Non-cultivated vegetation along field margins may serve as a secondary reservoir, allowing the parasite to persist outside agricultural fields and subsequently reinvade cultivated crops. The consequences of *C. campestris* infestation can be severe, as parasitic weeds directly reduce host growth and productivity, contaminate seed material, and complicate phytosanitary control. In this context, early detection be-

fore seed formation is essential, because the accumulation of seeds in the soil may support repeated infestation in subsequent growing seasons.

*Ambrosia artemisiifolia* was recorded at 9 sites, mainly within the Almaty and Zhetysu regions. The species exhibited a fragmented but expanding distribution, with higher infestation levels near urbanized areas, transport corridors, and highly disturbed agroecosystems. The large number of specimens reflects active population growth and ongoing range expansion. These distribution patterns are consistent with the species' preference for disturbed habitats and its effective dispersal through agricultural machinery and road networks. Its spread is supported by high seed production, the formation of a persistent soil seed bank, and effective dispersal through transport corridors, contaminated soil, agricultural machinery, and movement of crop products (Essl et al., 2015; Lemke et al., 2019; Skálová et al., 2017).

In agroecosystems, dense populations may compete with crops during early development and increase the cost of weed control. In disturbed urban and peri-urban habitats, the species is also important because its pollen is highly allergenic and may contribute to seasonal allergic rhinitis and other respiratory symptoms in sensitive populations (EPPO, 2026; Schaffner et al., 2020). Therefore, the detection of *A. artemisiifolia* near urbanized areas and transport routes indicates a need for coordinated phytosanitary and environmental monitoring. Control measures should focus on preventing seed production, reducing disturbed bare soil patches, and monitoring roadsides and settlement-adjacent agricultural fields as potential sources of further spread.

Comparison of occurrence records revealed contrasting invasion strategies among species. *R. repens* exhibited broad regional distribution, suggesting successful long-distance establishment across multiple habitat types. In contrast, *C. campestris* demonstrated localized but dense infestations, whereas *A. artemisiifolia* displayed an intermediate pattern characterized by fragmented distribution and active expansion in disturbed habitats.

The mapped occurrence records indicate that many infestations were located in proximity to transport corridors, irrigated agricultural systems, and intensively managed landscapes. Although no formal statistical testing of environmental predictors was conducted, these patterns suggest that anthropogenic land-use features may contribute to weed establishment and spread.

The observed distribution patterns are consistent with the ecological and land-use characteristics of southern Kazakhstan, including arid climatic condi-

tions, irrigation-dependent agriculture, and varying levels of anthropogenic disturbance. These factors create heterogeneous habitats that may facilitate weed establishment and persistence.

Recent perspectives in weed science emphasize a shift toward predictive, spatially explicit, and systems-based approaches to weed management under global change scenarios (Zimdahl & Basinger, 2024). Our findings align with recent global assessments identifying spatial monitoring, invasion forecasting, and management integration as key research priorities in modern weed science (Brainard et al., 2023).

The growing complexity of weed invasions has also contributed to the expansion of weed science as an interdisciplinary field integrating ecology, geography, and agricultural management (Shrestha et al., 2021). Similar trends in the expansion and management challenges of invasive weeds under climate change have been reported for agricultural ecosystems in other regions, highlighting the global relevance of spatially explicit monitoring approaches (Ionescu et al., 2023a, 2023b).

These findings underline the necessity of incorporating GIS-based distribution data into regional weed monitoring programs to improve early detection and management efficiency.

## Conclusion

GIS-based mapping of 30 georeferenced survey locations and 3258 collected weed specimens revealed clear differences in the distribution patterns of three major quarantine weeds in southern Kazakhstan. *Rhaponiticum repens* exhibited the broadest geographic distribution (13 sites), *Ambrosia artemisiifolia* produced the highest number of recorded specimens (1153), and *Cuscuta campestris* showed the highest local infestation intensity despite occurring at fewer locations.

The generated distribution maps identified several concentration zones associated with agricultural

landscapes, irrigated areas, roadside habitats, and other disturbed environments. The generated maps provide a baseline framework for future integration of environmental predictors, ecological niche modelling, and invasion-risk assessments.

More broadly, the findings contribute to understanding invasion dynamics in arid and semi-arid regions of Central Asia, where agroecosystems are particularly vulnerable to biological invasions. The methodological framework applied in this study can be extended to long-term monitoring programs and additional invasive species. Future research should integrate GIS-based mapping with ecological niche modeling and climate projections to improve invasion risk forecasting and support sustainable agricultural management in Kazakhstan.

## Funding

The study was funded by the Ministry of Agriculture of the Republic of Kazakhstan within the framework of a targeted funding program BR22887230 “Development of an effective population management system for quarantine pests, with limited distribution in the Republic of Kazakhstan”.

## Author Contributions

*Khusnitdinova M.A.*: Conceptualization, Methodology, Investigation, Formal Analysis, Visualization, Writing – Original Draft; *Pozharskiy A.S.*: Investigation, Methodology, Resources, Data Curation, Writing – Original Draft; *Mendybayeva A.S.*: Investigation, Methodology, Resources, Data Curation; *Suleimanova G.A.*: Investigation, Methodology, Resources, Data Curation, Writing – Original Draft; *Kairova G.N.*: Supervision, Funding Acquisition, Project Administration, Resources, Formal Analysis, Writing – Review & Editing; *Sagitov A.O.*: Supervision, Funding Acquisition, Project Administration, Resources, Formal Analysis.

## References

- Bradley, B. A., Blumenthal, D. M., Early, R., Grosholz, E. D., Lawler, J. J., Miller, L. P., Sorte, C. J. B., D’Antonio, C. M., Diez, J. M., Dukes, J. S., Ibáñez, I., & Olden, J. D. (2011). Global change, global trade, and the next wave of plant invasions. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 10(1), 20–28. <https://doi.org/10.1890/110145>
- Brainard, D. C., Haramoto, E. R., Leon, R. G., Kells, J. J., Van Wychen, L. R., Devkota, P., Jugulam, M., & Barney, J. N. (2023). A survey of weed research priorities: Key findings and future directions. *Weed Science*, 71, 330–343. <https://doi.org/10.1017/wsc.2023.24>
- Clements, D. R., & DiTommaso, A. (2012). Predicting weed invasion in Canada under climate change: Evaluating evolutionary potential. *Canadian Journal of Plant Science*, 92, 1013–1020. <https://doi.org/10.4141/CJPS2011-280>
- Di Castri, F. (1989). History of biological invasions with special emphasis on the Old World. In J. A. Drake, H. A. Mooney, F. Di Castri, R. H. Groves, M. Rejmánek, & M. Williamson (Eds.), *Biological invasions: A global perspective* (SCOPE, Vol. 37, pp. 1–26). Wiley.

- Early, R., Bradley, B. A., Dukes, J. S., et al. (2016). Global threats from invasive alien species in the twenty-first century and national response capacities. *Nature Communications*, 7, 12485. <https://doi.org/10.1038/ncomms12485>
- EPPO. (2026a). *Acroptilon repens* (CENRE). *EPPO Global Database*. <https://gd.eppo.int/taxon/CENRE>
- EPPO. (2026b). *Ambrosia artemisiifolia* (AMBEL). *EPPO Global Database*. <https://gd.eppo.int/taxon/AMBEL>
- Essl, F., Biró, K., Brandes, D., Broennimann, O., Bullock, J. M., Chapman, D. S., Chauvel, B., Dullinger, S., Fumanal, B., Guisan, A., et al. (2015). Biological Flora of the British Isles: *Ambrosia artemisiifolia*. *Journal of Ecology*, 103(4), 1069–1098. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12424>
- Gallardo, B., Bacher, S., Bradley, B., et al. (2023). InvasiBES: Understanding and managing the impacts of invasive alien species on biodiversity and ecosystem services. *NeoBiota*, 82, 1–25. <https://doi.org/10.3897/neobiota.50.35466>
- Gizachew, B., Solberg, S., Næsset, E., Gobakken, T., Bollandsås, O. M., Breidenbach, J., Zahabu, E., & Mauya, E. W. (2016). Mapping and estimating the total living biomass and carbon in low-biomass woodlands using Landsat 8 CDR data. *Carbon Balance and Management*, 11, 5. <https://doi.org/10.1186/s13021-016-0055-8>
- Ionescu, A., Mircea, C., Cujbescu, D., Vlăduț, N.-V., Persu, C., Lazăr, C., Utoiu, C., Lăcătușu, C., Blejan, R., & Savin, L. (2023a). Advanced approaches and sustainable practices for weed control. *AGRI-INMA – Sustainable Agriculture and Environmental Protection*, 2(1), 10–24.
- Ionescu, A., Cujbescu, D., Mircea, C., Vlăduț, N.-V., Persu, C., Lazăr, C., Utoiu, C., Lăcătușu, C., Blejan, R., & Atanasov, A. (2023b). Invasive weeds in agricultural ecosystems under climate change: Impact, management and restoration. *AGRI-INMA – Sustainable Agriculture and Environmental Protection*, 2(1), 25–42.
- Jacobs, J., & Denny, K. (2006). *Ecology and management of Russian knapweed* [*Acroptilon repens* (L.) DC.]. USDA Natural Resources Conservation Service, Invasive Species Technical Note No. MT-7. United States Department of Agriculture.
- Kairova, G. N., Suleimanova, G. A., Zholdasbek, G. Zh., Dulat, B., & Gritsenko, D. A. (2025). Effektivnost sovremennykh gerbitsidov protiv karantinnykh sornyakov v usloviyakh yugo-vostoka Kazakhstana [Effectiveness of modern herbicides against quarantine weeds in southeastern Kazakhstan]. *Izdenister Natigeler*, 3, 363–370. <https://doi.org/10.37884/3-2025/35> (in Russian).
- Kerimbek, N., Khusnitdinova, M., Taskuzhina, A., Kapytina, A., Pozharskiy, A., Sagitov, A., & Gritsenko, D. (2025). Mapping the distribution of viruses in wild apple populations in the southeast region of Kazakhstan. *Forests*, 16, 1119. <https://doi.org/10.3390/f16071119>
- Khusnitdinova, M. A., Kerimbek, N. M., Adilbayeva, K. S., Kapytina, A. I., Dulat, B., & Gritsenko, D. A. (2025). *Mapping of the distribution of viral phytopathogens of agricultural crops under the conditions of Kazakhstan*. Zhebe Publishing House. (In Russian)
- Khusnitdinova, M. A., Taskuzhina, A. K., Kapytina, A. I., & Nizamdinova, G. K. (2024). *Mapping of the NDVI vegetation index for identifying vegetation intensity in populations of wild Sievers apple (Malus sieversii) within the Zhongar-Alatau and Ile-Alatau State National Natural Parks*. Zhebe Publishing House. (In Russian)
- Lat Lon Tools. (2026). QGIS Plugins. <https://plugins.qgis.org/plugins/latlontools/#plugin-versions>
- Lemke, A., Kowarik, I., & von der Lippe, M. (2019). How traffic facilitates population expansion of invasive species along roads: The case of common ragweed in Germany. *Journal of Applied Ecology*, 56(2), 413–422. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13287>
- Liu, C., Wolter, C., Xian, W., & Jeschke, J. M. (2020). Species distribution models have limited spatial transferability for invasive species. *Ecology Letters*, 23, 1682–1692. <https://doi.org/10.1111/ele.13577>
- Pala, F., & Mennan, H. (2022). The status of non-chemical weed control in agriculture. In *Proceedings of the 11th International Conference on Applied Sciences (ANADOLU)* (pp. 968–976). Academy Global Publishing House.
- Parker, C. (2012). Parasitic weeds: A world challenge. *Weed Science*, 60(2), 269–276. <https://doi.org/10.1614/WS-D-11-00068.1>
- Parker, C. (2022). *Cuscuta campestris* (field dodder). *CABI Compendium*. <https://doi.org/10.1079/cabicompendium.17111>
- Peterson, A. T., Soberón, J., Pearson, R. G., Araújo, M. B., et al. (2011). Niches and geographic distributions. In *Ecological niches and geographic distributions*. Princeton University Press. <https://doi.org/10.23943/princeton/9780691136868.003.0003>
- Pyšek, P., Hulme, P. E., Simberloff, D., et al. (2020). Scientists' warning on invasive alien species. *Biological Reviews*, 95, 1511–1534. <https://doi.org/10.1111/brv.12627>
- QGIS Association. (2026). *QGIS Geographic Information System*. <https://www.qgis.org>
- Roy, H. E., Pauchard, A., Stoett, P. J., Renard Truong, T., Meyerson, L. A., Bacher, S., et al. (2024). Curbing the major and growing threats from invasive alien species is urgent and achievable. *Nature Ecology & Evolution*, 8(7), 1216–1223. <https://doi.org/10.1038/s41559-024-02412-w>
- Schaffner, U., Steinbach, S., Sun, Y., Skjøth, C. A., de Weger, L. A., Lommen, S. T. E., Augustinus, B. A., Bonini, M., Karrer, G., Šikoparija, B., et al. (2020). Biological weed control to relieve millions from Ambrosia allergies in Europe. *Nature Communications*, 11, 1745. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15586-1>
- Seebens, H., Bacher, S., Blackburn, T. M., et al. (2021). Projecting the continental accumulation of alien species through to 2050. *Global Change Biology*, 27, 970–982. <https://doi.org/10.1111/gcb.15333>
- Selvakumar, P., Rohini, A., Arun, M. R., & Manjunath, T. C. (2026). Restoration techniques to mitigate plant invasions under climate change. In S. Basharat (Ed.), *Impact of invasive grasses and plants on biodiversity* (pp. 137–164). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-8724-5.ch005>
- Shrestha, A., Anwar, M. P., Islam, A. K. M. M., Gurung, T., Dhakal, S., Tanveer, A., Javaid, M. M., Nadeem, M., & Ikram, N. A. (2021). Weed science as a new discipline and its status in some South Asian universities and colleges: Examples from Bangladesh, Bhutan, Nepal and Pakistan. *CAB Reviews*, 16, 017. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR202116017>
- Skálová, H., Guo, W.-Y., Wild, J., & Pyšek, P. (2017). *Ambrosia artemisiifolia* in the Czech Republic: History of invasion, current distribution and prediction of future spread. *Preslia*, 89, 1–16. <https://doi.org/10.23855/preslia.2017.001>
- Zimdahl, R. L., & Basinger, N. T. (2024). Weed science—The future. In R. L. Zimdahl & N. T. Basinger (Eds.), *Fundamentals of weed science* (6th ed., pp. 497–522). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15723-3.00020-X>

**Information about authors:**

Marina Khusnitdinova (corresponding author) – PhD, Senior Researcher, Laboratory of Molecular Biology, Institute of Plant Biology and Biotechnology; Research Center AgriBioTech LLP (Almaty, Kazakhstan, e-mail: germironame@gmail.com).

Alexandr Pozharskiy – PhD, Senior Researcher, Laboratory of Molecular Biology, Institute of Plant Biology and Biotechnology; Research Center AgriBioTech LLP (Almaty, Kazakhstan, e-mail: aspozharsky@gmail.com).

Aruzhan Mendybayeva – Laboratory Assistant, Laboratory of Molecular Biology, Institute of Plant Biology and Biotechnology; Research Center AgriBioTech LLP (Almaty, Kazakhstan, e-mail: aruka0302@gmail.com).

Gulnur Suleimanova – PhD, Associate Professor, Department of Fruit and Vegetable Growing, Plant Protection and Quarantine, Kazakh National Agrarian Research University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: gulnursuleimanova@kaznaru.edu.kz).

Gulshariya Kairova – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Department of Fruit and Vegetable Growing, Plant Protection and Quarantine, Kazakh National Agrarian Research University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: gulshariya.kairova@kaznaru.edu.kz).

Abay Sagitov – Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Doctor of Biological Sciences, Professor, Laboratory of Molecular Biology, Institute of Plant Biology and Biotechnology; Research Center AgriBioTech LLP (Almaty, Kazakhstan, e-mail: a\_sagitov@mail.ru).

**Авторлар туралы мәлімет:**

Марина Александровна Хуснитдинова (корреспонденттік автор) – PhD, Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институтының молекулалық биология зертханасының аға ғылыми қызметкері, AgriBioTech ғылыми-зерттеу орталығы ЖШС (Алматы, Қазақстан, e-mail: germironame@gmail.com).

Александр Сергеевич Пожарский – PhD, Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институтының молекулалық биология зертханасының аға ғылыми қызметкері, AgriBioTech ғылыми-зерттеу орталығы ЖШС (Алматы, Қазақстан, e-mail: aspozharsky@gmail.com).

Аружан Сайрановна Мендыбаева – Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институтының молекулалық биология зертханасының лаборанты, AgriBioTech ғылыми-зерттеу орталығы ЖШС (Алматы, Қазақстан, e-mail: aruka0302@gmail.com).

Гүлнүр Алмасқызы Сүлейменова – PhD, қауымдастырылған профессор, «Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті» КеАҚ Жеміс-көкөніс шаруашылығы, өсімдіктерді қорғау және карантин кафедрасы (Алматы, Қазақстан, e-mail: gulnursuleimanova@kaznaru.edu.kz).

Гүлшария Нұрсапайқызы Каирова – ауыл шаруашылығы ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, «Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті» КеАҚ Жеміс-көкөніс шаруашылығы, өсімдіктерді қорғау және карантин кафедрасы (Алматы, Қазақстан, e-mail: gulshariya.kairova@kaznaru.edu.kz).

Абай Оразұлы Сагитов – Қазақстан Республикасы Ұлттық ғылым академиясының академигі, биология ғылымдарының докторы, профессор, Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институтының молекулалық биология зертханасы; AgriBioTech ғылыми-зерттеу орталығы ЖШС (Алматы, Қазақстан, e-mail: a\_sagitov@mail.ru).

**Сведения об авторах:**

Марина Александровна Хуснитдинова (корреспондентный автор) – PhD, старший научный сотрудник лаборатории молекулярной биологии Института биологии и биотехнологии растений, ТОО «Научно-исследовательский центр AgriBioTech» (Алматы, Казахстан, e-mail: germironame@gmail.com).

Александр Сергеевич Пожарский – PhD, старший научный сотрудник лаборатории молекулярной биологии Института биологии и биотехнологии растений, ТОО «Научно-исследовательский центр AgriBioTech» (Алматы, Казахстан, e-mail: aspozharsky@gmail.com).

Аружан Сайрановна Мендыбаева – лаборант лаборатории молекулярной биологии Института биологии и биотехнологии растений, ТОО «Научно-исследовательский центр AgriBioTech» (Алматы, Казахстан, e-mail: aruka0302@gmail.com).

Гүлнүр Алмасовна Сүлейменова – PhD, доцент кафедры плодовоовощеводства, защиты и карантина растений, НАО «Казахский национальный аграрный исследовательский университет» (Алматы, Казахстан, e-mail: gulnursuleimanova@kaznaru.edu.kz).

Гүлшария Нұрсапайқызы Каирова – кандидат сельскохозяйственных наук, ассоциированный профессор кафедры плодовоовощеводства, защиты и карантина растений, НАО «Казахский национальный аграрный исследовательский университет» (Алматы, Казахстан, e-mail: gulshariya.kairova@kaznaru.edu.kz).

Абай Оразович Сагитов – академик Национальной академии наук Республики Казахстан, доктор биологических наук, профессор лаборатории молекулярной биологии Института биологии и биотехнологии растений, ТОО «Научно-исследовательский центр AgriBioTech» (Алматы, Казахстан, e-mail: a\_sagitov@mail.ru).

Received January 21, 2026

Accepted June 15, 2026

Ә.Н. Махамбетов<sup>1</sup> , Р.Т. Кенжебекова<sup>1</sup> , Б. Дулат<sup>1,2</sup> ,  
З.К. Даирбекова<sup>1</sup> , Д.А. Грищенко<sup>1,2</sup>  \*

<sup>1</sup>«Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институты», Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>«AgriBioTech» зерттеу орталығы, Алматы, Қазақстан

\*e-mail: d.kopytina@gmail.com

## ЭНТОМОПАТОГЕНДІ САҢЫРАУҚҰЛАҚ *BEAUVERIA BASSIANA*-НЫҢ *HALYOMORPHA HALYS*-ҚА ӘСЕРІ

*Halyomorpha halys* (қоңыр мәрмәр қандала) – жеміс, көкөніс және бау-бақша дақылдарына елеулі экономикалық зиян келтіретін инвазивті полифагиялық зиянкес. Түрдің жоғары көбею қабілеті, кең қоректік спектрі және әртүрлі климаттық жағдайларға бейімделуі оның көптеген елдерде тез таралуына себеп болды. *Beauveria bassiana* энтомопатогенді саңырауқұлағы жоғары патогенділігі мен экологиялық қауіпсіздігіне байланысты зиянкестермен биологиялық күресте перспективалы агент болып табылады. Зерттеудің мақсаты *H. halys*-тің әртүрлі даму сатыларына қарсы *B. bassiana* жергілікті изолятының тиімділігін бағалау болды.

Зертханалық жағдайда жұмыртқалар, нимфалар және ересек дарақтар  $1 \times 10^5$ – $1 \times 10^8$  конидия/мл концентрацияларындағы конидиялық суспензиялармен өңделді. Өлім-жітім деңгейі, инфекцияның даму динамикасы,  $LT_{50}$  және  $LT_{90}$  көрсеткіштері, сондай-ақ саңырауқұлақтың сублетальді әсерлері зерттелді. Нәтижелер конидиялар концентрациясының жоғарылауымен өлім-жітім деңгейінің де артқанын көрсетті. Ең жоғары әсер  $1 \times 10^8$  конидия/мл концентрациясында байқалды: нимфалардың өлім-жітімі 98%-ға, ересек дарақтардың өлім-жітімі 95%-ға және жұмыртқалардың өлім-жітімі 74%-ға жетті. Сонымен қатар, ең жоғары концентрацияда  $LT_{50}$  көрсеткіші 3,7 тәулікті құрады, бұл жергілікті изоляттың жоғары вируленттілігін көрсетті. Сондай-ақ саңырауқұлақ әсерінен қоректену белсенділігінің төмендеуі, қозғалу қарқындылығының әлсіреуі және репродуктивтік көрсеткіштердің нашарлауы байқалды.

Алынған нәтижелер *Beauveria bassiana* жергілікті изолятының *Halyomorpha halys*-ке қарсы жоғары энтомопатогендік белсенділік көрсететінін және оны зиянкестермен күрестің интеграцияланған биологиялық бағдарламаларында қолдану перспективалы екенін дәлелдейді.

**Түйін сөздер:** *Halyomorpha halys*, *Beauveria bassiana*, энтомопатогенді саңырауқұлақтар, биологиялық бақылау, инвазивті зиянкестер, өлім-жітім.

A.N. Makhambetov<sup>1</sup>, R.T. Kenzhebekova<sup>1</sup>, B. Dulat<sup>1,2</sup>,  
Z.K. Dairbekova<sup>1</sup>, D.A. Gritsenko<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Plant Biology and Biotechnology<sup>1</sup>, Kazakhstan, Almaty

<sup>2</sup>“AgriBioTech” Research Center, Kazakhstan, Almaty

\*e-mail: d.kopytina@gmail.com

### Effects of the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* on *Halyomorpha halys*

*Halyomorpha halys* (brown marmorated stink bug) is an invasive polyphagous pest that causes significant economic damage to fruit, vegetable, and horticultural crops. The species' high reproductive capacity, broad range of host plants and adaptation to diverse climatic conditions have led to its rapid spread across many countries. The entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* is a promising biological pest control agent due to its high pathogenicity and environmental safety. The aim of this study was to evaluate the efficacy of a native isolate of *B. bassiana* against various stages of *H. halys*.

Under laboratory conditions, eggs, nymphs, and adults were treated with conidial suspensions at concentrations of  $1 \times 10^5$ – $1 \times 10^8$  conidia/ml. Mortality rates, infection dynamics,  $LT_{50}$  and  $LT_{90}$  values, and the sublethal effects of the fungus were studied. Results showed that mortality also increased with increasing conidia concentrations. The greatest effect was observed at a concentration of  $1 \times 10^8$  conidia/ml: nymph mortality reached 98%, adult mortality 95%, and egg mortality 74%. Furthermore, at the highest concentration, the  $LT_{50}$  index was 3.7 days, indicating the high virulence of the local isolate. The fungus also reduced feeding activity, decreased movement intensity, and impaired reproductive performance. These results demonstrate that the local isolate of *Beauveria bassiana* exhibits high en-

tomopathogenic activity against *Halyomorpha halys* and holds promise for use in integrated biological pest management programs.

**Keywords:** *Halyomorpha halys*, *Beauveria bassiana*, entomopathogenic fungi, biological control, invasive pest, mortality.

А.Н. Махамбетов<sup>1</sup>, Р.Т. Кенжебекова<sup>1</sup>, Б. Дулат<sup>1,2</sup>,  
З.К. Даирбекова<sup>1</sup>, Д.А. Гриценко<sup>1,2</sup> \*

<sup>1</sup> «Институт биологии и биотехнологии растений», Алматы, Казахстан

<sup>2</sup> Научно-исследовательский центр «AgriBioTech», Алматы, Казахстан

\*e-mail: d.kopytina@gmail.com

### Влияние энтомопатогенного гриба *Beauveria bassiana* на *Halyomorpha halys*

*Halyomorpha halys* (коричневый мраморный клоп) – инвазивный полифагный вредитель, наносящий значительный экономический ущерб плодовым, овощным и садовым культурам. Высокая репродуктивная способность вида, широкий спектр питательных веществ и адаптация к различным климатическим условиям привели к его быстрому распространению во многих странах. Энтомопатогенный гриб *Beauveria bassiana* является перспективным агентом биологического контроля вредителей благодаря своей высокой патогенности и экологической безопасности. Целью исследования была оценка эффективности местного изолята *B. bassiana* против различных стадий развития *H. halys*.

В лабораторных условиях яйца, нимфы и взрослые особи обрабатывали суспензиями конидий в концентрациях  $1 \times 10^5$ – $1 \times 10^8$  конидий/мл. Изучали уровень смертности, динамику развития инфекции, показатели  $LT_{50}$  и  $LT_{90}$ , а также сублетальные эффекты гриба. Результаты показали, что уровень смертности также увеличивался с повышением концентрации конидий. Наибольший эффект наблюдался при концентрации  $1 \times 10^8$  конидий/мл: смертность нимф достигла 98%, смертность взрослых особей – 95%, а смертность яиц – 74%. Кроме того, при самой высокой концентрации индекс  $LT_{50}$  составил 3,7 дня, что указывает на высокую вирулентность местного изолята. Также под воздействием грибка наблюдалось снижение активности питания, ослабление интенсивности передвижения и ухудшение репродуктивных показателей. Полученные результаты доказывают, что местный изолят *Beauveria bassiana* обладает высокой энтомопатогенной активностью против *Halyomorpha halys* и перспективен для использования в программах интегрированной биологической борьбы с вредителями.

**Ключевые слова:** *Halyomorpha halys*, *Beauveria bassiana*, энтомопатогенные грибы, биологический контроль, инвазивный вредитель, смертность.

### Кіріспе

Қоңыр мәрмәр қандаласы – *Halyomorpha halys* (Stål, 1855) (Hemiptera: Pentatomidae) – әлемдегі ең қауіпті инвазиялық ауыл шаруашылығы зиянкестерінің бірі болып саналады. Шығыс Азиядан, атап айтқанда Қытай, Жапония, Корея және Тайвань аумақтарынан таралған бұл түр соңғы онжылдықтарда Солтүстік Америкаға, Еуропаға және Батыс пен Орталық Азияның бірқатар өңірлеріне жылдам таралды (Leskey et al., 2022; Beus et al., 2024; Luo et al., 2025).

*H. halys* түрінің инвазиялық табыстылығы оның жоғары экологиялық бейімділігімен, күшті таралу қабілетімен, қоректік өсімдіктерінің кең ауқымымен және жоғары көбею әлеуетімен түсіндіріледі. Бұл зиянкес полифаг болып табылады және 300-ден астам өсімдік түрімен қоректенеді, олардың қатарына экономикалық

маңызы зор жеміс-жидек, көкөніс, сәндік және егістік дақылдар кіреді (Beus et al., 2024).

*H. halys*-тің келтіретін елеулі зияны алма, алмұрт, шабдалы, фундук, қызанақ, соя, жүгері және жүзім дақылдарын өсіру жүйелерінде тіркелген. Қандаланың қоректенуі нәтижесінде өсімдік ұлпаларының некрозы, жемістердің деформациялануы, түсінің өзгеруі, мерзімінен бұрын түсуі байқалады, сондай-ақ өнімнің сапасы мен нарықтық құндылығы айтарлықтай төмендейді (Lee et al., 2013; Tassini & Mifsud, 2019; Keszthelyi et al., 2022; Fluch et al., 2024).

*H. halys* инвазиясымен байланысты экономикалық шығындар әлемнің көптеген елдерінің ауыл шаруашылығы жүйелері үшін маңызды мәселеге айналды. Бұл полифаг зиянкес Солтүстік Америка мен Еуропаға енгеннен кейін жеміс бақтарына, көкөніс дақылдарына және жаңғақ өндірісіне айтарлықтай зиян келтірді. АҚШ-та *H. halys*-тің жаппай таралуы әсіресе Орта Атлант

аймағында тіркеліп, алма мен шабдалы өндірісіне елеулі қауіп төндірді (Leskey et al., 2022). Тек 2010 жылдың өзінде алма бақтарындағы шығын көлемі 37 миллион АҚШ долларынан асып түсті, ал сүйекті жеміс өсірушілердің кейбірі зиянкес келтірген қарқынды зақымданулар салдарынан өнімнің 80–90%-ын жоғалтқанын хабарлады. *H. halys*-тің қоректенуі нәтижесінде жеміс бетінде ойықтар мен тесіктер пайда болады, некроздық зақымданулар дамиды, жемістер деформацияланып, ішкі ұлпалары бүлінеді және мерзімінен бұрын түсіп қалады. Бұл өз кезегінде өнім көлемі мен оның нарықтық сапасының айтарлықтай төмендеуіне әкеледі (Gokturk, 2024; Herrick, 2011; Keszthelyi et al., 2022; Leskey et al., 2022). *H. halys*-тің Еуропа мен Кавказ өңірлерінде жылдам таралуы оның экономикалық маңызын одан әрі арттырды. Қазіргі уақытта зиянкес Италия, Швейцария, Германия, Грузия, Түркия және басқа да бірқатар Еуропа елдерінде тұрақты популяциялар қалыптастырып, жеміс-жидек және жаңғақ өндіру жүйелеріне елеулі қауіп төндіруде. Әсіресе фундук плантацияларында келтірілген зиян өте жоғары деңгейде тіркелген, себебі қандаланың қоректенуі жаңғақ дәнінің сапасын төмендетіп, оның нарықтық құнын айтарлықтай азайтады. Әлемдегі жетекші фундук өндіруші елдердің бірі болып саналатын Грузияда бұл зиянкес 2016–2018 жылдары жаппай таралып, елдегі фундук өнімінің шамамен үштен бір бөлігінің жоғалуына себеп болған. Грузиядағы *H. halys* инвазиясынан туындайтын жыл сайынғы экономикалық шығын көлемі 60 миллион еуроға дейін жетеді деп бағаланады (Bosco & Moraglio, 2018; Gokturk, 2024; Hays et al., 2015; Joseph et al., 2014; Rice et al., 2014).

Осындай экономикалық мәселелер әлемдегі ең ірі фундук өндіруші ел болып саналатын Түркияда да байқалуда. *H. halys* Шығыс Қара теңіз аймағына енгеннен кейін зиянкеспен қатты зақымданған аумақтарда фундук өнімділігі мен сапасының айтарлықтай төмендеуі тіркелді. Өңірлік бағалаулар бойынша, бұл зиянкес фундук өндірісінде миллиондаған доллар көлемінде шығын келтірген, ал оның популяциясы одан әрі өсе беретін болса, болашақтағы экономикалық шығындар 1 миллиард АҚШ долларынан асып кетуі мүмкін деп болжануда (Gokturk, 2024). Фундуктан басқа, *H. halys* зақымданған өңірлерде алма, алмұрт, шабдалы, жүзім, қызанақ, жүгері және соя дақылдарының да маңызды зиянкесіне айналды (Leskey et al., 2022; Keszthelyi et al., 2022; Rice et al., 2014).

Қазіргі уақытта *H. halys* популяциясын бақылаудың негізгі тәсілі ретінде химиялық инсектицидтер қолданылады. Алайда пестицидтерді қарқынды пайдалану бірқатар маңызды шектеулерге ие. Олардың қатарына зиянкестердің инсектицидтерге төзімділігінің қалыптасуы, пайдалы организмдерге кері әсері, қоршаған ортаның ластануы және адам денсаулығына төнетін қауіптер жатады. Сонымен қатар, химиялық препараттарды бірнеше рет қолдану зиянкестермен күрестің интеграцияланған жүйелерінің тиімділігін төмендетіп, агроэкожүйелердегі биоалуантүрліліктің азаюына әкелуі мүмкін (Chandler et al., 2011; Keszthelyi et al., 2022; Leskey et al., 2022; Rice et al., 2014; Ribeiro et al., 2021; Zhou et al., 2024; Li et al., 2025).

Осы шектеулер *H. halys* зиянкесіне қарсы күрестің экологиялық қауіпсіз әрі тұрақты балама әдістерін әзірлеудің өзектілігін айқындайды. *H. halys*-тің экономикалық зиянының артуы, оның географиялық таралу аймағының жылдам кеңеюі және қоректік өсімдіктерінің кең спектрі бұл зиянкесті басқарудың тиімді әрі экологиялық тұрғыдан тұрақты стратегияларын әзірлеудің аса қажеттілігін көрсетеді.

Биологиялық күрес әдістерінің ішінде энтомопатогенді саңырауқұлақтар жәндіктер зиянкестерінің кең ауқымын зақымдап, жою қабілетіне байланысты ерекше қызығушылық тудырады (Ahmad et al., 2012; Wang et al., 2016; Litwin et al., 2020). *Beauveria*, *Metarhizium*, *Isaria* және *Cordyceps* туыстарына жататын түрлер энтомопатогенді саңырауқұлақтардың ең жан-жақты зерттелген биологиялық агенттері болып табылады (Wang et al., 2016). Бұл энтомопатогенді саңырауқұлақтар жәндіктердің ағзасына ас қорыту жолы арқылы емес, олардың кутикуласын тікелей тесіп өту арқылы ене алады. Сондықтан олар шаншып-сорғыш және сорғыш зиянкестерге қарсы күресте аса перспективалы құрал ретінде қарастырылады (Litwin et al., 2020).

Жоғары инсектицидтік белсенділігі, иелерінің кең ауқымы және қоршаған орта үшін қауіпсіздігі арқасында энтомопатогенді саңырауқұлақтар өсімдіктерді интеграцияланған қорғау жүйелерінің маңызды құрамдас бөлігі және зиянкестермен күрестің экологиялық тұрақты технологияларының тиімді құралы ретінде кеңінен мойындалған (Chandler et al., 2011; Sharma et al., 2023).

Осы саңырауқұлақтардың ішінде *Beauveria bassiana* жәндіктер зиянкестеріне қарсы қолданылатын ең перспективалы микробтық агенттердің бірі болып саналады (Litwin et al., 2020;

Ortiz-Urquiza & Keyhani, 2013). *B. bassiana* инфекциялық үдерісті конидиялардың жәндіктің кутикуласына жабысуынан бастайды. Одан кейін конидиялар өніп, кутикула арқылы еніп, гемцельді колонизациялайды. Саңырауқұлақтың токсиндер бөлуі мен мицелийінің дамуы нәтижесінде иесінің өліміне әкеледі (Altinok et al., 2019; Wang et al., 2021; Liu et al., 2023). Жәндік өлгеннен кейін оның денесінің бетінде саңырауқұлақтың спора түзуі жүреді, бұл патогеннің әрі қарай таралуына мүмкіндік береді (Altinok et al., 2019). Кең иелер спектрі, экологиялық қауіпсіздігі және зиянкестермен күрестің интеграцияланған жүйелерімен үйлесімділігі арқасында *B. bassiana* коммерциялық микоинсектицидтердің және биологиялық күрес бағдарламаларының құрамында кеңінен қолданылады (Chandler et al., 2011).

Бірқатар зерттеулер энтомопатогенді саңырауқұлақтардың *H. halys*-ке қарсы зертханалық және далалық жағдайларда жоғары патогендік белсенділік көрсететінін дәлелдеді. Зерттеу нәтижелері бұл зиянкестің имаголары мен нимфаларының саңырауқұлақ инфекцияларына жоғары сезімталдық танытатынын көрсетті (Gouli et al., 2012; Tozlu et al., 2019). Кейінгі зерттеулерде конидиялар концентрациясының артуы және әсер ету уақытының ұзаруы өлім-жітім деңгейінің жоғарылауына ықпал ететіні анықталды (Parker et al., 2015).

Сонымен қатар, *B. bassiana*-ның әртүрлі изоляттары *H. halys*-ке қатысты патогенділігі бойынша ерекшеленетіндігі анықталған. Бұл биологиялық күрестің тиімділігін арттыру үшін жоғары вирулентті изоляттарды іріктеудің маңыздылығын көрсетеді. Кейбір *B. bassiana* изоляттары конидиялардың жоғары концентрациясында және жеткілікті әсер ету уақытында *H. halys* нимфалары мен ересек дарақтарының 90–100%-ға дейін өліміне себеп болған (Tozlu et al., 2019).

*Beauveria* негізіндегі препараттармен жұмыртқаларды өңдеу олардың шығу көрсеткішін төмендетіп, жаңадан шыққан нимфалардың өлім-жітімін арттыратыны көрсетілген (Tozlu et al., 2019). Зерттеулер  $10^6$ – $10^8$  конидия/мл концентрациясындағы конидиялық суспензиялардың әсерінен екінші жастағы нимфалар мен ересек дарақтар арасында жоғары өлім деңгейі байқалғанын көрсетті. Сонымен қатар, саңырауқұлақтардың вируленттілігін бағалау және әртүрлі изоляттардың тиімділігін салыстыру үшін  $LT_{50}$  (дарақтардың 50%-ының өліміне дейінгі уақыт) және  $LT_{90}$  (дарақтардың 90%-ының өліміне дейінгі уақыт)

көрсеткіштері кеңінен қолданылады (Özdemir et al., 2022; Parker et al., 2015).

*H. halys*-ке қарсы саңырауқұлақтарға негізделген биологиялық күрес стратегияларын дамыту бағытында айтарлықтай жетістіктерге қол жеткізілгеніне қарамастан, бірқатар маңызды мәселелер әлі де жеткілікті деңгейде зерттелмеген. Атап айтқанда, *H. halys*-тің энтомопатогенді саңырауқұлақтарға сезімталдығы жөнінде мәліметтер бар болғанымен, жұмыртқа, нимфа және ересек дарақ сатыларының салыстырмалы сезімталдығы, сондай-ақ олардың инфекцияға жауап беру ерекшеліктері туралы деректер әлі де шектеулі.

Сонымен қатар, *B. bassiana*-ның әртүрлі изоляттарының инфекциялық үдерісінің динамикасы, саңырауқұлақтың иесі ағзасын колонизациялауының микроскопиялық ерекшеліктері және конидия концентрациясына тәуелді өлім-жітім көрсеткіштері туралы ақпарат шектеулі болып отыр. Бұл ғылыми олқылықтар энтомопатогенді саңырауқұлақтарды қолдану технологияларын жетілдіруге және олардың тиімділігін барынша арттыруға кедергі келтіреді. Сондықтан *H. halys*-тің әртүрлі даму сатыларына қатысты *B. bassiana*-ның әсер ету ерекшеліктерін жан-жақты зерттеу биологиялық күрес құралдарын оңтайландыру үшін маңызды ғылыми және практикалық мәнге ие.

Осы зерттеудің ғылыми жаңалығы Алматы облысының жеміс агроценоздарынан бөлініп алынған *Beauveria bassiana*-ның жергілікті изолятының *Halyomorpha halys*-тің әртүрлі даму сатыларына (жұмыртқа, нимфа және имаго) әсерін кешенді бағалаумен байланысты. Зерттеу барысында алғаш рет жергілікті изоляттың концентрацияға тәуелді летальді әсері,  $LT_{50}$  және  $LT_{90}$  көрсеткіштері, сондай-ақ зиянкестің қоректену белсенділігіне, қозғалу қабілетіне және репродуктивтік әлеуетіне әсер ететін сублетальді әсерлері анықталды. Алынған нәтижелер Қазақстан жағдайында *H. halys*-ке қарсы биологиялық күрес жүйелерін әзірлеу үшін ғылыми негіз қалыптастырады.

## Зерттеу материалдары мен әдістері

*Жәндіктерді жинау және зертханалық жағдайда ұстау*

*Halyomorpha halys* түрінің ересек дарақтары мен жетілмеген даму сатылары вегетациялық кезең барысында жеміс бақтары мен ауыл шаруашылығы алқаптарынан жиналды. Жәндіктер

алма, қызанақ және бұршақ тұқымдас өсімдіктер сияқты қоректік өсімдіктерден бұрын сипатталған әдістемелерге сәйкес қолмен жиналды (Leskey et al., 2022; Murvanidze et al., 2018; Rice et al., 2014). Зертханалық тәжірибелерге тек ауру немесе зақымдану белгілері байқалмайтын, белсенді әрі сау дарактар іріктеліп алынды.

Жиналған жәндіктер зертханаға жеткізіліп, температурасы 23–25°C, салыстырмалы ылғалдылығы 65–80% және жарық/қараңғылық режимі 16:8 сағат болатын бақыланатын жағдайларда желдетілетін пластик контейнерлерде ұсталды. Қорек ретінде жаңа жасыл үрме бұршақ (*Phaseolus vulgaris*), сәбіз (*Daucus carota*) және күнбағыс тұқымдары (*Helianthus annuus*) пайдаланылды. Қоректің сапасын және оңтайлы ылғалдылық жағдайын сақтау мақсатында азық әр 2–3 күн сайын жаңартылып отырды (сурет 1).

Зерттеулерде *H. halys*-тің әртүрлі даму сатыларының сезімталдығын салыстыру үшін жү-

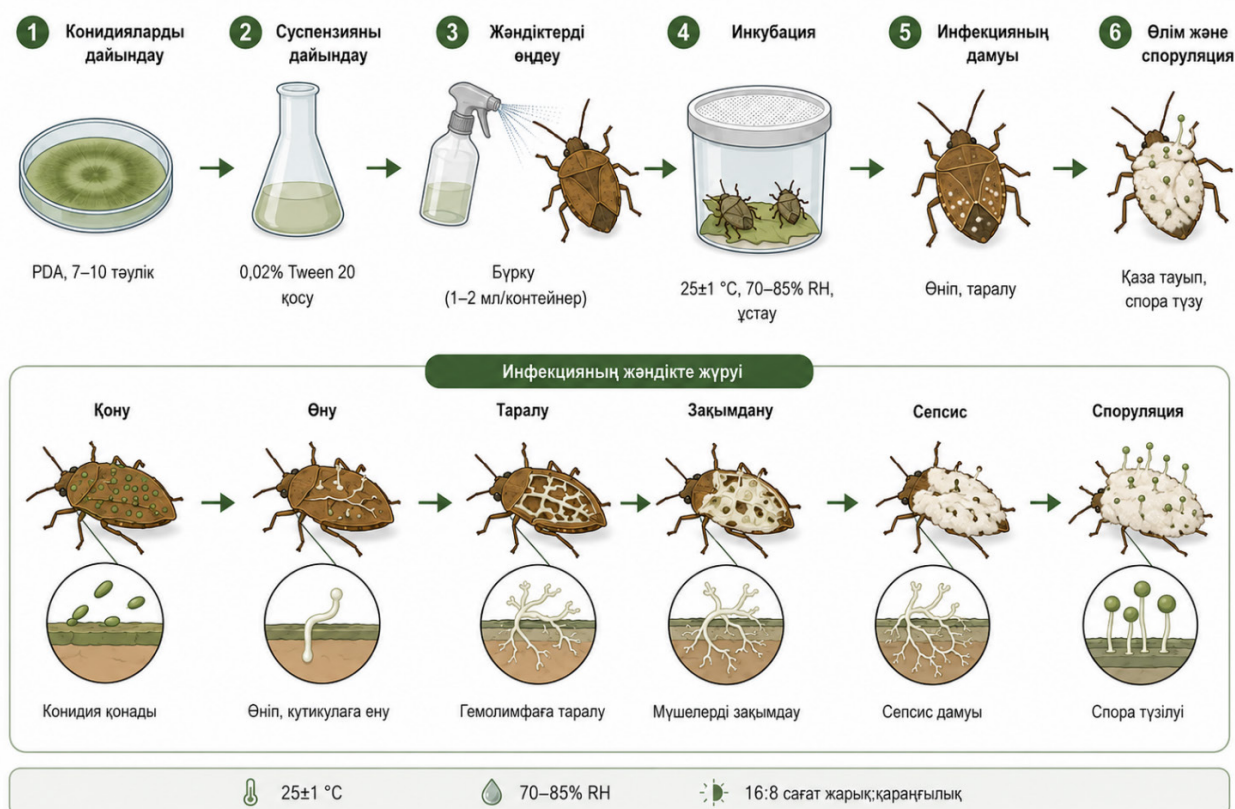
мыртқа салымдары, екінші жастағы нимфалар және ересек дарактар қолданылды.

*Саңырауқұлақ изоляттары және өсіру жағдайлары*

Зерттеуде биологиялық күрес агенті ретінде энтомопатогенді *Beauveria bassiana* саңырауқұлағы қолданылды. Эксперименттер үшін Алматы облысының жеміс агроценоздарынан жиналған топырақ үлгілерінен бөлініп алынған *Beauveria bassiana*-ның жергілікті изоляты пайдаланылды. Изолят қоректік ортаға бірнеше рет қайта егу арқылы тазартылып, Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институтының молекулалық биология зертханасының коллекциясында сақталды. Саңырауқұлақ изоляттары картоп-декстроза агары (Potato Dextrose Agar, PDA) қоректік ортасында өсіріліп, мол мөлшерде конидиялар түзілгенге дейін  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  температурада 7–14 тәулік бойы инкубацияланды (1-сурет).

### 1-сурет

*Beauveria bassiana* саңырауқұлағымен *Halyomorpha halys* жұқтыру және инфекциялық процестің даму схемасы



Конидиялар саңырауқұлақ колонияларының бетін 0,02% Tween 20 қосылған стерильді дистилденген сумен шаю арқылы жиналды. Алынған суспензия мицелий фрагменттерін жою мақсатында стерильді дәке арқылы сүзілді. Конидиялық суспензиялар қажетті концентрацияларға стерильді дистилденген сумен бірізді сұйылту әдісі арқылы дайындалды. Конидиялардың тіршілікке қабілеттілігі мен концентрациясы Петри табақшаларындағы PDA ортасына әртүрлі сұйылтуларды себу арқылы колония түзуші бірліктерді (Colony Forming Units, CFU) есептеу әдісімен қосымша тексерілді. Биосынақтар жүргізу үшін конидиялардың төрт концентрациясы дайындалды:  $1 \times 10^5$  конидия/мл,  $1 \times 10^6$  конидия/мл,  $1 \times 10^7$  конидия/мл және  $1 \times 10^8$  конидия/мл. Бақылау нұсқасы ретінде құрамында 0,02% Tween 20 бар стерильді дистилденген су пайдаланылды.

Тәжірибе басталар алдында конидиялардың өну қабілеті мен өміршеңдігі бағаланды. Ол үшін  $1 \times 10^4$  конидия/мл концентрациялы суспензия PDA қоректік ортасы құйылған Петри табақшаларына егілді және 25°C температурада 24 сағат бойы инкубацияланды. Өну пайызы микроскопиялық әдіспен анықталды. Егер өскін түтігінің ұзындығы конидия ұзындығының жартысынан асса, мұндай конидиялар өнген деп есептелді.

#### Тәжірибе сызбасы

*B. bassiana* саңырауқұлағының патогендік белсенділігі зертханалық жағдайда *H. halys*-тің жұмыртқаларына, екінші жастағы нимфаларына және ересек дарақтарына қатысты бағаланды. Әрбір даму сатысы қолданылған саңырауқұлақ конидияларының концентрациясына сәйкес тәжірибелік топтарға бөлінді.

Нимфалар мен ересек дарақтарға арналған биосынақтарда әр топқа бес жәндіктен орналастырылды. Жәндіктер ылғалдандырылған сүзгі қағазы мен жаңа қорек салынған стерильді пластик контейнерлерде ұсталды. Әрбір тәжірибелік нұсқа бес қайталымда жүргізілді, ал бүкіл тәжірибе тәуелсіз түрде үш рет қайталанды.

Құрамында 10–30 жұмыртқасы бар жұмыртқа салымдары жеке-жеке ылғал сүзгі қағазымен қапталған Петри табақшаларына орналастырылды. Жұмыртқаларды өңдеу рәсімі *H. halys* жұмыртқаларына қарсы энтомопатогенді саңырауқұлақтарды қолдану бойынша бұрын сипатталған әдістемелерге сәйкес жүргізілді.

#### Саңырауқұлақ суспензияларын қолдану

Саңырауқұлақтың конидиялық суспензиялары жәндіктердің дене бетіне конидиялардың

біркелкі түсуін қамтамасыз ету мақсатында қол біріккіштің көмегімен қолданылды. Әрбір тәжірибелік нұсқаға шамамен 1–2 мл конидиялық суспензия шашылды.

Инокуляциядан кейін өңделген жәндіктер температурасы  $25 \pm 1$  °C, салыстырмалы ылғалдылығы 70–85% және жарық/қараңғылық режимі 16:8 сағат болатын бақыланатын жағдайларда ұсталды. Бұл жағдайлар саңырауқұлақтың дамуы мен инфекциялық процестің жүруіне қолайлы орта қалыптастыру үшін сақталды.

#### Өлім-жітімді бағалау және микозды растау

*H. halys* дарақтарының өлім-жітімі саңырауқұлақ суспензиясы қолданылғаннан кейін қатарынан 11–12 күн бойы күн сайын тіркелді. Екінші реттік инфекциялардың дамуын болдырмау мақсатында өлген жәндіктер дереу тәжірибеден алынып отырды.

Саңырауқұлақ инфекциясын растау үшін өлген жәндіктердің денелері алдымен кезекпен 70% этил спиртіне, стерильді дистилденген суға және 1% натрий гипохлориті ерітіндісіне батырылып, кейіннен стерильді сумен шайылды. Беткі стерилизациядан өткен үлгілер ылғалдандырылған стерильді Петри табақшаларына орналастырылып, саңырауқұлақтың өсуі мен спора түзуін қамтамасыз ету үшін 5 тәулік бойы инкубацияланды.

Жәндік денесінің бетінде микоз белгілерінің дамуы визуалды түрде бағаланып, стереомикроскоп көмегімен фотосуретке түсірілді. *B. bassiana* инфекциясының нәтижесінде пайда болған саңырауқұлақтың колонизациясы мен спора түзуі өлімнің осы патоген әсерінен болғанын растаудың негізгі көрсеткіштері ретінде пайдаланылды.

#### LT<sub>50</sub> және LT<sub>90</sub> көрсеткіштерін анықтау

*H. halys*-тің әртүрлі даму сатыларына қатысты *B. bassiana* вируленттілігін бағалау үшін медианалық летальды уақыт (LT<sub>50</sub>) және LT<sub>90</sub> көрсеткіштері есептелді. Өлім-жітім деректерін талдау логарифмдік-пробиттік модельге негізделген пробит-талдау әдісі арқылы жүргізілді. LT<sub>50</sub> және LT<sub>90</sub> мәндері бұрын жарияланған әдістемелерге сәйкес есептелді (Gouli et al., 2012; Tozlu et al., 2019; Özdemir et al., 2022).

Қолданылған конидиялардың орташа өміршеңдігі  $94,3 \pm 2,1\%$  құрады, бұл биосынақтарда қолданылатын энтомопатогенді саңырауқұлақтарға қойылатын талаптарға сәйкес келді.

#### Қоректену белсенділігін талдау

Қоректену белсенділігін бағалау үшін әр тәжірибелік нұсқада тірі қалған 10 ересек дарақ

пайдаланылды. Тәжірибе үш тәуелсіз қайталымда жүргізілді. Жәндіктер жеке пластикалық контейнерлерге орналастырылып, оларға алдын ала өлшенген және фотосуретке түсірілген жаңа өсімдік материалы берілді. 24 сағат өткеннен кейін қорек қалдықтары қайта өлшенді және зақымданған жапырақ немесе жеміс бетінің ауданы ImageJ бағдарламасының көмегімен анықталды. Қоректену қарқындылығы тұтынылған қорек массасының азаюы ( $\rho$ ) және зақымданған бет ауданының өзгеруі ( $\text{cm}^2$ ) бойынша бағаланды. Барлық көрсеткіштер өңделмеген бақылау тобымен салыстырылды.

#### *Репродуктивтік көрсеткіштерді талдау*

Репродуктивтік белсенділікті бағалау үшін әр тәжірибелік топта 10 аналық және 10 аталық *Halyomorpha halys* дарағы пайдаланылды. Тәжірибе үш тәуелсіз қайталымда жүргізілді. Жұптар жеке контейнерлерде ұсталып, 14 тәулік бойы бақылауға алынды. Бір аналыққа шаққандағы жұмыртқа саны, жұмыртқа салу жиілігі және жұмыртқалардың шығу пайызы есептелді. Жұмыртқа салымдары күн сайын жиналып, дернәсілдердің шығу көрсеткіші анықталды. Алынған нәтижелер бақылау тобымен салыстырылды.

#### *Сублетальді әсерлерді бағалау*

*B. bassiana* инфекциясының сублетальді әсерлері жәндіктердің қозғалу белсенділігіне, қоректену мінез-құлқына және репродуктивтік көрсеткіштеріне қарай бағаланды. Қозғалу белсенділігі әр дарақты 10 минут бойы бақылау арқылы анықталды. Осы уақыт ішінде жүріп өткен қашықтық, қозғалыс ұзақтығы және қозғалыс актілерінің саны тіркелді. Мінез-құлықтық өзгерістер визуалды бақылау әдісімен бағаланып, енжарлық, қозғалыс үйлесімділігінің бұзылуы, қоректенуден бас тарту және сыртқы тітіркендіргіштерге реакцияның төмендеуі сияқты белгілер есепке алынды. Әр тәжірибелік топта 10 тірі қалған дарақ зерттелді. Тәжірибе үш тәуелсіз қайталымда жүргізілді. Барлық бақылаулар өңдеуден кейінгі 3, 5 және 7 тәуліктерде жүргізілді.

#### *Статистикалық талдау*

Статистикалық өңдеу Python бағдарламалау ортасының 3.11-нұсқасын пайдалану арқылы жүргізілді. Егер бақылау тобындағы өлім-жітім деңгейі 5%-дан асқан жағдайда, тәжірибелік топтардың өлім көрсеткіштері Abbott формуласы бойынша түзетілді (Abbott, 1925). Деректерді талдауға дейін олардың қалыпты таралу заңдылығына сәйкестігі тексерілді. Тәжірибелік

топтар арасындағы айырмашылықтарды анықтау үшін бір факторлы дисперсиялық талдау (ANOVA) қолданылып, кейіннен айырмашылықтардың нақтылығын бағалау мақсатында Tukey HSD пост-хок тесті жүргізілді. Статистикалық маңыздылық деңгейі  $p < 0,05$  деп қабылданды (Tukey, 1949).

Тіршілік ету ұзақтығын талдау және  $LT_{50}$  мен  $LT_{90}$  көрсеткіштерін есептеу Python бағдарламасының *lifelines* және *statsmodels* кітапханаларының көмегімен жүзеге асырылды (Davidson-Pilon, 2024; Perktold et al., 2024).

#### **Зерттеу нәтижелері және оларды талдау**

*Beauveria bassiana* саңырауқұлағының *Halyomorpha halys*-ке қарсы патогендік белсенділігі жәндіктің даму сатысына және конидиялар концентрациясына байланысты өзгерді. Барлық тәжірибелік топтарда саңырауқұлақ концентрациясының жоғарылауымен бірге өлім-жітім деңгейі айтарлықтай артты.

*H. halys* өлім-жітімі саңырауқұлақпен өңдеуден кейін

Барлық тәжірибелік топтарда саңырауқұлақ конидияларының концентрациясы  $10^5$ -тен  $10^8$  конидия/мл-ге дейін артқан сайын өлім-жітім деңгейі біртіндеп жоғарылады. Ең жоғары өлім көрсеткіштері  $10^8$  конидия/мл концентрациясында тіркелді, бұл қолданылған *B. bassiana* изолятының жоғары вируленттілігін көрсетті.

Зерттелген даму сатыларының ішінде нимфалар саңырауқұлақ инфекциясына ең жоғары сезімталдық танытты. Нимфалардың өлім-жітімі  $10^5$  конидия/мл концентрациясында 43%-дан  $10^8$  конидия/мл концентрациясында 98%-ға дейін артты. Өлім-жітімнің ерекше күрт жоғарылауы  $10^6$ -дан  $10^7$  конидия/мл концентрациясына ауысқанда байқалды, мұнда өлім көрсеткіші 67%-дан 88%-ға дейін өсті. Бұл деректер Parker және әріптестерінің нәтижелерімен сәйкес келеді, олар *B. bassiana* негізіндегі препараттармен өңделген *H. halys*-тің екінші жастағы нимфаларының жоғары сезімталдығын көрсеткен, мұнда жоғары конидия концентрацияларында өлім-жітім деңгейі 95–100%-ға жеткен (Parker et al., 2015). Нимфалық сатылардың жоғары сезімталдығы олардың кутикуласының жұқалығымен, жамылғысының жеткіліксіз склеротизациясымен және ересек жәндіктермен салыстырғанда иммундық қорғаныс жүйесінің әлсіз дамуымен түсіндірілуі мүмкін (Ortiz-Urquiza & Keyhani, 2013).

Ересек *H. halys* дарақтары да энтомопатогенді саңырауқұлақтың әсеріне жоғары сезімталдық көрсетті. Ересек дарақтардың өлім-жітімі  $10^5$  конидия/мл концентрациясында 30%-дан  $10^8$  конидия/мл концентрациясында 95%-ға дейін артты. Айта кету керек,  $10^7$  конидия/мл концентрациясында ересек дарақтардың өлім-жітімі 81%-ға жетті, бұл *B. bassiana*-ның максималды деңгейден төмен концентрацияларда да айқын инсектицидтік әсер көрсететінін дәлелдейді. Ұқсас нәтижелер Gouli және әріптестерінің зерттеуінде алынған, онда әртүрлі энтомопатогенді саңырауқұлақтардың ересек *H. halys* дарақтарына қарсы жоғары вируленттілігі көрсетілген (Gouli et al., 2012).

Конидиялар концентрациясының артуымен ересек дарақтардың өлім-жітім деңгейінің жоғарылауы жәндіктің кутикула бетіне жабысатын конидиялар санының көбеюімен байланысты болуы мүмкін. Бұл өз кезегінде конидиялардың сәтті өну, саңырауқұлақтың жәндік ағзасына ену және кейіннен жүйелі инфекцияның дамуы ықтималдығын арттырады.

*H. halys* жұмыртқалары *B. bassiana*-ның әсеріне нимфалар мен ересек дарақтарға қарағанда төмен сезімталдық көрсетті. Жұмыртқалардың өлім-жітім көрсеткіштері сәйкесінше  $10^5$ ,  $10^6$ ,  $10^7$  және  $10^8$  конидия/мл концентрацияларында 18%, 35%, 58% және 74% болды. Әсері салыстырмалы түрде төмен болғанымен, конидиялар концентрациясының артуымен бірге өлім-жітім деңгейінің тұрақты жоғарылауы байқалды, бұл саңырауқұлақ әсерінің концентрацияға тәуелді сипатын қосымша растады. Жұмыртқалардың төмен сезімталдығы конидиялардың жұмыртқаға жабысуын, өнуін және енуін шектейтін хо-рионның қорғаныш қасиеттерімен байланысты

болуы мүмкін (Tozlu et al., 2019). Сонымен қатар, жұмыртқа беті саңырауқұлақ инфекциясының дамуы үшін қолайлығы төмен ылғалдылық жағдайларын қалыптастыруы мүмкін.

Жалпы алғанда, конидиялар концентрациясының жоғарылауымен өлім-жітім деңгейінің айтарлықтай артуы саңырауқұлақ тиімділігінің инфекциялық жүктемеге күшті тәуелді екенін көрсетеді. Нимфалар мен ересек дарақтардың ерекше жоғары сезімталдығы *B. bassiana*-ның өсімдіктерді интеграцияланған қорғау жүйелерінде зиянкестің белсенді даму сатыларына қарсы қолдануға перспективалы агент бола алатынын көрсетеді.

Алынған нәтижелер әдебиетте сипатталған *Beauveria bassiana* изоляттарының вируленттілігімен салыстырғанда жоғары деңгейде екенін көрсетті. Gouli және әріптестерінің зерттеуінде *Halyomorpha halys* имаголарының өлім-жітімі жоғары вирулентті штамдарды қолданған жағдайда шамамен 80–90% аралығында болғаны хабарланған (Gouli et al., 2012). Біздің зерттеуде жергілікті изолят  $1 \times 10^8$  конидия/мл концентрациясында нимфалардың 98%-ға және ересек дарақтардың 95%-ға дейін өлімін туғызды. Сонымен қатар, Özdemir және әріптестері (Özdemir et al., 2022) *Beauveria bassiana* изоляттары үшін  $LT_{50}$  көрсеткіштерінің 4–7 тәулік аралығында өзгертінін көрсеткен. Біздің зерттеуде ең жоғары концентрацияда  $LT_{50}$  мәні 3,7 тәулікті құрады, бұл инфекцияның жылдамырақ дамитынын және қолданылған жергілікті изолятың жоғары патогенділігін көрсетеді. Анықталған айырмашылықтар саңырауқұлақ изоляттарының генетикалық ерекшеліктерімен, конидиялардың өміршеңдігімен және тәжірибе жүргізу жағдайларымен байланысты болуы мүмкін.

#### 1-кесте

*Beauveria bassiana* саңырауқұлағының әртүрлі концентрацияларымен өңделгеннен кейінгі *Halyomorpha halys* даму сатыларының өлім-жітімі

Конидиялар концентрациясы (конидия/мл)	Жұмыртқалардың өлім-жітімі (%)	Нимфалардың өлім-жітімі (%)	Ересек дарақтардың өлім-жітімі (%)
$10^5$	18±1,2	43±1,5	30±2,1
$10^6$	35±1,9	67±1,7	53±1,2
$10^7$	58±2,5	88±2,2	81±1,7
$10^8$	74±3,1	98±2,7	95±1,9

Өлім-жітім көрсеткіштеріне жүргізілген бір факторлы дисперсиялық талдау конидиялар концентрациясының *H. halys* өлім-жітіміне елеулі әсер ететінін көрсетті (ANOVA:  $F_{3,12} = 42,57$ ,  $p < 0.001$ ). Tukey HSD тестінің нәтижелері бойынша  $10^7$  және  $10^8$  конидия/мл концентрациялары төмен концентрациялардан статистикалық тұрғыдан айтарлықтай ерекшеленді ( $p < 0.05$ ).

*Beauveria bassiana*-ның сублетальді әсерлері

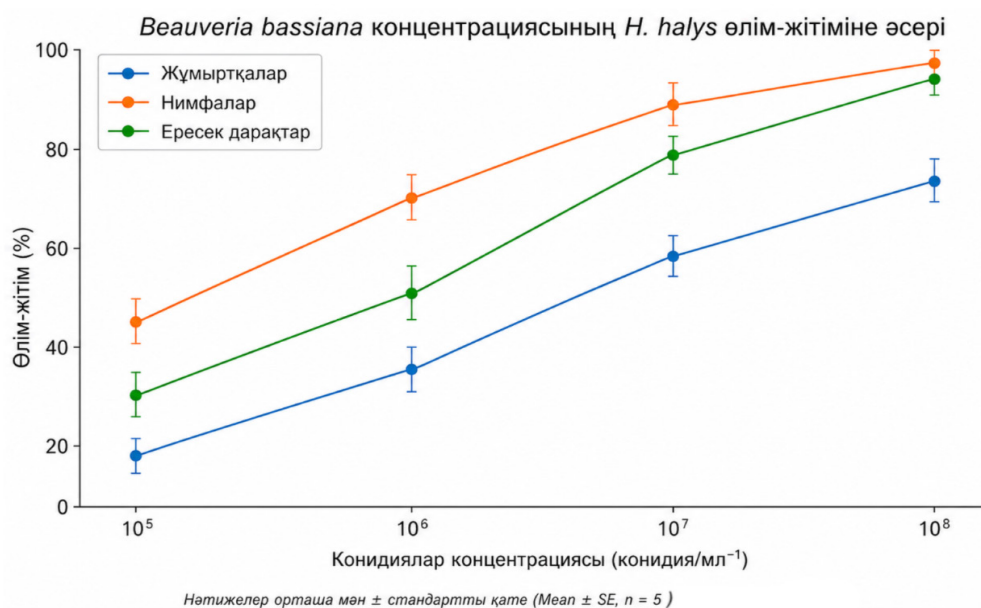
Тікелей өлім-жітімнен басқа, *B. bassiana*-мен өңдеу тірі қалған *H. halys* дарақтарында айқын сублетальді әсерлер туғызды. Ең айқын өзгерістер конидиялардың жоғары концентрацияларымен ( $10^7$ – $10^8$  конидия/мл) өңделген топтарда байқалды. Инфекцияланған жәндіктер бақылау тобымен салыстырғанда қозғалу белсенділігінің төмендеуін, қоректену қарқындылығының

азаюын және қалыпты мінез-құлық реакцияларының бұзылуын көрсетті.

Қоректену белсенділігін талдау нәтижесінде ересек дарақтардың қоректену қарқындылығы бақылау тобымен салыстырғанда  $10^7$  конидия/мл концентрациясында өңделген топта шамамен 32%-ға, ал  $10^8$  конидия/мл концентрациясында 57%-ға төмендегені анықталды. Аталған айырмашылықтар бақылау тобымен салыстырғанда статистикалық тұрғыдан маңызды болды ( $p < 0.05$ ). Жәндіктер өсімдік материалының аз көлемін тұтынды, сондай-ақ қоректену кезеңдерінің арасындағы уақыттың ұзаруы байқалды. Кейбір инфекцияланған дарақтарда өңдеуден кейінгі алғашқы 24 сағат ішінде ұзақ уақыт қозғалмай қалу және қоректенуден бас тарту белгілері тіркелді.

**2-сурет**

*Beauveria bassiana* саңырауқұлағының әртүрлі концентрацияларымен өңделгеннен кейінгі *Halymorpha halys* даму сатыларының өлім-жітімі



*B. bassiana*-ның сублетальді әсері *H. halys*-тің репродуктивтік белсенділігіне де ықпал етті. Бір аналыққа шаққандағы жұмыртқалардың орташа саны бақылау тобында  $28 \pm 2,1$  жұмыртқаны құраса,  $10^7$  және  $10^8$  конидия/мл концентрацияларымен өңделген топтарда бұл көрсеткіш сәйкесінше  $17 \pm 1,8$  және  $9 \pm 1,2$  жұмыртқаға дейін төмендеді. Сонымен қатар, өңделген аналықтарда жұмыртқа салудың кешігуі және жұмыртқа салу белсенділігінің төмендеуі бай-

қалды. Аталған айырмашылықтар бақылау тобымен салыстырғанда статистикалық тұрғыдан маңызды болды ( $p < 0.05$ ).

Жұмыртқалардың тіршілікке қабілеттілігі де саңырауқұлақпен өңдеуден кейін төмендеді. Бақылау тобында жұмыртқалардың шығу көрсеткіші шамамен 92% болса, *B. bassiana*-ның ең жоғары концентрациясы қолданылған нұсқада бұл көрсеткіш 54%-ға дейін төмендеді. Бұл нәтижелер саңырауқұлақтың тек летальді әсер

көрсетіп қана қоймай, сонымен қатар зиянкестің физиологиялық жағдайына, қоректену мінез-құлқына және репродуктивтік әлеуетіне елеулі ықпал ететінін көрсетеді.

Инфекцияланған жәндіктердегі мінез-құлық өзгерістері енжарлық, қозғалыс үйлесімділігінің төмендеуі және жалпы белсенділіктің азаюы түрінде байқалды. Бақылау тобымен салыстырғанда қозғалу белсенділігі  $10^7$  конидия/мл концентрациясымен өңделген топта 61%-ға, ал  $10^8$  конидия/мл концентрациясымен өңделген топта 84%-ға төмендеді ( $p < 0.05$ ). Бұл өзгерістер жүйелі саңырауқұлақ инфекциясының дамуымен, улы метаболиттердің жиналуымен және *B. bassiana*-ның гемоцельді колонизациялауынан туындаған физиологиялық күйзеліспен байланысты болуы мүмкін.

#### *Тіршілік ету көрсеткіштерін талдау*

Каплан–Мейер әдісі бойынша жүргізілген тіршілік ету талдауы *B. bassiana*-мен өңделгеннен кейін *H. halys* дарақтарының тіршілік ету деңгейінің конидиялар концентрациясына тәуелді түрде айтарлықтай төмендейтінін көрсетті. Барлық тәжірибелік топтарда конидиялар концентрациясының артуына және саңырауқұлақ әсер ету уақытының ұзаруына байланысты жәндіктердің тіршілік ету көрсеткішінің біртіндеп төмендеуі байқалды. Ең айқын әсер  $1 \times 10^8$  конидия/мл концентрациясындағы суспензиямен өңделген топта тіркелді, мұнда өңдеуден кейінгі алғашқы 4–6 күн ішінде тіршілік ету деңгейінің күрт төмендеуі байқалды. Тәжірибе кезеңінің соңына қарай бұл топтағы тіршілік ету көрсеткіші іс жүзінде нөлге дейін төмендеді, бұл конидиялардың ең жоғары концентрациясында *B. bassiana*-ның жоғары вируленттілігін көрсетті (3 сурет).

Саңырауқұлақтың төмен концентрацияларымен ( $10^5$ – $10^7$  конидия/мл) өңделген топтарда тіршілік ету деңгейінің төмендеуі біртіндеп жүрді.  $10^5$  конидия/мл концентрациясында жәндіктердің тіршілік ету көрсеткіші тәжірибенің алғашқы күндерінде салыстырмалы түрде жоғары деңгейде сақталды, ал өлім-жітім баяу өсті, бұл инфекциялық жүктеме төмен болған жағдайда инфекцияның даму үдерісі ұзаққа созылатынын көрсетті. Сонымен қатар,  $10^6$  және  $10^7$  конидия/мл концентрацияларында тіршілік ету деңгейінің аралық төмендеуі байқалды, ол ең төмен концентрациямен салыстырғанда инфекцияның

жылдамырақ дамуымен және жинақталған өлім-жітімнің артуымен сипатталды.

Бақылау тобында бүкіл бақылау кезеңі бойы тіршілік ету көрсеткіші тұрақты деңгейде сақталды, бұл ұстау жағдайлары мен бақылау ерітіндісінің жәндіктер өлім-жітіміне елеулі әсер етпегенін растады. Бұл нәтижелер *H. halys* дарақтарының өлім-жітімінің негізгі факторы *B. bassiana*-ның әсері болғанын көрсетеді.

Бақыланған тіршілік ету динамикасы энтомопатогенді саңырауқұлақтардың патогенезіне сәйкес келеді. Конидиялар кутикула бетіне жабысқаннан кейін олар өніп, жәндіктің жамылғысы арқылы енеді, гемоцельді колонизациялайды және біртіндеп жүйелі саңырауқұлақ инфекциясын қалыптастырады (Ortiz-Urquiza & Keyhani, 2013). Бұл үдеріс белгілі бір уақытты қажет ететіндіктен, жәндіктердің өлім-жітімі өңдеуден кейін бірден емес, біртіндеп артады. Конидиялардың жоғары концентрациялары саңырауқұлақтың сәтті жабысу және ену ықтималдығын арттырады, нәтижесінде инфекцияның дамуы жеделдеп, тіршілік ету деңгейі жылдамырақ төмендейді.

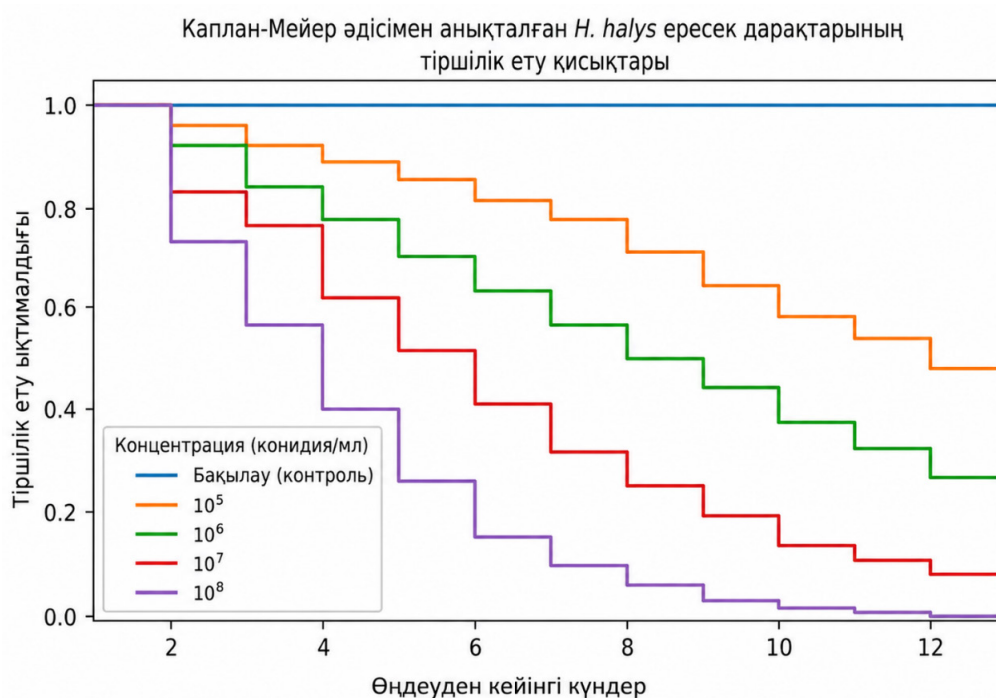
Бұл нәтижелер Parker және Gouli және әріптестерінің зерттеулерімен сәйкес келеді, онда *B. bassiana* концентрациясының жоғарылауы *H. halys*-те микоздың дамуын жеделдетіп, тіршілік ету ұзақтығын қысқартатынын көрсетілген (Gouli et al., 2012; Parker et al., 2015). Тіршілік ету қисықтарындағы осындай концентрацияға тәуелді өзгерістер энтомопатогенді саңырауқұлақтармен зақымданған Pentatomidae тұқымдасының басқа өкілдері үшін де бұрын сипатталған (Tozlu et al., 2019).

Жалпы алғанда, Каплан–Мейер талдауының нәтижелері *B. bassiana*-ның *H. halys*-ке қарсы тиімді биологиялық агент ретінде жоғары әлеуетін растайды. Конидиялар концентрациясының артуымен жәндіктердің тіршілік ету көрсеткішінің айтарлықтай төмендеуі саңырауқұлақ инфекциясының тиімділігі инфекциялық жүктемеге қатты тәуелді екенін көрсетеді және өсімдіктерді интеграцияланған қорғау бағдарламаларында жоғары вирулентті *B. bassiana* изолляттарын қолдану мүмкіндігін айқындайды.

Каплан–Мейер қисықтарын салыстыру Log-rank тесті арқылы жүргізілді. Топтар арасындағы айырмашылықтар статистикалық маңызды болды ( $\chi^2 = 31.4$ ,  $p < 0.001$ ).

**3-сурет**

*Beauveria bassiana* саңырауқұлағының әртүрлі концентрацияларымен өңделген *Halyomorpha halys* ересек дарақтарының Каплан–Мейер тіршілік ету қисықтары



*LT<sub>50</sub>* және *LT<sub>90</sub>* көрсеткіштері

Саңырауқұлақ концентрациясының артуымен *LT<sub>50</sub>* және *LT<sub>90</sub>* мәндері төмендеді, бұл конидиялар тығыздығы жоғарылаған сайын *Beauveria bassiana* вируленттілігінің артқанын

көрсетті. *LT<sub>50</sub>* және *LT<sub>90</sub>* көрсеткіштері үшін 95% сенімділік интервалдары есептелді. Конидиялар концентрациясының жоғарылауымен летальді әсердің даму уақыты қысқарды (2-кесте).

**2-кесте**

*Beauveria bassiana* саңырауқұлағының әртүрлі концентрацияларымен өңделгеннен кейінгі *Halyomorpha halys* үшін *LT<sub>50</sub>* және *LT<sub>90</sub>* көрсеткіштері

Конидиялар концентрациясы (конидия/мл)	<i>LT<sub>50</sub></i> (тәулік)	95% CI	<i>LT<sub>90</sub></i> (тәулік)	95% CI
10 <sup>5</sup>	10,4	9,6–11,3	–	–
10 <sup>6</sup>	7,8	7,1–8,5	11,5	10,4–12,8
10 <sup>7</sup>	5,2	4,7–5,8	8,1	7,3–9,0
10 <sup>8</sup>	3,7	3,2–4,1	6,2	5,5–7,0

10<sup>5</sup> конидия/мл концентрациясында өлім-жітім деңгейі 90%-ға жетпегендіктен *LT<sub>90</sub>* көрсеткіші есептелмеді. Алынған *LT<sub>50</sub>* және *LT<sub>90</sub>* мәндері бұрын жарияланған зерттеулердегі көрсеткіштермен салыстырғанда төмен болды, бұл қолданылған жергілікті *Beauveria*

*bassiana* изолятының жоғары вируленттілігін көрсетеді. Әсіресе 1×10<sup>8</sup> конидия/мл концентрациясында анықталған *LT<sub>50</sub>* мәні (3,7 тәулік) әдебиетте жиі келтірілетін көрсеткіштерден төмен болды (Gouli et al., 2012; Özdemir et al., 2022).

### Микроскопиялық бақылаулар

Микроскопиялық зерттеу саңырауқұлақтың жәндік кутикуласына жабысуын және оның өсуін растады. Өңдеуден кейін 3–5 күн өткен соң инфекцияланған өлекселерде гифалардың жәндік жамылғысына енуі және мицелийдің сыртқы өсуі байқалды. Қатты инфекцияланған үлгілерде қарқынды спора түзілуі тіркелді, бұл *Beauveria bassiana* тудырған микоздың дамуын растады.

### Қорытынды

Зерттеу нәтижелері энтомопатогенді *Beauveria bassiana* саңырауқұлағының *Halyomorpha halys*-ке қарсы биологиялық күрес агенті ретіндегі жоғары әлеуетін растады. Саңырауқұлақ инфекциясының тиімділігі конидиялар концентрациясына және жәндіктің даму сатысына тікелей тәуелді екені анықталды. Конидиялар концентрациясы  $10^5$ -тен  $10^8$  конидия/мл-ге дейін артқан сайын барлық тәжірибелік топтарда өлім-жітім деңгейінің айтарлықтай жоғарылауы байқалды. Ең жоғары концентрацияда нимфалардың өлім-жітімі 98%-ға, ересек дарақтардың өлім-жітімі 95%-ға және жұмыртқалардың өлім-жітімі 74%-ға жетті.

*H. halys* нимфалары *Beauveria bassiana*-ға ең жоғары сезімталдық көрсетті, ал жұмыртқалар салыстырмалы түрде төменірек сезімталдық танытты, бұл олардың хорионының қорғаныш қасиеттерімен байланысты болуы мүмкін. Алынған  $LT_{50}$  және  $LT_{90}$  көрсеткіштері конидиялар концентрациясының жоғарылауымен летальді инфекцияның дамуына қажетті уақыттың қысқаратынын көрсетті. Ең жоғары концентрацияда  $LT_{50}$  көрсеткіші 3,7 тәулікті құрады, бұл қолданылған жергілікті *Beauveria bassiana* изолятының жоғары вируленттілігін дәлелдейді.

*Beauveria bassiana* тікелей летальді әсерінен басқа, қозғалу белсенділігінің төмендеуі, қоректену қарқындылығының азаюы, қимыл-қозғалыс үйлесімділігінің бұзылуы және көбею қабілетінің төмендеуі сияқты айқын сублетальді әсерлер туғызды. Өңделген дарақтарда қоректену белсенділігінің төмендеуімен қатар, репродуктивтік көрсеткіштердің нашарлауы байқалды. Өңделген аналықтарда жұмыртқа салу қарқындылығының едәуір төмендеуі және ұрпақтарының тіршілікке қабілеттілігінің азаюы тіркелді. Бұл нәтижелер саңырауқұлақ инфекциясының зиянкестің физиологиялық жағдайы мен мінез-құлқына кешенді теріс әсер ететінін көрсетеді.

Микроскопиялық зерттеулер конидиялардың жәндік кутикуласына жабысуын, гифа-

лардың өнуін және инфекцияланған дарақтардың бетінде микоздың дамуын растады, бұл *Beauveria bassiana*-ның иесі ағзасын сәтті колонизациялағанын көрсетті. Сонымен қатар, Каплан-Мейер талдауы саңырауқұлақпен өңделген *Halyomorpha halys* дарақтарының тіршілік ету деңгейінің концентрацияға тәуелді түрде айтарлықтай төмендейтінін көрсетті.

Осылайша, алынған нәтижелер *Beauveria bassiana* жергілікті изолятының *Halyomorpha halys*-ке қарсы жоғары энтомопатогендік белсенділік көрсететінін және оны зиянкестермен интеграцияланған күрес жүйелерінде қолданылудың перспективалы екенін дәлелдейді. Саңырауқұлақтың жоғары патогенділігі, сондай-ақ оның летальді және сублетальді әсерлер туғызу қабілеті *Beauveria bassiana*-ны тұрақты биологиялық күрес бағдарламаларының тиімді құрамдас бөлігі ретінде қарастыруға мүмкіндік береді. Болашақ зерттеулерде әртүрлі *Beauveria bassiana* изоляттарының далалық жағдайлардағы тиімділігін бағалау, қолдану технологияларын оңтайландыру және энтомопатогенді саңырауқұлақтардың зиянкестермен интеграцияланған күрес жүйелерінің басқа компоненттерімен өзара әрекеттесу ерекшеліктерін зерттеу маңызды болып табылады.

### Қаржыландыру

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ауыл шаруашылығы министрлігінің BR22887230 нысаналы қаржыландыру бағдарламасы шеңберінде қаржыландырылды.

### Авторлардың үлесі

*Махамбетов Ә.Н.*: зерттеу тұжырымдама-сын әзірлеу, әдістеме дайындау, эксперименттер жүргізу, деректерді талдау, нәтижелерді визуализациялау, мақаланың бастапқы нұсқасын жазу; *Кенжебекова Р.Т.*: эксперименттік зерттеулер жүргізу, деректерді жинау және жүйелеу, мақаланы дайындауға қатысу, нәтижелерді талдау және интерпретациялау; *Дулат Б.*: эксперименттік зерттеулер жүргізу, материалдар мен ресурстарды қамтамасыз ету, деректерді жинау және өңдеу; *Даирбекова З.К.*: зерттеуді ұйымдастыру және үйлестіру, ғылыми кеңес беру, нәтижелерді талдау және интерпретациялау, мақаланы редакциялау және жетілдіру; *Гриценко Д.А.*: ғылыми жетекшілік жасау, зерттеуді үйлестіру, ресурстық қамтамасыз ету, нәтижелерді талдау, мақаланы сараптау және редакциялау.

## References

- Abbott, W. S. (1987). A method of computing the effectiveness of an insecticide (1925). *Journal of the American Mosquito Control Association*, 3(2), 302–303.
- Ahmad, S. A., Abdul, R. Q., Allah, B., & Tayyab, H. (2012). Entomopathogenic fungi as biological controllers: New insights into their virulence and pathogenicity. *Archives of Biological Sciences*, 64(1), 21–42.
- Altinok, H., Altinok, M., & Koca, A. (2019). Modes of action of entomopathogenic fungi. *Current Trends in Natural Sciences*, 8, 117–124.
- Beus, M. P., Lemić, D., Skendžić, S., Čirjak, D., & Živković, I. P. (2024). The brown marmorated stink bug (Hemiptera: Pentatomidae)—A major challenge for global plant production. *Agriculture*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/agriculture14081329>
- Bosco, L., Moraglio, S. T., & Tavella, L. (2018). *Halyomorpha halys*, a serious threat for hazelnut in newly invaded areas. *Journal of Pest Science*, 91, 661–670. <https://doi.org/10.1007/s10340-018-1007-0>
- Chandler, D., Bailey, A. S., Tatchell, G. M., Davidson, G., Greaves, J., & Grant, W. P. (2011). The development, regulation and use of biopesticides for integrated pest management. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 366(1573), 1987–1998. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0390>
- Davidson-Pilon, C. (2024). lifelines: Survival analysis in Python. *Zenodo*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10715381>
- Fluch, M., Corretto, E., Grella, N., Fischnaller, S., Schwembacher, S., & Schuler, H. (2024). A molecular gut content analysis reveals the feeding hosts of the brown marmorated stink bug *Halyomorpha halys*. *Research Square*, 1-23
- Gokturk, T. (2024). Current status of *Halyomorpha halys* in Turkey. *Georgian Scientists*, 6(4), 518–528.
- Gouli, V., Gouli, S., Skinner, M., Hamilton, G., Kim, J. S., & Parker, B. L. (2012). Virulence of select entomopathogenic fungi to the brown marmorated stink bug, *Halyomorpha halys* (Stål) (Heteroptera: Pentatomidae). *Pest Management Science*, 68(2), 155–157. <https://doi.org/10.1002/ps.2324>
- Haye, T., Garipey, T., Hoelmer, K., Rossi, J.-P., Streito, J.-C., Tassus, X., & Desneux, N. (2015). Range expansion of the invasive brown marmorated stink bug, *Halyomorpha halys*: An increasing threat to field, fruit and vegetable crops worldwide. *Journal of Pest Science*, 88, 665–673. <https://doi.org/10.1007/s10340-015-0670-2>
- Herrick, C. (2011). Brown marmorated stink bug causes \$37 million in losses to Mid-Atlantic apple growers. *Growing Produce*. Retrieved May 13, 2026, from <https://www.growingproduce.com/fruits/apples-pears/brown-marmorated-stink-bug-causes-37-million-in-losses-to-mid-atlantic-apple-growers/>
- Joseph, S. V., Stallings, J. W., Leskey, T. C., Krawczyk, G., Polk, D., Butler, B., & Bergh, J. C. (2014). Spatial distribution of brown marmorated stink bug (Hemiptera: Pentatomidae) injury at harvest in Mid-Atlantic apple orchards. *Journal of Economic Entomology*, 107(5), 1839–1848. <https://doi.org/10.1603/EC14191>
- Perktold, J., Seabold, S., Sheppard, K., Fulton, C., Shedden, K., Brockmendel, J., ... Halchenko, Y. (2024). statsmodels/statsmodels: Release 0.14.2. *Zenodo*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10957260>
- Keszthelyi, S., Gibicsár, S., Jócsák, I., Fajtai, D., & Donkó, T. (2022). Analysis of the destructive effect of the *Halyomorpha halys* saliva on tomato by computer tomographical imaging and antioxidant capacity measurement. *Biology*, 11(7), 1070. <https://doi.org/10.3390/biology11071070>
- Lee, D.-H., Short, B. D., Joseph, S. V., Bergh, J. C., & Leskey, T. C. (2013). Review of the biology, ecology, and management of *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae) in China, Japan, and the Republic of Korea. *Environmental Entomology*, 42(4), 627–641. <https://doi.org/10.1603/EN13006>
- Leskey, T., Hamilton, G., Biddinger, D., Buffington, M., Dieckhoff, C., Dively, G., Fraser, H., Garipey, T., Hedstrom, C., Herbert, D., Hoelmer, K., Hooks, C., Inkley, D., Krawczyk, G., Kuhar, T., Lee, D.-H., Nielsen, A., Pfeiffer, D., Rodriguez-Saona, C., & Wiman, N. (2022). *Halyomorpha halys* (brown marmorated stink bug). *CABI Compendium*. <https://doi.org/10.1079/cabicompendium.27377>
- Li, J., Zhang, K., Zuo, T., Chen, Y., Zhang, Y., Li, X., Zhang, X., & Song, L. (2025). Nontarget effects of insecticides on biological control agents: Insights from red pine forests and global challenges in forest pest management. *Journal of Integrated Pest Management*, 16(1), 16.
- Litwin, A., Nowak, M., & Różalska, S. (2020). Entomopathogenic fungi: Unconventional applications. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 19(1), 23–42. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09525-1>
- Liu, D., Smagghe, G., & Liu, T.-X. (2023). Interactions between entomopathogenic fungi and insects and prospects with glycans. *Journal of Fungi*, 9(5), 560. <https://doi.org/10.3390/jof9050560>
- Luo, Z.-Y., Gao, L.-P., Li, W.-J., Chen, J.-H., Ali, M. Y., Zhang, F., Li, F.-Q., Wang, X.-P., & Zhang, J.-P. (2025). Assessing the lethal effects of pesticide residue exposure on beneficial parasitoids and their host, *Halyomorpha halys* (Stål) (Hemiptera: Pentatomidae). *Journal of Economic Entomology*, 118(1), 242–252.
- Murvanidze, M., Krawczyk, G., Inasaridze, N., Dekanoidze, L., Samsonadze, N., Macharashvili, M., Khutsishvili, S., & Shengelaia, S. (2018). Preliminary data on the biology of brown marmorated stink bug \**Halyomorpha halys*\* (Hemiptera, Pentatomidae) in Georgia. *Turkish Journal of Zoology*, 42, 323–334. <https://doi.org/10.3906/zoo-1710-37>
- Ortiz-Urquiza, A., & Keyhani, N. O. (2013). Action on the surface: Entomopathogenic fungi versus the insect cuticle. *Insects*, 4(3), 357–374. <https://doi.org/10.3390/insects4030357>
- Parker, B. L., Skinner, M., Gouli, S., Gouli, V., & Kim, J. S. (2015). Virulence of BotaniGard® to second instar brown marmorated stink bug, *Halyomorpha halys* (Stål) (Heteroptera: Pentatomidae). *Insects*, 6(2), 319–324. <https://doi.org/10.3390/insects6020319>

Sharma, A., Sharma, S., & Yadav, P. K. (2023). Entomopathogenic fungi and their relevance in sustainable agriculture: A review. *Cogent Food & Agriculture*, 9(1), 2180857. <https://doi.org/10.1080/23311932.2023.2180857>

Tassini, C., & Mifsud, D. (2019). The brown marmorated stink bug, *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Heteroptera: Pentatomidae) in Malta. *EPPPO Bulletin*, 49(1), 132–136. <https://doi.org/10.1111/epp.12555>

Tozlu, E., Saruhan, I., Tozlu, G., Kotan, R., Dadaşoğlu, F., & Tekiner, N. (2019). Potentials of some entomopathogens against the brown marmorated stink bug, *Halyomorpha halys* (Stål, 1855) (Hemiptera: Pentatomidae). *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 29(1), 76. <https://doi.org/10.1186/s41938-019-0165-5>

Tukey, J. W. (1949). Comparing individual means in the analysis of variance. *Biometrics*, 5(2), 99–114. <https://doi.org/10.2307/3001913>

Wang, H., Peng, H., Li, W., Cheng, P., & Gong, M. (2021). The toxins of *Beauveria bassiana* and the strategies to improve their virulence to insects. *Frontiers in Microbiology*, 12, 705343. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.705343>

Wang, J. B., St. Leger, R. J., & Wang, C. (2016). Advances in genomics of entomopathogenic fungi. *Advances in Genetics*, 94, 67–105. <https://doi.org/10.1016/bs.adgen.2016.01.001>

Zhou, W., Arcot, Y., Medina, R. F., Bernal, J., Cisneros-Zevallos, L., & Akbulut, M. E. S. (2024). Integrated pest management: An update on the sustainability approach to crop protection. *ACS Omega*, 9(40), 41130–41147. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c04880>

#### **Авторлар туралы мәлімет:**

Махамбетов Әлібек – ҚР ҒЖБМ ҒК ШЖҚ РМК «Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институты» Молекулалық биология зертханасының лаборанты (Алматы, Қазақстан, e-mail: [alibek2904@mail.ru](mailto:alibek2904@mail.ru)).

Кенжебекова Роза – ҚР ҒЖБМ ҒК ШЖҚ РМК «Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институты» Молекулалық биология зертханасының ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: [rozakenzhebekova344@gmail.com](mailto:rozakenzhebekova344@gmail.com)).

Дулат Бақыт – ҚР ҒЖБМ ҒК ШЖҚ РМК «Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институты» Молекулалық биология зертханасының лаборанты, AgriBioTech ғылыми-зерттеу орталығы ЖШС (Алматы, Қазақстан, e-mail: [bahytalt99@gmail.com](mailto:bahytalt99@gmail.com)).

Даирбекова Зарина – ҚР ҒЖБМ ҒК ШЖҚ РМК «Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институты» Молекулалық биология зертханасының лаборанты (Алматы, Қазақстан, e-mail: [dairbekovaz2001@gmail.com](mailto:dairbekovaz2001@gmail.com)).

Гриценко Диляра (хат-хабар алмасуға жауапты автор) – PhD, қауымдастырылған профессор, ҚР ҒЖБМ ҒК ШЖҚ РМК «Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институты» Молекулалық биология зертханасының меңгерушісі, AgriBioTech ғылыми-зерттеу орталығы ЖШС (Алматы, Қазақстан, e-mail: [d.kopytina@gmail.com](mailto:d.kopytina@gmail.com)).

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

Makhambetov Alibek – Laboratory Assistant, Laboratory of Molecular Biology, RSE on REM «Institute of Plant Biology and Biotechnology» CS MSHE RK, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: [alibek2904@mail.ru](mailto:alibek2904@mail.ru)).

Kenzhebekova Roza – researcher at the Laboratory of Molecular Biology, RSE on REM “Institute of Plant Biology and Biotechnology” CS MSHE RK (Almaty, Kazakhstan, e-mail: [rozakenzhebekova344@gmail.com](mailto:rozakenzhebekova344@gmail.com)).

Dulat Bakyt – Laboratory Assistant, Laboratory of Molecular Biology, RSE on REM «Institute of Plant Biology and Biotechnology» CS MSHE RK, Research Center AgriBioTech LLP (Almaty, Kazakhstan, e-mail: [bahytalt99@gmail.com](mailto:bahytalt99@gmail.com)).

Dairbekova Zarina – Laboratory Assistant, Laboratory of Molecular Biology, RSE on REM «Institute of Plant Biology and Biotechnology» CS MSHE RK, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: [dairbekovaz2001@gmail.com](mailto:dairbekovaz2001@gmail.com)).

Gritsenko Dilyara (corresponding author) – PhD, Associate Professor, Head of the Laboratory of Molecular Biology, RSE on REM “Institute of Plant Biology and Biotechnology” CS MSHE RK, Research Center AgriBioTech LLP (Almaty, Kazakhstan, e-mail: [d.kopytina@gmail.com](mailto:d.kopytina@gmail.com)).

#### **Сведения об авторах:**

Махамбетов Алибек – лаборант лаборатории молекулярной биологии РГП на ПХВ «Институт биологии и биотехнологии растений» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан, e-mail: [alibek2904@mail.ru](mailto:alibek2904@mail.ru)).

Кенжебекова Роза – научный сотрудник лаборатории молекулярной биологии РГП на ПХВ «Институт биологии и биотехнологии растений» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан, e-mail: [rozakenzhebekova344@gmail.com](mailto:rozakenzhebekova344@gmail.com)).

Дулат Бақыт – лаборант лаборатории молекулярной биологии РГП на ПХВ «Институт биологии и биотехнологии растений» КН МНВО РК, ТОО «Научно-исследовательский центр AgriBioTech» (Алматы, Казахстан, e-mail: [bahytalt99@gmail.com](mailto:bahytalt99@gmail.com)).

Даирбекова Зарина – лаборант лаборатории молекулярной биологии РГП на ПХВ «Институт биологии и биотехнологии растений» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан, e-mail: [dairbekovaz2001@gmail.com](mailto:dairbekovaz2001@gmail.com)).

Гриценко Диляра (автор для корреспонденции) – PhD, ассоциированный профессор, заведующая лабораторией молекулярной биологии РГП на ПХВ «Институт биологии и биотехнологии растений» КН МНВО РК, ТОО «Научно-исследовательский центр AgriBioTech» (Алматы, Казахстан, e-mail: [d.kopytina@gmail.com](mailto:d.kopytina@gmail.com)).

Келін түсті: 21 қаңтар 2026 жыл  
Қабылданды: 15 маусым 2026 жыл

С.Д. Жантлесова\* , Ж.Т. Мусабеков , Ж. Хамитқызы ,  
А.Б. Талипова , А.С. Кистаубаева 

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан  
\*e-mail: sirina.zhantlessova@mail.ru

## ЖАРКЕНТТІҢ ГЕОТЕРМАЛДЫҚ КӨЗДЕРІНЕН БӨЛІНГЕН ТЕРМОФИЛЬДІ БАКТЕРИЯЛАРДЫҢ ПЛАСТИКТІ ЫДЫРАТУ ӘЛЕУЕТІ

Пластикалық ластану – синтетикалық полимерлердің табиғи ыдырауға төзімділігі мен тұрақтылығының жоғары болуына байланысты жаһандық экологиялық маңызды проблема болып табылады. Олардың ішінде полиэтилентерефталат (ПЭТ) ең кең таралған пластиктердің бірі, бұл оның қоршаған ортада айтарлықтай жиналуына әкеледі. Термофильді микроорганизмдерді қолдану арқылы биологиялық ыдырау дәстүрлі жою әдістеріне перспективалы балама ұсынады. Осы зерттеуде Қазақстанның Жаркент өңіріндегі геотермалды көздерден ПЭТ ыдырату әлеуетін бағалау үшін термофильді бактериялар оқшауланды. 42–103 °С температуралы жерлерден алынған су, шөгінді және топырақ үлгілері ПЭТ-ті жалғыз көміртек көзі ретінде қамтитын минералды тұзды ортада байытылды. Нәтижесінде 16 термофильді бактериялық изолят алынды және пластикті ыдырату белсенділігіне қарай іріктелді. ПЭТ пленкалы дискілерін қолданған ыдырату сынақтары төрт термофильді изоляттың (W-DP-01, W-DP-03, W-DP-06, SED-02) полимердің салмағын айтарлықтай азайтатынын көрсетті, 28 күн бойы 65 °С температурада инкубацияланғаннан кейін 13,9–16,0 мг дейін азайды. Биохимиялық және морфологиялық сипаттау нәтижелері жоғары ыдырату қабілеті бар изоляттардың *Bacillus* тұқымдасына жататынын анықтады.

**Түйін сөздер:** термофильді бактериялар, полиэтилентерефталат, ПЭТ ыдырату, геотермалдық көздер, *Bacillus*, биодеградация.

S.D. Zhantlessova\*, Zh.T. Mussabekov,  
Zh. Khamitkyzy, A.B. Talipova, A.S. Kistaubayeva  
Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan  
\*e-mail: sirina.zhantlessova@mail.ru

### Potential for plastic degradation by thermophilic bacteria isolated from geothermal sources of Zharkent

Plastic pollution has become a critical worldwide environmental problem because of the exceptional stability and high resistance of synthetic polymers to natural degradation processes. Plastic waste containing polyethylene terephthalate (PET) is a major contributor to this problem, as PET is one of the most commonly used plastics, and its improper disposal results in its accumulation in nature. The use of thermophilic microorganisms for biotic degradation is one of the environmentally friendly methods that are expected to replace traditional disposal methods. This work aimed at checking the ability of thermophilic bacteria purified from the geothermal springs of the Zharkent region (Kazakhstan) to degrade PET. Water, sediment, and soil samples collected from areas where the temperature was between 42 and 103 °C were incubated in mineral salt medium with PET as the only carbon source. We obtained sixteen thermophilic bacterial strains and examined their potential of plastic degradation.

After testing the degradation of PET film discs, we found that only four out of those thermophilic strains (W-DP-01, W-DP-03, W-DP-06, SED-02) caused a significant reduction in the polymer weight, i.e., 13.9–16.0 mg, after 28 days of incubation at 65 °C.

The *Bacillus* genus was recognized as the source of the isolates with the outstanding degrading capability of the polymer based on their biochemical and morphological.

**Keywords:** thermophilic bacteria, polyethylene terephthalate, PET degradation, geothermal sources, *Bacillus*, biodegradation.

С.Д. Жантлесова\*, Ж.Т. Мусабеков,  
Ж. Хамитқызы, А.Б. Талипова, А.С. Кистаубаева

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

\*e-mail: sirina.zhantlessova@mail.ru

### Потенциал разложения пластика термофильными бактериями, выделенными из геотермальных источников Жаркента

Пластиковые отходы представляют собой одну из важнейших экологических проблем современного мира, так как синтетические полимеры обладают высокой химической прочностью и не могут быть быстро разрушены естественным путем. Полиэтилентерефталат (ПЭТ) относится к одной из наиболее распространенных групп пластмасс, вследствие чего практически во всех окружающих человека средах можно обнаружить накопления этого материала. Обезвреживание пластиковых отходов с помощью термофильных микроорганизмов является одним из перспективных направлений в области утилизации. В настоящей работе из геотермальных источников, расположенных в Жаркенте (Казахстан), были выделены термофильные бактерии с целью оценки их потенциала для деструкции ПЭТ. Образцы воды, осадков и почвы, взятые в горячих источниках с температурой от 42 до 103 °С, были инкубированы в минерально-солевой среде с использованием полиэтилентерефталата в качестве единственного источника углерода. В итоге было изолировано шестнадцать штаммов термофильных бактерий, которые проверяли на способность к разложению пластика. В экспериментах по разложению с использованием образцов из ПЭТ-пленки было установлено, что 4 изолята термофильных бактерий (W-DP-01, W-DP-03, W-DP-06, SED-02) обусловили значительную потерю массы полимеров в количестве от 13, 9 до 16, 0 мг после 28 дней инкубации при температуре 65 °С. Биохимическая характеристика и микроскопия показали, что изоляты с наивысшей активностью к разложению принадлежат к роду *Bacillus*.

**Ключевые слова:** термофильные бактерии, полиэтилентерефталат, деградация ПЭТ, геотермальные источники, *Bacillus*, биодegradация.

#### Кіріспе

Пластиктер беріктігі, әмбебаптығы және өндіріс құнының төмендігі арқасында әлемде ең көп қолданылатын материалдардың бірі болып табылады. Олардың қаптама өндірісінде, құрылыс саласында, электроникада және денсаулық сақтау жүйесінде кеңінен қолданылуы жаһандық пластик өндірісінің үздіксіз өсуіне әкеліп, жылына 390 миллион тоннадан асты (Boschi et al., 2024). Дегенмен, пластмассаларды құнды ететін қасиеттер, әсіресе олардың ыдырауға төзімділігі, ұзақ мерзімді қоршаған ортаның жиналуына ықпал етеді, бұл экологиялық және денсаулыққа қатысты елеулі мәселелер тудырады. Пластикалық қалдықтардың көп мөлшері қоқыс полигондарына, топыраққа және су экожүйелеріне түседі, онда олар ондаған жылдар бойы сақталып, азық-түлік тізбегіне енетін микропластиктерге және нанопластиктерге бөлінеді (Yang et al., 2025; Chaudhary et al., 2025). Қазақстанда пластикалық қалдықтардың жалпы көлемі жылына шамамен 625-730 мың тоннаға жетеді деп есептеледі. Бұл қоқыс полигонына тастау және өртеу сияқты дәстүрлі әдістер жеткіліксіз әрі қоршаған ортаға зиянды болғандықтан тиімдірек жою әдістерін әзірлеуді қажет етеді (Schulte & Busch, 2024). Пластикалық қал-

дықтардың көпшілігі ел ішінде қалады полигондарға тасталады немесе табиғи ортада жиналады. Жүргізіліп жатқан бастамаларға қарамастан сұрыпталған пластикалық қалдықтардың үлесі тек 9,9% құрайды бұл бүкіл ел бойынша қалдықтарды бөлудегі шектеулі прогресті көрсетеді (Kazakh Telegraph Agency, 2025).

Әртүрлі пластик түрлерінің ішінде полиэтилентерефталат (ПЭТ) ең көп өндірілетін және әлемде тұтынылатын полимерлердің бірі болып табылады. ПЭТ жоғары механикалық беріктігіне термиялық тұрақтылығына және мөлдірлігіне байланысты сусын бөтелкелерінде тамақ ыдыстарында синтетикалық талшықтарда кеңінен қолданылады (Benyathiar et al., 2022). Ол Қазақстандағы жылдық пластикалық қалдықтардың жалпы көлемінің шамамен 14%-ын құрайды (Kwan, 2025).

ПЭТ қалдықтарын қалпына келтірудің бір перспективасы бағыты – полимер негізін құрайтын эфирлік байланыстарды гидролиздеуге икемді микробтық ферменттерді қолдана отырып биологиялық деполимерлеу. ПЭТ-ыдырайтын ферменттердегі жетістіктер (мысалы ПЭТ гидролиздері және инженерлік деполимеразалар) ферментативті гидролиз химиялық қайта өңдеуге жарамды мономерлерді бере алатынын көрсетті ал ақуыз инженериясы саласындағы

соңғы жұмыстар каталитикалық тиімділік пен процеске қатысты жағдайларда термотұрақтылықты айтарлықтай жақсартты (Tournier et al., 2020; Arnal et al., 2023).

Термофильді микроорганизмдер ПЭТ биоөңдеу үшін ерекше қызықты, өйткені олардың термотұрақты ферменттері жоғары температурада жұмыс істей алады, бұл полимер тізбегінің қозғалғыштығын және реакция кинетикасын жақсартады, сонымен қатар биореакторлардағы ластану қаупін азайтады. Бүгінгі күнге дейін бүкіл әлемдегі ыстық бұлақтардан термофильді бактериялардың кең ауқымы бөлініп алынды және анықталды. Олардың ішінде *Bacillus*, *Paenibacillus*, *Anoxybacillus*, *Geobacillus*, *Lysinibacillus* және *Brevibacillus* сияқты тұқымдастар жақсы белгілі және биотехнологияда әртүрлі қолданыстарды тапты (Ortega-Villar et al., 2024; Cirić & Šaraba, 2025). Термофильді пластикалық биодеградацияны қорытындылайтын шолулар мен эксперименттік зерттеулер мезофилдермен салыстырғанда термофильдерде ыдырау жылдамдығының және әртүрлі ферментативті репертуарлардың жоғарылағанын көрсетеді, бұл ыстыққа бейімделген ферменттердің бөлме температурасындағы биокатализдің кейбір шектеулерін жеңе алатынын көрсетеді (Yan et al., 2021).

Соңғы зерттеулер көрсеткендей, термофильді ферменттік жүйелер полимердің шынылану температурасына жақын ПЭТ гидролизін айтарлықтай жақсарта алады, мұнда тізбектің қозғалғыштығының жоғарылауы ферменттердің қолжетімділігі мен каталитикалық тиімділігін арттырады. Мысалы, ICCG сияқты модификацияланған термофильді ПЭТ гидролазалары процеске сәйкес жағдайларда жоғары белсенділік пен тұрақтылықты көрсетеді, бұл термофильді биокатализдің мезофильді жүйелерге қарағанда технологиялық артықшылығын растайды (Zeng et al., 2022).

Сондықтан геотермалдық бұлақтар мен басқа да жоғары температуралы мекендеу орталары жаңа термофильді штамдар мен термотұрақты ПЭТ-гидролазаларды іздеудің бай нысандары болып табылады. Жаркент геотермалдық бұлақтарының (Алматы облысы, Қазақстан) алдыңғы микробиологиялық және метагеномдық зерттеулері биотехнологиялық қолдану үшін перспективалы әртүрлі термофильді қауымдастықтар мен изоляттарды анықтады. Бұл жергілікті экожүйелердің жаңа ферменттік белсенділікті ашу үшін құнды бірақ аз зерттелген ресурс екенін көрсетеді (Mashzhan et al., 2021).

Бұл зерттеу Жаркент геотермалдық бұлақтарынан термофильді бактерияларды бөліп алуға және олардың бақыланатын зертханалық жағдайларда ПЭТ ыдырауын бастау әлеуетін бағалауға бағытталған. ПЭТ субстраттарының қатысуымен олардың өсуін, биохимиялық ерекшеліктерін және гидролитикалық белсенділігін зерттеу арқылы бұл жұмыс термофильді биоыдырау стратегияларын әзірлеуге үлес қоса алатын перспективалы штамдарды анықтауға бағытталған.

### Зерттеу материалдары мен әдістері

Сынамаларды жинау және бактерияларды оқшаулау. Су, шөгінді (лайлы) және топырақ үлгілері Жаркент ауданындағы (Алматы облысы) геотермалдық бұлақтардан алынды. Сынамаларды алу орындарының далалық өлшеулері 42°C-тан 103 °C-қа дейінгі температурада тіркелді. Мұнда екі типтік үлгі көрсетілген: таяз, ашық бассейннен жиналған органикалық заттарға бай шөгінді N1 үлгісі және ластануды азайту үшін асептикалық жағдайда жиналған шамамен 2385 м тереңдікте және 99,5 °C температурада алынған терең су үлгісі N2 үлгісі. Қосымша топырақ және лайлы шөгінділер жақын маңдағы ағып жатқан жерлерден жиналды. Үлгілер GPS координаттары және жергілікті параметрлер (температура, pH) көрсетілген стерильді 500 мл полипропилен бөтелкелеріне салынып, тығыздалып, өңдеу үшін зертханаға жеткізілді. Барлық үлгілер жиналғаннан кейін 24 сағат ішінде өңделді. Топырақ және шөгінді үлгілері гомогенделіп, стерильді тұзды ерітіндіде (0,85% NaCl) сериялық түрде сұйылтылды, ал су үлгілері микробтық биомассаны шоғырландыру үшін 0,45 мкм мембраналық сүзгілер арқылы сүзілді.

Өңделген үлгілердің аликвоталары келесі құрамдағы минералды тұзды ортаға егілді (г/л, егер басқаша көрсетілмесе):  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  – 1.5;  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  – 2.5;  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  – 1.0;  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  – 0.2;  $\text{NaCl}$  – 1.0;  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  – 0.02; микроэлементтер ерітіндісі ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  – 5.0 г/л,  $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  – 2.5 г/л,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  – 0.5 г/л,  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  – 0.2 г/л) – 1 мл/л Бастапқы өсіру үшін жалғыз көміртек көзі ретінде пластик (PET) ұнтағы (<500 мкм дейін еленген әр жағы бір сағат бойы ультракүлгін сәулемен стерильденген) 1 г/л мөлшерінде қосылды. Үлгілер термофильді микроорганизмдердің өсуін ынталандыру мақсатында 65°C температурада жеті күн бойы инкубацияланды. Инкубациядан кейін әрбір байытылған культу-

радан 100 мкл алынып бірізді сұйылту жасалды және колонияларды бөліп алу үшін минералды тұзды агарлы орта табақшаларына егілді. Табақшалар сол температуралық жағдайларда 72 сағат бойы инкубацияланды. Морфологиясы бойынша ерекшеленетін жеке колониялар таза термофильді изоляттарды бөліп алу үшін жаңа агарлы ортаға бірнеше рет қайта штрихтау арқылы егілді.

Таза изоляттар 0.1% (масс./көлем) ПЭТ қосылған қатты минералды тұзды ортада өсу қабілеті бойынша тексерілді. Әрбір бактериялық изоляттан ілмекпен алынған материал агар табақшасының ортасына егілді; барлық табақшалар 65°C температурада 72 сағат бойы инкубацияланды. Инкубация кезеңінен кейін әр изолят үшін бактериялық өсудің диаметрі анықталды. Өсу колония диаметрі мен көзге көрінетін таралуына негізделіп бағаланды. Изоляттар келесі санаттарға бөлінді: күшті (колония диаметрі > 2.5 см), орташа (колония диаметрі 1.0–2.5 см), әлсіз (колония диаметрі < 1.0 см), өсу анықталмады (ND). *ПЭТ ыдырауының сандық талдауы.*

ПЭТ пленкалы дискілер (диаметрі 1 см, □ 66 мг) коммерциялық ПЭТ бөтелкелерінен жасалған, 70% этанолмен және стерильді тазартылған сумен жуылған және стерильді жағдайда ауада кептірілген. Дискілер ультракүлгін сәулемен зарарсыздандырылды. Алдын ала өлшенген дискілер таңдалған бактериялық изоляттардың стандартталған жасушалық суспензиясымен (OD<sub>600</sub> = 0,1) егілген 20 мл сұйық ортасы (көміртегі көзі жок) бар 100 мл Эрленмейер колбаларында инкубацияланды. Колбалар 28 күн бойы 120 айн/мин жылдамдықпен шайқалған кезде 65°C температурада инкубацияланды. Бақылау колбаларында бактериялық егусіз стерильді ортада ПЭТ дискілері болды. Инкубациядан кейін ПЭТ дискілері алынып тасталды, бекітілген жасушаларды кетіру үшін тазартылған сумен мұқият жуылды, көлеңкеде кептірілді және қайта өлшенді. ПЭТ деградациясы дискілердің массасының жоғалуы (мг) өлшеу арқылы анықталды және бастапқы массаға қатысты пайыздық масса жоғалу түрінде есептелді: [(бастапқы масса – соңғы масса) / бастапқы масса × 100%].

*Биохимиялық сипаттамасы.*

Таңдалған изоляттар стандартты микробиологиялық сынақтар арқылы сипатталды: граммен бояу, жасушалар мен колониялардың морфологиясы, эндоспора түзілуі (Шеффер-

Фултон бояуы), каталаза (3% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), оксидаза (Bactident®, Merck оксидаза жолақтары) және арнайы қоректік орталарда желатин, крахмал және казеин гидролизі. Цитратты қолдану және уреаза белсенділігі де тексерілді.

*Статистикалық талдау.*

Егер басқаша көрсетілмесе, барлық эксперименттік топтар үш данада талданды. Барлық статистикалық талдаулар SPSS бағдарламалық жасақтамасының көмегімен жүргізілді (28.0 нұсқасы, IBM Corp., Армонк, Нью-Йорк, АҚШ). Р-мәні < 0,05 болған жағдайда статистикалық маңызды деп есептелді.

### Зерттеу нәтижелері және оларды талдау

ПЭТ-пластмассаны сәйкестендіру жүйесіне сәйкес жіктелген Пластмассалардың жеті негізгі санатының бірі. Бұл гидролитикалық ыдырауға ұшырайтын сомономерлі бірліктер мен алифатты сегменттерден тұратын жоғары молекулалы хош иісті полиэфир (Venkatachalam et al., 2012). Полиуретан, төмен тығыздықты полиэтилен (ТПЭ), полигидроксиалканаттар және басқа да биологиялық ыдырайтын пластмассалар сияқты басқа полимерлермен салыстырғанда, ПЭТ-тің микробтық ыдырауына бағытталған зерттеулер салыстырмалы түрде аз (Sangale, 2012; Sangeetha Devi et al., 2015). Сондықтан, бұл зерттеуде геотермалдық орта ПЭТ-ны ыдырату белсенділігі бар термофильді микроорганизмдердің көзі ретінде зерттелді.

Нәтижесінде, Жаркент аймағындағы геотермалдық бұлақтардан он алты термофильді бактериялық изолят сәтті алынды, олардың көпшілігі сулы ортадан шыққан (1-сурет).

Изоляттар оқшаулау көздеріне қарай жіктелді: W-DP (Терең геотермалдық су), W-SP (жазық бассейн суы), SED (жазық бассейндердің түнбасы) және S (жақын топырақ аумақтары) (2-сурет).

Таралу нәтижелері судан алынған изоляттардың айтарлықтай көп екенін көрсетеді, 16 изоляттың 9-ы (56%) сулы ортадан шыққан, бұл ыстық бұлақтардағы бай термофильді қауымдасстықты көрсетеді. Алдыңғы зерттеулер геотермалдық ортада әртүрлі пластикті ыдырататын микробтардың (ыстық бұлақтар, желдеткіштер және т.б.) мекендейтінін растайды, сондықтан бұл қуыстардан оқшаулау жаңа ыдыратушыларды табу ықтималдығын арттырады (Yuan et al., 2025).

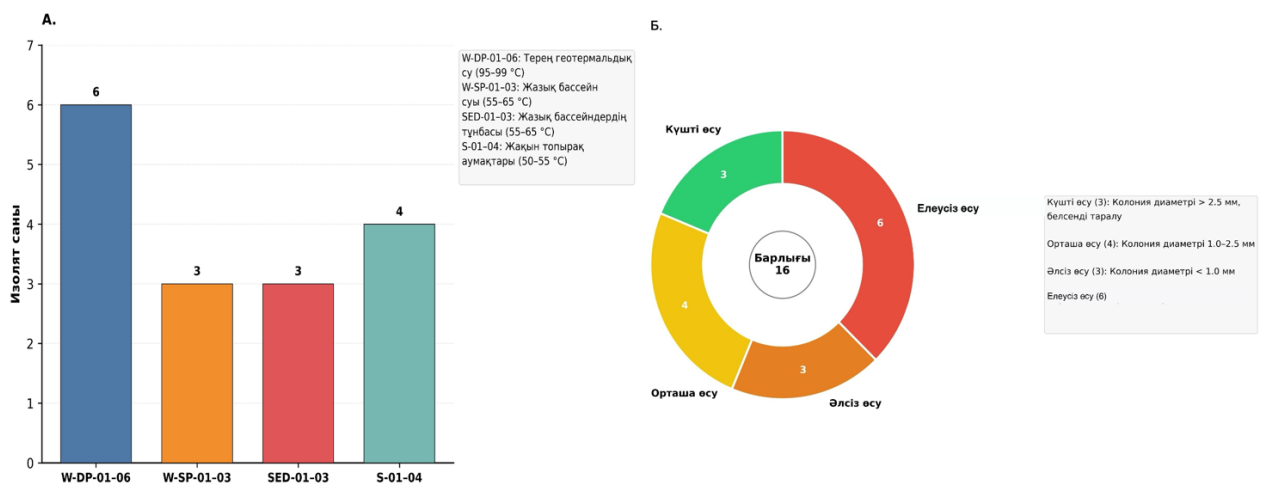
**1-сурет**

Қазақстандағы Жаркент (Алматы облысы) ауданындағы геотермалдық ыстық су көзі



**2-сурет**

Геотермалдық бұлақтардан алынған термофильді бактериялардың оқшаулау көздері (А) және ПЭТ-ыдырау әлеуетін алдын ала бағалау (В)



Колония морфологиясын талдау әртүрліліктің кең ауқымын көрсетті: ең жиі кездесетін колония түсі – ақ (7 изолят), одан кейін сары (5 изолят) және қоңыр-сары (4 изолят). Колониялардың өлшемдері, биіктіктері, жиектері және беткі текстуралары түгелдей әртүрлі екенін байқауға болады. Микроскопиялық сипаттама негізінде 12-сі грамоң (95%), ал 4-уі грамтеріс (25%) бактерия болды; таяқша тәрізді морфологияның орташа басымдығы (87%) байқалды. Грамоң таяқшалар эндоспора түзді және олар не түнбада (62%), не жоғары температуралы су изоляттары арасында (81%) басым болды.

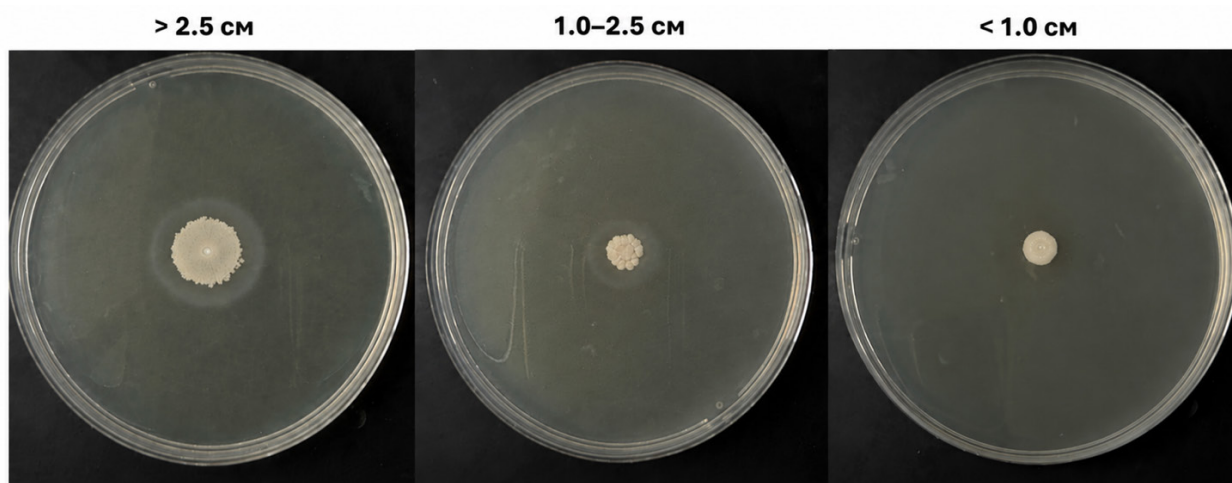
Изоляттар бактерия колонияларының өсу диаметрі бойынша деградация тиімділігіне бағаланды, бұл бұрын Hussein A. және т.б. (2019; Huang et al., 2022; Long et al., 2022) сипаттағандай. (Hussein et al., 2015). Олардың ішінде он

изолят PET құрамындағы қоректік ортасы бар табақшаларда жақсы өсіп шықты.

Осы пластикті субстраттармен немесе олардың үстінде қолдануға әлеуетін көрсетті (2, 3-суреттер). Үш оқшаулау (үш резервуардың әрқайсысынан біреуден) ұзартылған, айқын колониялармен мықты өсу көрсетті, ал төртеуі орташа өсу көрсетті. Үшеуі әлсіз болып аяқталды және бесеуі айтарлықтай өсу көрсетпеді, бұл PET-ден алынған қосылыстардың жағдайында қоспаланбайтынын, яғни жарамсыз екенін меңзейді. Бұл таңдау жалпы гидролитикалық ферменттік жүйелердің талаптарына байланысты болуы мүмкін: олар эфирлік байланыстары бар полимерлерді ыдырата алатындықтан, жоғары температура мен қоректік орта аз болған жағдайларда анағұрлым күрделі органикалық қосылыстарды және/немесе жасушадан тыс субстраттарды пайдалана алуы мезгілде таңдауы мүмкін.

### 3-сурет

0,1% (w/v) ПЭТ бар қатты минералды тұзды ортада өкілдік изоляттардың бактериялық өсуі



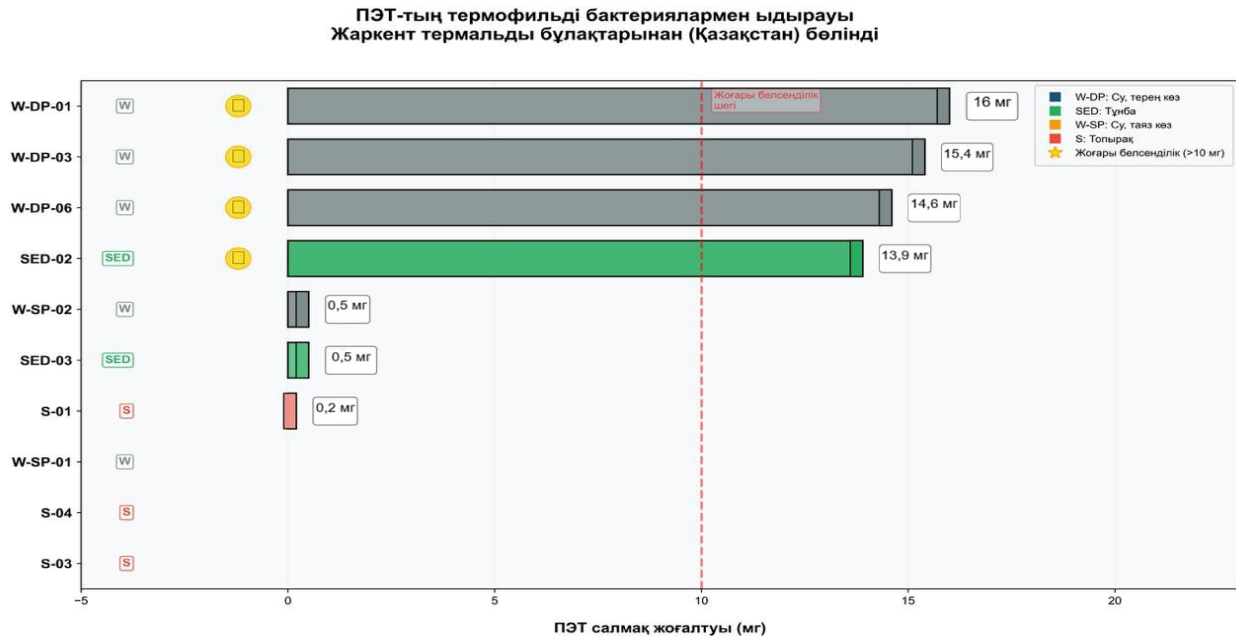
Өсу күшті (колония диаметрі > 2,5 см), орташа (1,0–2,5 см), әлсіз (< 1,0 см) және анықталмайтын өсу (ND) болып жіктелді.

Сандық тестілеу үшін таңдалған 10 термофильді изоляттың ішінде тек төртеуі ғана ПЭТ-нің айқын ыдырауын көрсетті ( $p < 0,05$ ), салмақ жоғалту мәндері 28 күн ішінде 13,9-дан

16,0 мг-ға дейін болды (4-сурет). Ең белсенді изоляттар терең геотермалдық су (W-DP) және жазық бассейндердің түнбасы (SED) үлгілерінен алынған.

4-сурет

Термофильді бактериялық изоляттармен инкубациядан кейін ПЭТ салмағының төмендеуі



Терең геотермалдық сулардың (95–99°C) экстремалды жағдайлары баяу ыдырайтын органикалық полимерлерден қоректік заттарды жинауға арналған берік және тұрақты гидроликалық ферменттік жүйелері бар микробтық консорциумдарға күшті селективті қысым көрсетуі мүмкін. Бұл экологиялық бейімделу мұндай изоляттардың ПЭТ сияқты синтетикалық полиэфирлерге шабуылына бағытталуы мүмкін.

Термофильді микробтық және ферменттік жүйелер жоғары температурада полимер тізбегінің қозғалғыштығын және ферменттік каталитикалық тиімділігін арттыру арқылы ПЭТ гидролизін айтарлықтай жақсартады. Мысалы, инженерлік термофильді жүйелердің дәстүрлі мезофильді ПЭТазалармен салыстырғанда 60–70°C температурада жоғары ыдырау жылдамдығына қол жеткізетіні көрсетілген, олар әдетте тұрақтылық үшін төмен температураны қажет етеді (Yan et al., 2021). Кутиназа және эстераза сияқты термофильді ферменттер әсіресе перспективалы, себебі олар ПЭТ-тің шыны өтпелі температурасына жақын термиялық жағдайлар-

да эфирлік байланыстарды тиімдірек үзе алады (Kawai, 2021). Жақында жүргізілген зерттеулер термофильді микроорганизм-фермент жүйесінің ПЭТ қалдықтарын жоғары жүктемелер мен жоғары температура кезінде толығымен ыдырата алатынын көрсетті, бұл зертханалық сынақтардан тыс термофильді биоыдырау қолданудың жоғары әлеуетін көрсетеді (Ян және т.б., 2024). Жоғары температурадағы ПЭТ ыдырауының артықшылықтары ферменттердің термиялық тұрақтылығынан тысқары. Мұндай жағдайларда полимердің физикалық және құрылымдық қасиеттерінің өзгеруі, каталитикалық жылдамдықтың жоғарылауы және субстраттар мен ыдырау өнімдерінің диффузиясының жоғарылауы төмен температуралы жүйелермен салыстырғанда ПЭТ деполимерленуінің тиімдірек болуына ықпал етеді (Атанасова және т.б., 2021).

Биохимиялық сипаттама үшін ең жоғары ыдырау тиімділігін көрсететін ПЭТ масса жоғалту талдауы негізінде төрт термофильді изолят (W-DP-01, W-DP-03, W-DP-06, SED-02) таңдалды.

5-сурет

ПЭТ-ді ыдырататын ең тиімді термофильді изоляттардың биохимиялық сипаттамалары

**Бактериялық штаммдардың биохимиялық профильдері**

	W-DP-01	W-DP-03	W-DP-06	SED-02
Грам бояуы	●	●	●	●
Жасуша морфологиясы	таяқша	таяқша	таяқша	таяқша
Эндоспора түзуі	●	●	●	●
Каталаза	●	●	●	●
Оксидаза	●	●	●	●
Желатин гидролизі	■	■	■	■
Крахмал гидролизі	●	▲	●	●
Казеин гидролизі	●	●	●	▲
Уреаза	■	■	■	■
Цитратты пайдалану	●	●	●	●

Нәтижелер

- Оң
- ▲ Әлсіз
- Теріс

Ең тиімді төрт изоляттың биохимиялық сипаттамасы аэробты метаболизмді қолдайтын тұрақты каталаза және оксидаза белсенділігі бар грам-позитивті, спора түзетін таяқшаларды көрсетті. Олардың крахмал мен казеинді гидролиздеу қабілеті полимердің ыдырау белсенділігімен танымал көптеген термофильді бактерияларға тән қасиет – жасушадан тыс гидролитикалық ферменттердің күшті өндірілуін көрсетеді. Бұл ферменттер, әсіресе жасушадан тыс эстеразалар және кутиназа тәрізді гидролаздар, ПЭТ-те беттік эрозияны бастауда механикалық тұрғыдан маңызды, бұл мономердің бөлінуіне және полимердің ішінара ыдырауына әкеледі (Benavides Fernández et al., 2022). Жалпы алғанда, байқалған фенотиптік және биохимиялық профиль Бергей нұсқаулығына сәйкес, метаболикалық әмбебаптығы және жасушадан тыс ферменттердің өндірілуімен танымал топ *Bacillus* тұқымдасына жататынын көрсетеді. Бұл бақылау ПЭТ-мен байланысты биодеграда-

циялық талдауларға *Bacillus* түрлерінің қатысуы туралы есеп берген бұрынғы зерттеулерге сәйкес келеді (Zeng et al., 2023; Dhaka et al., 2025; Khalil et al., 2025). Сонымен қатар, термофильді *Bacillus* штамдары полиэтилен (ПЭТ), төмен тығыздықты полиэтилен (ТППЭ) және жоғары тығыздықты полиэтилен (ЖТПЭ) сияқты басқа синтетикалық полимерлерді ыдырату қабілетімен танымал Dang et al., 2018; Zahari et al., 2025), бұл осы тұқымның кеңірек, бірақ әлі де жеткіліксіз сипатталған полимерді ыдырату әлеуетін көрсетеді.

**Қорытынды**

Бұл зерттеу Қазақстандағы Жаркент геотермалдық бұлақтарынан әртүрлі термофильді бактерияларды сәтті бөлініп алынды. Оқшауланған штаммдар жоғары температуралық ортада (ашық бассейндерден алынған терең геотермалдық су және шөгінді) барынша жоғары

белсенділік көрсетті, бұл термотөзімділік пен полимерлерді гидролиздеу қабілетінің әлеуеті арасындағы экологиялық байланысты меңзейді. Олар жасушадан тыс гидролитикалық ферменттер өндірумен сипатталатын биохимиялық профильге ие.

Бақыланған салмақтың кемуі (28 күн ішінде 13,9–16,0 мг) үміт күттіретін бастапқы нәтиже болды, бірақ келесі қадамдар мыналарды қамтиды: 1) 16S rRNA генін секвенирлеу арқылы ең жақсы нәтиже көрсеткен окшауланымдарды молекулалық анықтау; 2) бөлінетін жауапты арнайы ферменттерді сипаттау; және 3) ыдырау жағдайларын оңтайландыру (мысалы, рН, температура, ПЭТ-ті алдын ала өңдеу); және 4) ПЭТ мономерлерінің бөлінуін растау үшін ыдырау өнімдерін талдау. Бұл жергілікті термофильді ыдыратқыштардың ашылуы Қазақстанда және одан тыс жерлерде пластикалық қалдықтарды

басқару үшін тұрақты, биотехнологиялық шешімдерді әзірлеу үшін жаңа жол ашады.

### Қаржыландыру

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және Жоғары Білім Министрлігінің Ғылым Комитеті қаржыландырды (Грант №. АР26196959).

### Авторлардың үлесі

Жантлесова С.Д.: Концептуализация, Жобаны басқару, Ресми талдау, Әдістеме, Бақылау, Мақаланың бастапқы нұсқасын жазу; Мусабеков Ж.Т.: Зерттеу, Деректерді өңдеу; Хамитқызы Ж.: Зерттеу, Ресурстармен қамтамасыз ету; Талипова А.Б.: Нәтижелерді тексеру, Көрнекі материалдар дайындау; Кистаубаева А.С.: Концептуализация, Қаржыландыру, Бақылау, Мәтінді редакциялау және толықтыру.

### Әдебиеттер

- Arnal, G., Anglade, J., Gavalda, S., Tournier, V., Chabot, N., Bornscheuer, U. T., Weber, G., & Marty, A. (2023). Assessment of four engineered PET degrading enzymes considering large-scale industrial applications. *ACS Catalysis*, 13(20), 13156–13166. <https://doi.org/10.1021/acscatal.3c02922>
- Atanasova, N., Stoitsova, S., Paunova-Krasteva, T., & Kambourova, M. (2021). Plastic degradation by extremophilic bacteria. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(11), 5610. <https://doi.org/10.3390/ijms22115610>
- Benavides Fernández, C. D., Guzmán Castillo, M. P., Quijano Pérez, S. A., & Carvajal Rodríguez, L. V. (2022). Microbial degradation of polyethylene terephthalate: A systematic review. *SN Applied Sciences*, 4(10), 263. <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05143-4>
- Benyathiar, P., Kumar, P., Carpenter, G., Brace, J., & Mishra, D. K. (2022). Polyethylene terephthalate (PET) bottle-to-bottle recycling for the beverage industry: A review. *Polymers*, 14(12), 2366. <https://doi.org/10.3390/polym14122366>
- Boschi, A., Scieuzo, C., Salvia, R., Arias, C. F., Perez, R. P., Bertocchini, F., & Falabella, P. (2024). Beyond microbial biodegradation: Plastic degradation by *Galleria mellonella*. *Journal of Polymers and the Environment*, 32(5), 2158–2177. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-03084-6>
- Chaudhary, H. D., Shah, G., Bhatt, U., Singh, H., & Soni, V. (2025). Microplastics and plant health: A comprehensive review of sources, distribution, toxicity, and remediation. *npj Emerging Contaminants*, 1(8). <https://doi.org/10.1038/s44454-025-00007-z>
- Ciric, M., & Šaraba, V. (2025). Plastic bioremediation potential of groundwater microbiomes. *Biotechnology for the Environment*, 2(1), 18. <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00031-8>
- Dang, T. C. H., Nguyen, D. T., Thai, H., Nguyen, T. C., Hien Tran, T. T., Le, V. H., Nguyen, V. H., Tran, X. B., Thao Pham, T. P., Nguyen, T. G., et al. (2018). Plastic degradation by thermophilic *Bacillus* sp. BCBT21 isolated from composting agricultural residual in Vietnam. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 9(1), 015014. <https://doi.org/10.1088/2043-6254/aaabaf>
- Dhaka, V., Singh, S., Rao, R., Garg, S., Samuel, J., Khan, N. A., Ramamurthy, P. C., & Singh, J. (2025). Statistical optimization of process variables for improved poly(ethylene terephthalate) plastic degradation by a rhizospheric bacterial consortium. *Scientific Reports*, 15(1), 14813. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99286-2>
- Hussein, A. A., Al-Mayaly, I. K., & Kudier, S. H. (2015). Isolation, screening and identification of low density polyethylene (LDPE) degrading bacteria from contaminated soil with plastic wastes. *Mesopotamia Environment Journal*, 1, 1–14.
- Kawai, F. (2021). The current state of research on PET hydrolyzing enzymes available for biorecycling. *Catalysts*, 11(2), 206. <https://doi.org/10.3390/catal11020206>
- Khalil, K., Mohamad Desa, A. L., Ruslan, N. A., Mohd Yasin, N. H., Anuar, F. H., & Aqma, W. S. (2025). Evaluation of *Bacillus*-associated polyethylene terephthalate (PET) surfaces for biodegradation. *Malaysian Applied Biology*, 54(2), 19–27. <https://doi.org/10.55230/mabjournal.v54i2.2822>
- Kwan, S. (2025). Study highlights plastic waste challenges in Kazakhstan. *The Times of Central Asia*. <https://timesca.com/study-highlights-plastic-waste-challenges-in-kazakhstan/>
- Mashzhan, A., Javier-López, R., Kistaubayeva, A., Savitskaya, I., & Birkeland, N.-K. (2021). Metagenomics and culture-based diversity analysis of the bacterial community in the Zharkent geothermal spring in Kazakhstan. *Current Microbiology*, 78(8), 2926–2934. <https://doi.org/10.1007/s00284-021-02554-7>
- Ortega-Villar, R., Escalante, A., Astudillo-Melgar, F., Lizárraga-Mendiola, L., Vázquez-Rodríguez, G. A., Hidalgo-Lara, M. E., & Coronel-Olivares, C. (2024). Isolation and characterization of thermophilic bacteria from a hot spring in the State of Hidalgo, Mexico, and geochemical analysis of the thermal water. *Microorganisms*, 12(6), 1066. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12061066>

- Sangale, M. K. (2012). A review on biodegradation of polythene: The microbial approach. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, 3(10), 1000164. <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000164>
- Sangeetha Devi, R., Rajesh Kannan, V., Nivas, D., Kannan, K., Chandru, S., & Robert Antony, A. (2015). Biodegradation of HDPE by *Aspergillus* spp. from marine ecosystem of Gulf of Mannar, India. *Marine Pollution Bulletin*, 96(1–2), 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.05.050>
- Schulte, M. L., & Busch, P. (2024). Plastic policies in Kazakhstan. *The SWITCH-Asia Programme*. [https://www.switch-asia.eu/site/assets/files/4388/plastic\\_policies\\_kz\\_final.pdf](https://www.switch-asia.eu/site/assets/files/4388/plastic_policies_kz_final.pdf)
- Tournier, V., Topham, C. M., Gilles, A., David, B., Folgoas, C., Moya-Leclair, E., Kamionka, E., Desrousseaux, M.-L., Texier, H., Gavaldà, S., et al. (2020). An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles. *Nature*, 580(7802), 216–219. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2149-4>
- Venkatachalam, S., Nayak, S. G., Labde, J. V., Gharal, P. R., Rao, K., & Kelkar, A. K. (2012). Degradation and recyclability of poly(ethylene terephthalate). In *Polyester* (p. 107). InTech. <https://doi.org/10.5772/48612>
- Volume of sorted waste in Kazakhstan increased by less than 1% within year. (2025). Kazakh Telegraph Agency. <https://kaztag.kz/en/news/volume-of-sorted-waste-in-kazakhstan-increased-by-less-than-1-within-year>
- Yan, F., Wei, R., Cui, Q., Bornscheuer, U. T., & Liu, Y. (2021). Thermophilic whole-cell degradation of polyethylene terephthalate using engineered *Clostridium thermocellum*. *Microbial Biotechnology*, 14(2), 374–385. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13580>
- Yan, Z.-F., Feng, C.-Q., Zhou, J.-Q., Huang, Q.-S., Chen, X.-Q., Xia, W., & Wu, J. (2024). Complete degradation of PET waste using a thermophilic microbe-enzyme system. *International Journal of Biological Macromolecules*, 260(3), 129538. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129538>
- Yang, Y., Qiu, J., Zhang, H., He, P., & Lü, F. (2025). How soon will landfilled plastics integrate into the geological carbon cycle? *Environmental Science and Ecotechnology*, 26, 100590. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2025.100590>
- Yuan, Z., Lv, R., Gudda, F., Mosa, A., Oleszczuk, P., Minkina, T., Gao, Y., & Tang, L. (2025). Impacts of high temperatures on microbial degradation of microplastics and strategies for optimization. *New Contaminants*, 1, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.newcon.2025.100003>
- Zahari, N. Z., Mei, L. Y., Kanapia, N. N., Yatim, A. N. M., Makmud, M. Z., & Rahman, A. B. A. (2025). Isolation and application of the thermophilic strain (*Bacillus cereus*) for plastic degradation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1489(1), 012017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1489/1/012017>
- Zeng, C., Ding, F., Zhou, J., Dong, W., Cui, Z., & Yan, X. (2023). Biodegradation of poly(ethylene terephthalate) by *Bacillus safensis* YX8. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(22), 16434. <https://doi.org/10.3390/ijms242216434>
- Zeng, W., Li, X., Yang, Y., Min, J., Huang, J.-W., Liu, W., Niu, D., Yang, X., Han, X., Zhang, L., et al. (2022). Substrate-binding mode of a thermophilic PET hydrolase and engineering the enzyme to enhance the hydrolytic efficacy. *ACS Catalysis*, 12(5), 3033–3040. <https://doi.org/10.1021/acscatal.1c05800>

**Авторлар туралы мәлімет:**

Жантлессова Сирина Дүйсеновна (корреспонденттік автор) – PhD, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ-дың аға ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: [sirina.zhantlessova@mail.ru](mailto:sirina.zhantlessova@mail.ru)).

Мусабеков Журабек Турдыбекұлы – PhD студент, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ-дың ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан).

Хамитқызы Жазира – магистр, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ-дың ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан).

Талипова Айжан Берікқызы – PhD, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ-дың аға ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан).

Кистаубаева Аида Сериковна – биология ғылымдарының кандидаты, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ-дың профессоры (Алматы, Қазақстан).

**Information about the authors:**

Zhantlessova Sirina Duissenovna (corresponding author) – PhD, senior researcher at Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: [sirina.zhantlessova@mail.ru](mailto:sirina.zhantlessova@mail.ru)).

Mussabekov Zhurabek Turdybekuly – PhD student, researcher at Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan).

Khamitkyzy Zhazira – master’s degree, researcher at Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan).

Talipova Aizhan Berikovna – PhD, senior researcher at Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan).

Kistaubayeva Aida Serikovna – candidate of biological sciences, professor at Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan).

**Сведения об авторах:**

Жантлессова Сирина Дүйсеновна (корреспондентный автор) – PhD, старший научный сотрудник КазНУ имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: [sirina.zhantlessova@mail.ru](mailto:sirina.zhantlessova@mail.ru)).

Мусабеков Журабек Турдыбекұлы – PhD студент, научный сотрудник КазНУ имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан).

Хамитқызы Жазира – магистр, научный сотрудник КазНУ имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан).

Талипова Айжан Берікқызы – PhD, старший научный сотрудник КазНУ имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан).

Кистаубаева Аида Сериковна – кандидат биологических наук, профессор КазНУ имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан).

Келіп түсті: 3 желтоқсан 2025 жыл  
Қабылданды: 15 маусым 2026 жыл

5-бөлім  
**ЭКОЛОГИЯ**

---

Section 5  
**ECOLOGY**

---

Раздел 5  
**ЭКОЛОГИЯ**

Е.Х. Мендыбаев<sup>1</sup> , С.У. Зуфаров<sup>1</sup> ,  
Г.А. Гатаулина<sup>1</sup> , М.Ж. Шарипова<sup>2\*</sup> 

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

<sup>2</sup>Международный университет Астана, Астана, Казахстан

\*e-mail: moldirzhumagul@gmail.com

## ОЦЕНКА УГЛЕРОДНОГО БАЛАНСА НА ОСНОВЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДУКТИВНОСТИ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ СТЕПНЫХ ЭКОСИСТЕМ АКМОЛИНСКОЙ ОБЛАСТИ

Степные экосистемы Акмолинской области являются критически важным компонентом регионального углеродного цикла, выполняя функцию значимого резервуара органического углерода. Однако их поглотительная способность подвержена сильным флуктуациям в зависимости от типа растительности и климатических условий. Целью данного исследования стала комплексная количественная оценка основных составляющих углеродного баланса на основе исследования биологической продуктивности – чистой первичной продукции (NPP) и гетеротрофного дыхания (Rh). Полевые работы были проведены в течение вегетационного сезона 2025 года на территории 25 стационарных мониторинговых участков в пяти административных районах (Егіндыкольский, Аккольский, Ерейментауский, Есильский, Атбасарский). Методология базировалась на методе «минимальных оценок» А.А. Титляновой, включающем ежемесячный учет фракций надземной и подземной биомассы. Установлено, что продукционные процессы характеризуются высокой пространственной неоднородностью: максимальная продуктивность зафиксирована в мезофитных сообществах Есильского района. В засушливых условиях (Атбасарский район) выявлена адаптивная стратегия, при которой основная часть углерода депонируется в корнях. Результаты подтверждают, что в условиях влажной весны 2025 года все исследованные экосистемы выступали в роли стока углерода, секвестрируя от 1,65 до 6,42 т CO<sub>2</sub>-экв/га/год. Исследование подчеркивает необходимость учета корневой продукции при моделировании климата.

**Ключевые слова:** чистая экосистемная продукция, углеродный баланс, сухая степь, Акмолинская область, динамика биомассы, чистая первичная продукция, корневая мортмасса.

Y.N. Mendybayev<sup>1</sup>, S.U. Zufarov<sup>1</sup>, G.A. Gataulina<sup>1</sup>, M.Zh. Sharipova<sup>2\*</sup>

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

<sup>2</sup>Astana International University, Astana, Kazakhstan

\*e-mail: moldirzhumagul@gmail.com

### Assessment of the carbon balance based on the determination of the productivity of plant communities of steppe ecosystems of the Akmola region

The steppe ecosystems of the Akmola Region are a critically important component of the regional carbon cycle, serving as a significant reservoir of organic carbon. However, their carbon sequestration capacity is subject to significant fluctuations depending on vegetation type and climatic conditions. The aim of this study was to conduct a comprehensive quantitative assessment of the main components of the carbon balance based on an analysis of biological productivity – net primary production (NPP) and heterotrophic respiration (Rh). Fieldwork was conducted during the 2025 growing season at 25 permanent monitoring sites in five administrative districts (Egindykol, Akkol, Erementau, Esil, and Atbasar). The methodology was based on A.A. Titlyanova's "minimum estimates" method, which involves monthly accounting of aboveground and belowground biomass fractions. It was established that productivity processes are characterized by high spatial heterogeneity: maximum productivity was recorded in the mesophytic communities of the Esil District. Under arid conditions (Atbasar District), an adaptive strategy was identified in which the majority of carbon is stored in the roots. The results confirm that during the wet spring of 2025, all studied ecosystems acted as carbon sinks, sequestering between 1.65 and 6.42 t CO<sub>2</sub>-eq/ha/year. The study highlights the need to account for root production in climate modeling.

**Keywords:** net ecosystem production, carbon balance, dry steppe, Akmola region, biomass dynamics, net primary production, root necromass.

Е.Х. Мендыбаев<sup>1</sup>, С.У. Зуфаров<sup>1</sup>, Г.А. Гатаулина<sup>1</sup>, М.Ж. Шарипова<sup>2\*</sup>

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

<sup>2</sup>Астана халықаралық университеті, Астана, Қазақстан

\*e-mail: moldirzhumagul@gmail.com

### Ақмола облысының дала экожүйелерінің өсімдік қауымдастықтарының өнімділігін анықтау негізінде көміртегі теңгерімін бағалау

Ақмола облысының дала экожүйелері аймақтық көміртегі айналымының маңызды құрамдас бөлігі және органикалық көміртегінің елеулі резервуары болып табылады. Алайда, олардың көміртегін сіңіру қабілеті өсімдік жамылғысының түрі мен климаттық жағдайларға байланысты айтарлықтай ауытқиды, бұл парниктік газдар динамикасын болжауды қиындатады. Зерттеудің мақсаты – биологиялық өнімділікті (NPP) және топырақтың гетеротрофты тыныс алуын (Rh) егжей-тегжейлі зерттеу негізінде таза экожүйелік өнімділікті (NEP) кешенді сандық бағалау. Далалық жұмыстар 2025 жылғы вегетациялық кезеңде бес ауданда (Егіндікөл, Аққөл, Ереймен-тау, Есіл, Атбасар) орналасқан 25 мониторингтік учаскеде жүргізілді. Әдістеме жерүсті және жерасты биомасса фракцияларын есепке алатын А.А. Титлянованың әдісіне негізделген. Зерттеу өнімділік процестерінің айқын кеңістіктік біртекті еместігін көрсетті: таза бастапқы өнім (NPP) ксерофитті қауымдастықтардағы 7,38 т/га-дан мезофитті далалардағы 15,78 т/га-ға дейін ауытқыды. Атбасар ауданының құрғақ жағдайында өсімдіктердің көміртегін негізінен тамыр жүйесінде жинақтауға бейімделген стратегиясы анықталды. 2025 жылғы қолайлы гидротермиялық жағдайларда барлық зерттелген экожүйелер көміртегінің таза сіңіргіші (net sink) ретінде жұмысы орташа есеппен жылына 3,48 т CO<sub>2</sub>-экв/га сіңіргені анықталды. Жылдық NPP-дің 40%-ға жуығы тамыр өлімассасы түрінде жинақталатыны және минералданудың баяу қарқынына байланысты ұзақ мерзімді көміртегі резервін құрайтыны дәлелденді. Зерттеу нәтижелері ұлттық парниктік газдардың кадастрын түзетуге және климаттың өзгеруіне бейімделу стратегияларын әзірлеу үшін маңызды.

**Түйін сөздер:** таза экожүйелік өнім, көміртегі теңгерімі, құрғақ дала, Ақмола облысы, биомасса динамикасы, таза бастапқы өнім, тамыр өлімассасы.

### Введение

В современных условиях прогрессирующей глобальной климатической нестабильности и необходимости реализации международных соглашений по достижению углеродной нейтральности, точная количественная оценка углеродного цикла наземных экосистем выступает приоритетной задачей для Республики Казахстан. Согласно последним аналитическим данным Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), концентрация парниковых газов в атмосфере достигла беспрецедентных значений (Lee et al., 2023). Это требует принятия экстренных мер не только в сфере сокращения промышленных выбросов, но и в направлении усиления естественной поглощательной способности природных биомов.

Травяные экосистемы, охватывающие степи, прерии и саванны, занимают около 40% площади суши (без учета ледниковых покровов) и выступают гигантским резервуаром, содержащим от 20 до 30% мировых запасов почвенного органического углерода (Jobbágy & Jackson, 2000; Scurlock et al., 1998). В отличие от лесов, где основной пул углерода сосредоточен в наземной

древесине и легко высвобождается при пожарах, степи аккумулируют органическое вещество преимущественно в почвенном профиле и мощных корневых системах. Это делает их исключительно надежными долгосрочными хранилищами углерода. Для Казахстана, чьи степные ландшафты занимают более 180 млн га, объективное понимание потенциала секвестрации CO<sub>2</sub> этими территориями является важнейшим аспектом экологической безопасности и стратегического планирования в рамках перехода к безуглеродной экономике к 2060 году (Batjes et al., 2016; Squires & Qi., 2017).

Традиционно степные зоны Евразии рассматривались как устойчивые системы с положительным углеродным балансом. Однако новейшие полевые данные свидетельствуют об их высокой уязвимости к нарастающей аридизации климата, процессам деградации почв и антропогенному давлению, такому как масштабная распашка и нерегулируемый перевыпас скота (Vitkovskaya et al., 2026; Eisfelder, 2013). Специфика сухих степей Северного Казахстана кроется в резко континентальном климате с экстремальными температурными перепадами и дефицитом влаги, что порождает высокую про-

странственную мозаичность растительности. Использование стандартных усредненных коэффициентов МГЭИК для расчета национального углеродного баланса в данном регионе регулярно приводит к существенным систематическим погрешностям. Глобальные модели просто не способны корректно учитывать локальные особенности накопления корневой биомассы и специфику разложения мертвого органического вещества в засушливой среде (Lal, 2018; Kerven et al., 2021).

Оценка углеродного цикла в травяных биотопах остается предметом острых научных дискуссий. Огромный научный вклад в исследование продуктивности евразийских степей принадлежит школе А.А. Титляновой. Именно ею был концептуализирован и апробирован метод «минимальных оценок», дающий возможность вычислять продукцию с учетом скорости обновления различных фракций биомассы – от живой зелени и ветоши до подстилки и корней. Было доказано, что если не учитывать процессы отмирания и минерализации растительных остатков в течение вегетации, реальная продукция степей будет недооценена в полтора-два раза (Waheed et al., 2025; Zhu et al., 2022). Эта методика по сей день признается эталоном в полевой синэкологии и послужила фундаментом для нашей работы.

Зарубежные публикации последних лет уделяют пристальное внимание влиянию изменения климата на газообмен степей. Масштабные работы на трансектах через Центральную Азию выявили разнонаправленные тренды секвестрации: если мезофитные степи при достаточном увлажнении реагируют на потепление ростом продуктивности, то сухие степи и полупустынные зоны стремительно теряют углерод из-за температурного стресса и прогрессирующих засух (Buras et al., 2020; Abd-Elrahman et al., 2024). Ряд авторов также отмечает колоссальную пространственно-временную изменчивость нетто-продуктивности (NEP), где главным драйвером выступают атмосферные осадки первой половины лета (Niu et al., 2008; Chapin III et al., 2011). Данный аспект имеет особую значимость для интерпретации наших результатов, поскольку 2025 год отличился аномальным распределением влаги.

Главной методологической трудностью при мониторинге газообмена в степях остается «невидимый пул» – подземная часть растений. По оценкам исследователей, до 70–80% чистой пер-

вичной продукции (NPP) может уходить именно в корневую систему (WANG et al., 2012; Pausch & Kuzyakov, 2018). Это обстоятельство делает методы дистанционного зондирования (индексы NDVI) лишь вспомогательными инструментами, поскольку космические снимки улавливают только надземную зеленую массу, но не способны измерить прирост корней, протекающий асинхронно (Smith, 2014). Следовательно, прямой полевой мониторинг всех фракций органического вещества на протяжении всего сезона является критически важным.

Цель нашего исследования – комплексная инструментальная оценка чистой экосистемной продукции (NEP) на основе детального изучения динамики биомассы в основных степных сообществах Акмолинской области.

### Материалы и методы исследования

В данном разделе представлены методы и методологические установки, позволившие раскрыть содержание темы и решить поставленную проблему. Сбор эмпирического материала осуществлялся в течение полного вегетационного сезона 2025 года (с мая по октябрь) на территории Акмолинской области Республики Казахстан (подзона сухих типчаково-ковыльных степей). Для проведения комплексного мониторинга была развернута сеть из 25 репрезентативных стационарных площадок в пяти административных районах с различной степенью аридности климата: Есильском, Егиндыкольском, Атбасарском, Аккольском и Ерейментауском.

Отбор укусов растительности производился ежемесячно. Для нивелирования влияния микро-мозаичности покрова пробы на каждой площадке срезались в 5-кратной повторности (учетная рамка 20x20 см). В лабораторных условиях надземная масса фракционировалась на зеленую фитомассу (G), ветошь (S) и подстилку (L). Подземная сфера исследовалась методом почвенных монолитов (бурение на глубину до 30 см), корни отмывались и разделялись на живые (R) и мертвые (V). Растительные образцы высушивались при 65 °С до достижения абсолютно сухого веса (Meier & Leuschner, 2008).

Чистая первичная продукция (NPP) рассчитывалась по методу «минимальных оценок» (Zhu et al., 2022). Интенсивность гетеротрофного дыхания (Rh) оценивалась расчетным путем на базе скорости убыли массы подстилки и подземной мортмассы. Для специфических условий су-

хих степей Акмолинской области мы применили научно обоснованные коэффициенты минерализации:  $k = 0,003 \text{ сут}^{-1}$  для надземной подстилки и  $k = 0,0015 \text{ сут}^{-1}$  для корневой мортмассы (Parton et al., 1993). Применение данных коэффициентов продиктовано их высокой точностью для резко континентального аридного климата, где микробиологическая деструкция органики серьезно лимитируется дефицитом почвенной влаги.

Поскольку в контуре нашей работы не изменялись сторонние потоки углерода (эрозия, вынос органики), итоговый баланс оценивался через показатель чистой экосистемной продукции (NEP) в единицах CO<sub>2</sub>-эквивалента по формуле:  $NEP = (NPP - Rh) \times 0,45 \times 3,67$ .

Статистическая обработка экспериментального материала проводилась согласно общепринятой методике полевого опыта Б.А. Доспехова. Для каждого исследуемого параметра вычислялась средняя арифметическая величина. Оценка существенности пространственно-временных

различий между районами осуществлялась с применением t-критерия Стьюдента с использованием программного пакета Statistica. Различия признавались статистически значимыми при  $p < 0,05$ .

### Результаты исследования и их обсуждение

*Сезонная динамика продукционных процессов и структура фитомассы.* Изучение пространственно-временного распределения растительного вещества выявило выраженную гетерогенность, напрямую зависящую от гидротермического градиента. В мезофитных сообществах пик накопления живой надземной массы пришелся на июнь, что было обусловлено обильными весенними осадками.

Для системного анализа внутрисезонной ритмики в Таблице 1 представлена усредненная динамика фракций по административным районам в разрезе месяцев.

**Таблица 1**

*Помесячная динамика структуры фитомассы по административным районам Акмолинской области (ц/га)*

Район / Месяц	Ф	В	П	Р	У	Р+У
<b>Есильский район</b>						
Май	117,2 ± 15,2	42,0 ± 5,1	66,4 ± 8,0	29,3 ± 3,8	46,9 ± 6,3	76,2 ± 9,6
Июнь	122,5 ± 15,9	37,0 ± 5,5	63,4 ± 10,4	31,2 ± 4,4	28,7 ± 5,9	64,0 ± 9,6
Июль	78,9 ± 6,6	43,6 ± 6,5	58,6 ± 9,0	28,4 ± 5,3	39,5 ± 4,3	69,2 ± 9,8
Август	70,0 ± 6,4	43,5 ± 9,6	58,0 ± 6,5	16,8 ± 2,0	43,1 ± 6,3	63,7 ± 9,8
Сентябрь	79,6 ± 7,7	28,0 ± 7,1	51,2 ± 9,8	20,0 ± 4,5	33,6 ± 7,5	55,5 ± 5,6
Октябрь	38,6 ± 8,4	26,3 ± 6,2	43,6 ± 11,4	8,7 ± 1,0	22,6 ± 4,7	33,3 ± 5,3
<b>Атбасарский район</b>						
Май	109,2 ± 9,9	38,2 ± 3,5	60,0 ± 5,6	29,3 ± 2,6	45,7 ± 4,2	75,0 ± 5,1
Июнь	104,5 ± 13,3	28,6 ± 1,8	62,5 ± 5,3	38,8 ± 3,5	26,9 ± 4,8	65,7 ± 4,8
Июль	61,6 ± 12,7	36,6 ± 5,7	57,7 ± 8,4	35,4 ± 5,1	28,7 ± 6,1	64,1 ± 6,8
Август	54,7 ± 11,4	26,4 ± 4,5	64,9 ± 7,0	15,8 ± 4,9	38,6 ± 6,3	54,4 ± 5,6
Сентябрь	58,7 ± 11,2	22,7 ± 3,6	56,5 ± 9,8	18,8 ± 4,7	28,6 ± 5,8	50,6 ± 3,8
Октябрь	27,0 ± 10,6	19,5 ± 6,9	47,2 ± 11,6	12,3 ± 1,7	24,1 ± 5,8	43,3 ± 6,4
<b>Егиндыкольский район</b>						
Май	128,7 ± 4,1	16,9 ± 2,8	15,5 ± 2,2	12,5 ± 5,1	12,6 ± 3,9	25,1 ± 9,0
Июнь	124,9 ± 2,6	17,3 ± 1,7	26,7 ± 0,4	10,7 ± 7,3	18,9 ± 7,3	29,6 ± 14,6
Июль	90,5 ± 2,8	29,7 ± 1,7	21,2 ± 1,5	6,2 ± 3,2	18,1 ± 8,3	24,3 ± 11,5

Продолжение таблицы

Район / Месяц	Ф	В	П	Р	V	R+V
Август	89,7 ± 2,8	18,2 ± 0,4	32,4 ± 0,4	5,3 ± 2,9	14,2 ± 2,5	19,5 ± 5,4
Сентябрь	69,7 ± 4,6	12,5 ± 0,2	19,3 ± 2,7	6,1 ± 4,2	11,2 ± 2,1	17,3 ± 6,3
Октябрь*	55,6 ± 5,2	13,8 ± 1,4	27,8 ± 3,1	7,6 ± 1,1	12,3 ± 2,0	19,9 ± 3,1
Аккольский район						
Май	77,3 ± 0,7	11,6 ± 0,1	35,5 ± 0,5	10,0 ± 0,1	15,5 ± 0,1	25,5 ± 0,3
Июнь	93,0 ± 0,8	9,1 ± 0,1	29,9 ± 0,4	12,4 ± 0,2	12,6 ± 0,2	25,0 ± 0,3
Июль	79,3 ± 0,7	20,1 ± 0,4	32,3 ± 0,4	11,7 ± 0,1	20,2 ± 0,2	31,9 ± 0,3
Август	65,3 ± 0,7	12,5 ± 0,2	34,8 ± 0,5	7,2 ± 0,1	14,6 ± 0,2	21,8 ± 0,3
Сентябрь	38,0 ± 0,5	11,3 ± 0,2	15,5 ± 0,3	9,5 ± 0,2	13,4 ± 0,2	22,9 ± 0,3
Октябрь	25,0 ± 0,4	9,7 ± 0,2	19,0 ± 0,3	4,7 ± 0,1	9,8 ± 0,2	14,5 ± 0,3
Ерейментауский район						
Май	122,5 ± 1,1	6,2 ± 0,5	11,9 ± 1,5	29,0 ± 0,7	24,0 ± 1,7	53,0 ± 1,1
Июнь	117,6 ± 3,1	9,2 ± 0,3	15,1 ± 2,3	23,3 ± 0,4	22,6 ± 2,8	45,9 ± 3,2
Июль	87,3 ± 2,2	10,2 ± 1,2	11,4 ± 3,9	22,6 ± 2,9	26,5 ± 2,4	49,1 ± 5,4
Август	77,5 ± 2,5	7,4 ± 0,5	17,7 ± 0,6	20,9 ± 0,5	23,8 ± 1,2	44,7 ± 2,0
Сентябрь	76,7 ± 1,0	8,3 ± 0,9	19,6 ± 0,8	14,2 ± 1,7	16,3 ± 0,8	30,5 ± 2,6
Октябрь	39,5 ± 5,2	13,7 ± 2,6	15,5 ± 1,5	9,5 ± 0,4	15,9 ± 0,4	25,4 ± 0,4

(Примечание\*: а) В Егиндыкольском районе в октябре полноценный учет фракций был возможен только на разрезе №2). б) Ф – зеленая масса, В – ветошь, П – подстилка, Р – живые корни, V – мертвые корни, R+V – суммарная подземная масса. Данные представлены в формате  $M \pm t$  (средняя арифметическая ± стандартная ошибка).

Закономерно, что усиление абиотического стресса к концу лета во всех районах приводило к экспоненциальному росту доли вещества, депонируемого в подземной мортмассе. Например, в типичных сухих степях Атбасарского района (разрез 1) при суммарной чистой первичной продукции (NPP) в 13,2 т/га, запас мертвых корней к осеннему периоду достигал 5,3 т/га. Доля органического вещества, перешедшего в детритный пул и законсервированного в виде корневых остатков, составила около 40% от всей годовой первичной продукции ( $5,3 / 13,2 \times 100 = 40\%$ ).

#### Нетто-экосистемная продукция (NEP) и углеродный баланс

Исходя из сезонной динамики приращений фракций биомассы (Таблица 1), нами была рассчитана итоговая годовая продукция (NPP) и гетеротрофное дыхание (Rh). В Таблице 2 представлены развернутые показатели углеродного

баланса строго по всем 25 исследованным разрезам с выведением средних значений для каждого района.

Данные подтверждают, что все исследованные типы экосистем функционировали как активные «стоки» атмосферного углерода. Эффективность секвестрации варьировала более чем в три раза: мезофитные степи Есильского района (в среднем 4,69 т CO<sub>2</sub>/га) продемонстрировали максимальный потенциал поглощения. В сухих степях Атбасарского района положительный баланс был сохранен преимущественно за счет мощного подземного прироста. Сравнение полевых результатов с данными спутниковых моделей вскрывает серьезные методологические расхождения: дистанционное зондирование занижает продуктивность сухих степей на 40–50% из-за невозможности учета скрытого в почве углеродного пула (Wiesmeier et al., 2019, Piao et al., 2020; Soussana et al., 2019).

**Таблица 2**

Составляющие углеродного баланса по всем мониторинговым разрезам Акмолинской области за 2025 год

Район и № разреза	NPP (Чистая продукция), т/га	Rh (Гетеротрофное дыхание), т/га	NEP (Нетто-баланс), т С/га	NEP (Сток CO <sub>2</sub> ), т CO <sub>2</sub> -экв/га
<b>Есильский район</b>				
Разрез 1	17,8	14,6	+1,44	+5,28
Разрез 2	16,5	13,6	+1,30	+4,79
Разрез 3	13,9	11,4	+1,12	+4,13
Разрез 4	19,2	15,3	+1,75	+6,44
Разрез 5	11,5	9,8	+0,76	+2,81
<i>Среднее по району</i>	<i>15,78</i>	<i>12,94</i>	<i>+1,28</i>	<i>+4,69</i>
<b>Егиндыкольский район</b>				
Разрез 1	15,4	13,1	+1,03	+3,80
Разрез 2	14,8	12,7	+0,94	+3,47
Разрез 3	15,6	13,3	+1,03	+3,80
Разрез 4	14,5	12,5	+0,90	+3,30
Разрез 5	15,2	13,0	+0,99	+3,63
<i>Среднее по району</i>	<i>15,10</i>	<i>12,92</i>	<i>+0,98</i>	<i>+3,60</i>
<b>Атбасарский район</b>				
Разрез 1	13,2	10,8	+1,08	+3,96
Разрез 2	9,0	7,1	+0,85	+3,14
Разрез 3	8,8	7,0	+0,81	+2,97
Разрез 4	8,4	6,8	+0,72	+2,64
Разрез 5	12,6	10,5	+0,94	+3,47
<i>Среднее по району</i>	<i>10,40</i>	<i>8,44</i>	<i>+0,88</i>	<i>+3,24</i>
<b>Ерейментауский район</b>				
Разрез 1	10,1	8,9	+0,54	+1,98
Разрез 2	9,8	8,7	+0,49	+1,82
Разрез 3	10,5	9,2	+0,58	+2,15
Разрез 4	9,5	8,5	+0,45	+1,65
Разрез 5	10,3	9,0	+0,58	+2,15
<i>Среднее по району</i>	<i>10,04</i>	<i>8,86</i>	<i>+0,53</i>	<i>+1,95</i>
<b>Аккольский район</b>				
Разрез 1	7,2	5,6	+0,72	+2,64
Разрез 2	7,5	5,8	+0,76	+2,81
Разрез 3	7,0	5,5	+0,67	+2,48
Разрез 4	7,8	6,2	+0,72	+2,64
Разрез 5	7,4	5,7	+0,76	+2,81
<i>Среднее по району</i>	<i>7,38</i>	<i>5,76</i>	<i>+0,73</i>	<i>+2,68</i>

*Статистическая оценка достоверности результатов по Б.А. Доспехову*

Для подтверждения научной значимости и объективности полученных полевых данных, материалы по всем 25 разрезам были подвергнуты строгой статистической об-

работке по методике Б.А. Доспехова. В качестве базового анализируемого признака была взята годовая чистая первичная продукция (NPP). В Таблице 3 представлены результаты оценки варибельности и точности полевого опыта.

**Таблица 3**

*Статистические показатели варибельности чистой первичной продукции (NPP) по районам исследований*

Район исследования	Данные по 5 разрезам (т/га)	Средняя арифметическая (M), т/га	Ошибка средней (m), ±т/га	Коэффициент вариации (V), %	Точность опыта (P), %
Есильский	17.8; 16.5; 13.9; 19.2; 11.5	15,78	1,38	19,6	8,7
Егиндыкольский	15.4; 14.8; 15.6; 14.5; 15.2	15,10	0,20	3,0	1,3
Атбасарский	13.2; 9.0; 8.8; 8.4; 12.6	10,40	1,03	22,1	9,9
Ерейментауский	10.1; 9.8; 10.5; 9.5; 10.3	10,04	0,18	4,0	1,8
Аккольский	7.2; 7.5; 7.0; 7.8; 7.4	7,38	0,13	4,1	1,8

Статистический анализ демонстрирует высокую надежность полученных результатов. Показатель точности опыта (P) по всем районам не превышает допустимого в полевых экологических исследованиях порога (менее 10%). Коэффициент вариации (V) отражает степень внутренней неоднородности биотопов: наиболее мозаичными и зависимыми от микрорельефа оказались ценозы Атбасарского (V = 22,1%) и Есильского (V = 19,6%) районов. Напротив, ксерофитные сообщества Аккольского и Ерейментауского районов проявили высочайшую пространственную однородность (V около 4%), что является адаптивной реакцией на жесткий абиотический стресс.

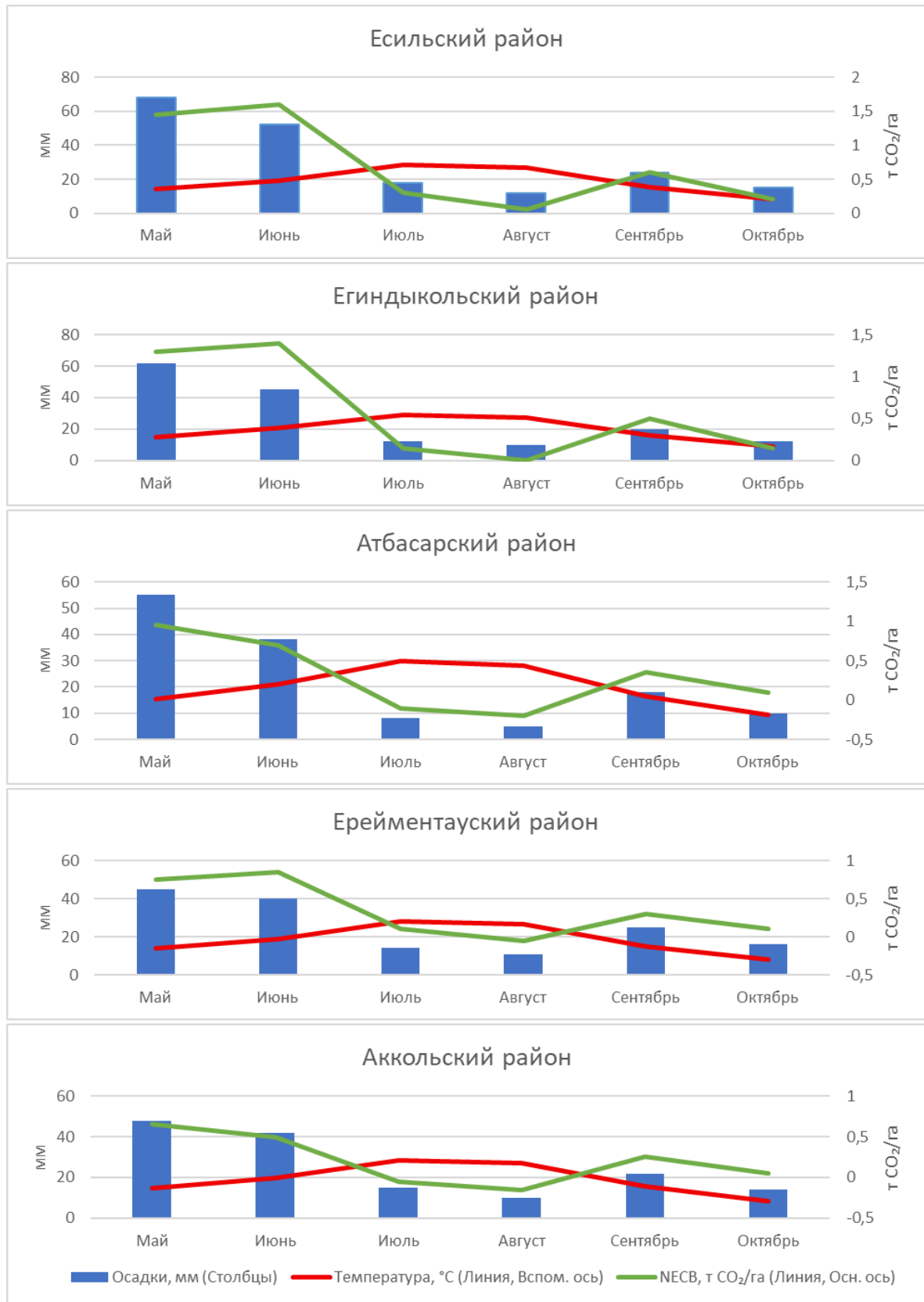
Для наглядной визуализации выявленных пространственно-временных закономерностей нами был построен график сезонной динамики углеродного обмена (Рисунок 1). Представленные графические данные убедительно доказывают, что внутрисезонная ритмика чистой экоси-

стемной продукции (NEP) находится в жесткой зависимости от динамики гидротермического коэффициента. В частности, весенне-раннелетний период (май–июнь) четко выделяется на всех графиках как фаза «углеродного максимума». В этот временной отрезок благодаря аномально высокой влагообеспеченности почвы и оптимальным температурам интенсивность фотосинтетических процессов достигала своих пиковых значений.

Однако во второй половине вегетации (июль–август) на фоне резкого повышения температур и критического дефицита осадков наблюдалась кардинальная смена функционального режима. Растения активировали защитные механизмы для минимизации потерь влаги, что привело к угнетению фотосинтеза. В результате кривая нетто-баланса в засушливых зонах опустилась до околонулевых значений, маркируя переход экосистем из состояния активного стока в режим газообменного равновесия.

**Рисунок 1**

Сезонная динамика нетто-поглощения углерода (NEP) в зависимости от гидротермических условий вегетационного периода 2025 года по районам исследования



Исследование показало, что наибольшие значения NEP в течение вегетационного периода были зафиксированы в Есильских и Егиндыкольских районах, тогда как Атбасарский район продемонстрировал наибольшую месячную изменчивость. Эти результаты свидетельствуют о сильной зависимости углеродного обмена в степных экосистемах от гидрометеорологических факторов и согласуются с данными исследований, подчеркивающих решающую роль водного режима в формировании углеродного баланса засушливых и полувзасушливых систем Центральной Азии (Mirzabaev, 2023).

### Заключение

Проведенное комплексное исследование динамики углеродного баланса степных экосистем Северного Казахстана в вегетационный сезон 2025 года позволяет сделать следующие обобщающие выводы:

Высокая вариабельность продукционных процессов: степные экосистемы региона характеризуются значительной пространственной неоднородностью. Статистически достоверно ( $p < 0,05$ ) доказано, что чистая первичная продукция (NPP) варьирует в широких пределах: от 7,38 т/га в ксерофитных сообществах до 15,78 т/га в высокопродуктивных мезофитных степях.

Доминирующая роль подземной сферы: подтверждена критическая важность учета корневых систем. Коэффициент подземного накопления закономерно возрастает по мере усиления аридизации, достигая значений 0,82 и выше в наиболее засушливых местообитаниях Атбасарского района, что свидетельствует об эволюционной стратегии растений инвестировать ресурсы в корни для выживания.

Положительный углеродный баланс: в условиях 2025 года все изученные типы степей выступали в роли активного нетто-стока углерода. Показатель чистой экосистемной продукции (NEP) в среднем варьировал от 2,68 до 4,69 т CO<sub>2</sub>-экв/га в год.

Исследования подтверждают, что большая часть органического углерода поступает в почву через подземные части растений и их отмершие остатки. Медленное разложение корневых систем стимулирует накопление органического вещества в почве, что подчеркивает ключевую

роль подземного резервуара в долгосрочном связывании углерода в степных биоценозах. Для точной оценки масштабов этого явления необходимы дальнейшие научные исследования с привлечением более широкой сети исследовательских участков.

Практическая и научная ценность данного исследования заключается в выведении количественных показателей сезонных колебаний углеродного баланса степных ландшафтов Акмолинской области. Полученные результаты могут быть использованы в рамках мониторинга углеродного цикла, оценки функций пастбищных экосистем и разработки региональных стратегий адаптации к изменению климата. Рекомендуется корректировать национальные методики учета парниковых газов, так как игнорирование подземной продукции в стандартных моделях ведет к недооценке поглотительного потенциала территории Казахстана. Результаты могут быть использованы для разработки региональных коэффициентов и внедрения проектов «углеродного фермерства».

### Источник финансирования

Исследование выполнено в рамках программно-целевого/грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН проекта: No AP23485030 «Геоэкологические аспекты обеспечения безопасности степных экосистем Акмолинской области»). Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории экологии ЕНУ им. Л.Н. Гумилева за помощь в проведении полевых работ.

### Вклад авторов

*Е.Х. Мендыбаев: Концептуализация, Руководство, Полевые исследования и камеральная обработка, Администрирование проекта, Привлечение финансирования, Редактирование и рецензирование; С.У. Zufarov: Методология, Исследование (сбор полевого материала), Курирование данных, Формальный анализ, Визуализация, Подготовка чернового варианта статьи; Г.А. Гатаулина: Исследование (лабораторная обработка проб), Формальный анализ, Редактирование и рецензирование; М.Ж. Шарипова: Валидация, Ресурсы, Редактирование и рецензирование.*

## References

- Abd-Elrahman A.H., Fan J., Zhou Y., Liu R. Spatiotemporal variations in net ecosystem productivity in the steppes of Mongolia and Kazakhstan // *Science of The Total Environment*. – 2024. – Vol. 907. – P. 167523.
- Batjes, N. H., Carvalho Ribeiro, E. D., van Oostrum, A. J. M., Leenaars, J. G. B., & Mendes de Jesus, J. S. (2016). Standardised soil profile data for the world (WoSIS, July 2016 snapshot).
- Buras, A., Rammig, A., & Zang, C. S. (2020). Quantifying impacts of the 2018 drought on European ecosystems in comparison to 2003. *Biogeosciences*, 17(6), 1655-1672.
- Chapin III, F. S., Matson, P. A., & Vitousek, P. M. (2011). The ecosystem concept. In *Principles of terrestrial ecosystem ecology* (pp. 3-22). New York, NY: Springer New York.
- Eisfelder, C. (2013). Modelling net primary productivity and above-ground biomass for mapping of spatial biomass distribution in Kazakhstan (Doctoral dissertation, Technische Universität Dresden).
- Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological applications*, 10(2), 423-436.
- Kerven, C., Robinson, S., & Behnke, R. (2021). Pastoralism at scale on the Kazakh rangelands: From clans to workers to ranchers. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 590401.
- Lal, R. (2018). Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. *Global change biology*, 24(8), 3285-3301.
- Lee, H., Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P., ... & Jotzo, F. (2023). IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report: A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Meier, I. C., & Leuschner, C. (2008). Belowground drought response of European beech: fine root biomass and carbon partitioning in 14 mature stands across a precipitation gradient. *Global Change Biology*, 14(9), 2081-2095.
- Mirzabaev, A. (2023). Climate change science and policy in Central Asia: current situation and future perspectives. *Climate Change in Central Asia: Decarbonization, Energy Transition and Climate Policy*, 23-32.
- Niu, S., Wu, M., Han, Y., Xia, J., Li, L., & Wan, S. (2008). Water-mediated responses of ecosystem carbon fluxes to climatic change in a temperate steppe. *New Phytologist*, 177(1), 209-219.
- Pausch, J., & Kuzyakov, Y. (2018). Carbon input by roots into the soil: quantification of rhizodeposition from root to ecosystem scale. *Global change biology*, 24(1), 1-12.
- Parton, W. J., Scurlock, J. M. O., Ojima, D. S., Gilmanov, T. G., Scholes, R. J., Schimel, D. S., ... & Kinyamario, J. I. (1993). Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. *Global biogeochemical cycles*, 7(4), 785-809.
- Piao, S., Wang, X., Park, T., Chen, C., Lian, X. U., He, Y., ... & Myneni, R. B. (2020). Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(1), 14-27.
- Scurlock, J. M. O., & Hall, D. O. (1998). The global carbon sink: a grassland perspective. *Global Change Biology*, 4(2), 229-233.
- Smith, P. (2014). Do grasslands act as a perpetual sink for carbon?. *Global change biology*, 20(9), 2708-2711.
- Soussana, J. F., Tallec, T., & Blanfort, V. (2010). Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. *animal*, 4(3), 334-350.
- Squires, V., & Qi, L. *Sustainable Land Management in Greater Central Asia*. Taylor & Francis.
- Vitkovskaya, I., Bатырбайева, М., Меирбеков, М., & Момбекова, Д. (2026). Methodology for the study of the spatio-temporal dynamics of vegetation cover in the Northern regions of Kazakhstan (2000–2023). *Theoretical and Applied Climatology*, 157(5), 299.
- Waheed, A., Qiao, X., Muhammad, M., Yiremaikebayi, Y., Yingying, X., Xu, H., ... & Wahab, A. (2025). Plant root-mediated carbon sequestration and nutrient cycling in grassland ecosystems under land use and climate change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 393, 109865.
- WANG, X., LI, Y., ZHAO, X., MAO, W., CUI, D., QU, H., ... & LUO, Y. (2012). Responses of soil respiration to different environment factors in semi-arid and arid areas. *Acta Ecologica Sinica*, 32(15), 4890-4901.
- Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobbey, E., Lang, B., von Lütow, M., Marin-Spiotta, E., ... & Kögel-Knabner, I. (2019). Soil organic carbon storage as a key function of soils-A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, 333, 149-162.
- Zhu, S., Chen, X., Zhang, C., Fang, X., & Cao, L. (2022). Carbon variation of dry grasslands in Central Asia in response to climate controls and grazing appropriation. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(21), 32205-32219.

### Сведения об авторах:

Мендыбаев Ерболат Хамзинович – кандидат биологических наук, профессор, профессор кафедры управления и инжиниринга в сфере охраны окружающей среды, факультет естественных наук, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва (Астана, Казахстан, e-mail: beskureke@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0193-8781).

Зуфаров Султанбек Уткирович – магистрант 2-курса образовательной программы 7M05206 – «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва (Астана, Казахстан, e-mail: sultanzufarov777@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-0822-121X).

Гатаулина Гульзира Адыльхановна – докторант 1-курса образовательной программы 8D05208 – «Экология и природопользование», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва (Астана, Казахстан, ORCID ID: 0009-0000-2181-8272).

*Шарипова Молдир Жакыпжановна – PhD, Международный университет Астана (Астана, Казахстан, ORCID ID: 0000-0002-9467-1483).*

**Information about the authors:**

*Mendybayev Yerbolat Khamzinovich – PhD (Biology), Professor, Dept. of Management and Engineering in Environmental Protection, Faculty of Natural Sciences, L.N. Gumilyov ENU (Astana, Kazakhstan, e-mail: beskureke@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0193-8781).*

*Zufarov Sultanbek Utkirovich – 2nd-year Master’s student, educational program 7M05206 – “Environmental Protection and Rational Use of Natural Resources”, L.N. Gumilyov ENU (Astana, Kazakhstan, e-mail: sultanzufarov777@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-0822-121X).*

*Gataulina Gulzira Adylkhanovna – 1st-year Doctoral student, educational program 8D05208 – “Ecology and Nature Management”, L.N. Gumilyov ENU (Astana, Kazakhstan, ORCID ID: 0009-0000-2181-8272).*

*Sharipova Moldir Zhakypzhanovna – PhD, Associate Professor, Astana International University (Astana, Kazakhstan, ORCID ID: 0000-0002-9467-1483).*

**Авторлар туралы мәлімет:**

*Мендыбаев Ерболат Хамзинович – биология ғылымдарының кандидаты, профессор, қоршаған ортаны қорғау саласындағы басқару және инженерия кафедрасының профессоры, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті (Астана, Қазақстан, e-mail: beskureke@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0193-8781).*

*Зуфаров Султанбек Уткирович 7M05206 – «Қоршаған ортаны қорғау және табиғат ресурстарын ұтымды пайдалану» білім беру бағдарламасының 2-курс магистранты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті (Астана, Қазақстан, e-mail: sultanzufarov777@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-0822-121X).*

*Гатаулина Гульзира Адильхановна 8D05208 – «Экология және табиғатты пайдалану» білім беру бағдарламасының 1-курс докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті (Астана, Қазақстан, ORCID ID: 0009-0000-2181-8272).*

*Шарипова Молдир Жакыпжановна – PhD, қауымдастырылған профессор Астана халықаралық университеті (Астана, Қазақстан, ORCID ID: 0000-0002-9467-1483).*

*Поступило 26 января 2026 года*

*Принято 15 июня 2026 года*

6-бөлім  
**АДАМ МЕН ЖАНУАРЛАР  
ФИЗИОЛОГИЯСЫ**

---

Section 6  
**HUMANS AND ANIMALS  
PHYSIOLOGY**

---

Раздел 6  
**ФИЗИОЛОГИЯ  
ЧЕЛОВЕКА И ЖИВОТНЫХ**

МРНТИ 34.35.51

<https://doi.org/10.26577/bb1072202613>

А.К. Ахатжанова<sup>1,2\*</sup>, Ф.Б. Амутова<sup>1</sup>, М.А. Нурсейтова<sup>1</sup>,  
Н.Н. Ахметсадыков<sup>1</sup>, Г.С. Конуспаева<sup>1,2</sup>, С. Юрьянц<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Научно-производственное предприятие Антиген, Алматы, Казахстан

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

<sup>3</sup>Университет Лотарингии, Нанси, Франция

\*e-mail: ahatzhana@gmail.com

## ОЦЕНКА БИОДОСТУПНОСТИ ХЛОРООРГАНИЧЕСКИХ ПЕСТИЦИДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ЖЕЛУДОЧНО-КИШЕЧНОГО ТРАКТА КУР

В 2023 году в ходе крупномасштабной инвентаризации в рамках проекта ФАО GCP/SEC/011/GFF в Казахстане было выявлено около 1,3 тыс. тонн устаревших стойких органических загрязнителей (СОЗ). Исследования, проведенные в 2013–2024 гг. на бывших складах пестицидов в Алматинской области, выявили концентрации, значительно превышающие предельно допустимые концентрации (ПДК) более 10 раз. Ввиду своей липофильности и стойкости эти соединения представляют серьезный риск попадания в организм скота и птицы, которые могут потреблять до 30 г почвы в день. Анализируемый грунт имел pH 8,0, содержание золы 27,9% и органического вещества 3,4%, а концентрации хлороорганических пестицидов (ХОП) варьировались от 4,5 до 5,0 мкг/г. Биодоступность ХОП в моделируемых желудочно-кишечных условиях значительно увеличивалась от желудочной к кишечной фазе и заметно повышалась при включении Tenax в качестве сорбционного резервуара, увеличиваясь с 0,01–17,10 % до 24,0–52,70 %. В целом средняя биодоступность колебалась от 25% до 67%, причем наивысшие значения наблюдались для 4,4-ДДТ и β-ГХЦГ. Эти результаты подчеркивают важную роль сорбционных резервуаров в повышении физиологической значимости моделей *in vitro* за счет более точного моделирования процессов абсорбции, что позволяет получить более точные оценки биодоступных фракций загрязнителей для обеспечения безопасности пищевых продуктов и общественного здоровья.

**Ключевые слова:** хлороорганические пестициды, куры, биодоступность, *in vitro* переваривание, почва.

A.K. Akhatzhanova<sup>1,2\*</sup>, F.B. Amutova<sup>1</sup>, M.A. Nurseitova<sup>1</sup>,  
N.N. Akhmetsadykov<sup>1</sup>, G.S. Konuspayeva<sup>1,2</sup>, S. Jurjanz<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Scientific and Production Enterprise Antigen, Almaty, Kazakhstan

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

<sup>3</sup>University of Lorraine, Nancy, France

\*e-mail: ahatzhana@gmail.com

### Assessment of the bioaccessibility of organochlorine pesticides using a chicken gastrointestinal tract model

In 2023, a large-scale inventory under the FAO GCP/SEC/011/GFF project identified approximately 1.3 thousand tons of obsolete persistent organic pollutants (POPs) in Kazakhstan. Studies conducted from 2013 to 2024 at former pesticide warehouses in the Almaty region revealed concentrations significantly exceeding maximum allowable concentrations (MAC) by more than 10 times. Due to their lipophilicity and persistence, these compounds pose a severe risk of transfer into livestock and poultry, which may ingest up to 30 g of soil daily. The analyzed soil featured a pH of 8.0, 27.9% ash content, and 3.4% organic matter, with organochlorine pesticide (OCP) concentrations ranging from 4.5 to 5.0 µg/g. Bioaccessibility of OCPs under simulated gastrointestinal conditions increased significantly from gastric to intestinal phases and was markedly enhanced by the inclusion of Tenax as a sorption sink, rising from 0.01–17.10% to 24.00–52.70%. Overall, mean bioaccessibility ranged from 25% to 67%, with the highest values observed for 4,4-DDT and β-HCH. These findings highlight the critical role of sorption sinks in improving the physiological relevance of *in vitro* models by better simulating absorption processes, thereby providing more accurate estimations of bioavailable contaminant fractions for food safety and public health.

**Keywords:** Organochlorine pesticides, poultry, bioaccessibility, *in vitro* digestion, soil.

А.Қ. Ахатжанова<sup>1,2\*</sup>, Ф.Б. Амутова<sup>1</sup>, М.А. Нурсейтова<sup>1</sup>,  
Н.Н. Ахметсадыков<sup>1</sup>, Г.С. Конуспаева<sup>1,2</sup>, С. Юрьянц<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Антиген ғылыми-өндірістік кәсіпорны, Алматы, Қазақстан

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

<sup>3</sup>Лотарингия университеті, Нанси, Франция

\*e-mail: ahatzhana@gmail.com

### Тауық ас қорыту жүйесінің моделін пайдалана отырып хлорорганикалық пестицидтердің биожетімділігін бағалау

2023 жылы ФАО GCP/SEC/011/GFF жобасы аясында жүргізілген ауқымды түгендеу нәтижесінде Қазақстанда шамамен 1,3 мың тонна ескірген тұрақты органикалық ластағыштар (ТОЛ) анықталды. 2013–2024 жылдары Алматы облысындағы бұрынғы пестицид қоймаларында жүргізілген зерттеулер шекті рұқсат етілген концентрациялардан (ШРК) ондаған есе асатын деңгейлерді көрсетті. Липофильділігі мен тұрақтылығына байланысты бұл қосылыстар мал мен құс ағзасына ену қаупін тудырады, себебі олар тәулігіне 30 г дейін топырақты тұтынуы мүмкін. Зерттелген топырақтың рН мәні 8,0, күл мөлшері 27,9%, органикалық заттар үлесі 3,4% болды, ал хлорорганикалық пестицидтердің (ХОП) концентрациясы 4,5–5,0 мкг/г аралығында анықталды. Ас қорыту жолын модельдеу жағдайында ХОП-тың биожетімділігі асқазан фазасынан ішек фазасына өткенде айтарлықтай артты және сорбциялық «сіңіргіш» ретінде Тепах қолданылғанда одан әрі күшейді (0,01–17,10%-дан 24,00–52,70%-ға дейін). Жалпы алғанда, орташа биожетімділік 25%-дан 67%-ға дейін өзгерді, ең жоғары мәндер 4,4-ДДТ және β-ГХЦГ үшін байқалды. Бұл нәтижелер *in vitro* модельдерде сорбциялық сіңіргіштердің маңыздылығын көрсетеді, себебі олар сіңіру процестерін шынайырақ модельдеуге мүмкіндік береді және осылайша тағам қауіпсіздігі мен қоғамдық денсаулық үшін биожетімді ластағыш фракцияларды дәлірек бағалауды қамтамасыз етеді.

**Түйін сөздер:** хлорорганикалық пестицидтер, тауық, биожетімділік, *in vitro* қорыту, топырақ.

#### Сокращения и обозначения

ФАО – продовольственная и сельскохозяйственная организация, ДДТ – Дихлордифенилтрихлорэтан, ГХЦГ – Гексахлорциклогексан, NaCl – хлорид натрия, HCl – соляная кислота, NaHCO<sub>3</sub> – гидрокарбонат натрия, MgSO<sub>4</sub> – сульфат магния, ГХ-МС – газовый хромато-масс-спектрометр, HCB – гексахлоробензан.

#### Введение

Хлорорганические пестициды (ХОП), такие как ДДТ, дильдрин и ГХЦГ, относятся к категории стойких органических загрязнителей (СОЗ). Они характеризуются высокой гидрофобностью, химической стабильностью и длительной стойкостью в почве (Tulibayev, 2022). Эти свойства позволяют ХОП биоаккумулироваться в живых организмах и биомагнифицироваться по всей пищевой цепи. Признанные в связи с серьезными рисками для качества воды, биоразнообразия и здоровья человека, ХОП официально ограничены в соответствии с Приложением А к Стокгольмской конвенции (Amutova и др., 2021). Эти вещества были официально запрещены в 1971 году в Советском Союзе, и в то время ДДТ был захоронен в Казахстане на 14 захоронениях

по всей стране (Nurzhanova и др., 2010). Следует отметить, что до 1990-х годов ДДТ использовался в Казахстане в ветеринарных и медицинских целях (Nurzhanova и др., 2010). Согласно оценкам, проведенным в 2004 году в рамках проекта Глобального экологического фонда, в стране насчитывалось около 1 500 тонн устаревших пестицидов и пестицидных смесей, многие из которых содержат химические вещества, классифицированные как СОЗ (Djangalina и др., 2020). Однако на начальном этапе инвентаризация пестицидов охватывала лишь количество и состояние запасов, без детального изучения их воздействия на здоровье населения и окружающую среду.

В последующие годы Министерство сельского хозяйства Республики Казахстан сообщило о 6931,4 тоннах устаревших и непригодных к использованию пестицидов, оставшихся на складах в различных регионах страны (Nurzhanova и др., 2018). В настоящее время только в Алматинской области насчитывается 64 склада с устаревшими пестицидами. Склады устаревших пестицидов, расположенные в Алматинской области и других регионах, были заброшены, уничтожены или переданы в частную собственность (Tolubayev и др., 2011). Это привело к неконтролируемому рассеиванию химических веществ, проникающих в почву и водные источники, что

представляет угрозу для здоровья населения и экосистем. Остаточные концентрации ХОП по-прежнему обнаруживаются в окружающей среде, включая почву, растения и продукты питания (Akhatzhanova и др., 2024, Konuspayeva и др., 2011, Sailaukhanuly и др., 2016, Nurzhanova и др., 2013, Shen и др., 2021).

Особую озабоченность вызывают случаи обнаружения ХОП в биологических тканях, в том числе в эмбрионах, плодах и организмах людей всех возрастов, проживающих вблизи бывших мест захоронения пестицидов в Алматинской области (Altynova и др., 2023). Это связано с тем, что ХОП обладают высокой стойкостью, биоаккумуляцией и мигрируют по пищевой цепи, что усиливает их воздействие на здоровье человека, включая потенциальную канцерогенность и эндокринную дисфункцию (Arrebola и др., 2015, Parada и др., 2016). Эти данные подчеркивают высокий уровень загрязнения почвы на бывших местах хранения, что представляет риск для местного населения, особенно в связи с использованием этих территорий для сельского хозяйства и строительства.

Проблема биоаккумуляции ХОП в пищевой цепи животных и их дальнейшее влияние на продукты животного происхождения остается актуальной. Особое внимание привлекает попадание почвы с кормом в организм птицы и других животных, что приводит к их загрязнению и накоплению этих веществ в продуктах питания, таких как яйца и мясо (Collas и др., 2019, Jondreville и др., 2013). Например, куры-несушки могут потреблять от 4 до 30 г почвы в день в зависимости от условий содержания. Поскольку эти птицы активно взаимодействуют с почвой, они могут эффективно накапливать ХОП в своих организмах вместе с потребляемыми частицами почвы (Travel и др., 2012). Аналогичным образом, свиньи могут потреблять от 110 до 170 г сухой почвы на животное в день, что значительно превышает показатели для молодняка крупного рогатого скота (Jurjanž и др., 2012, Collas и др., 2023). Поскольку ХОП оказывают длительное воздействие, включая нарушение работы эндокринной системы и канцерогенный риск, разработка методов связывания этих соединений в почве является приоритетной задачей.

В данном исследовании впервые будет применена и оптимизирована *in vitro* модель, имитирующая желудочно-кишечный тракт кур, для определения биодоступности ХОП в загрязненной почве. Биодоступность в данном контексте определяется как доля загрязнителя,

мобилизованного из почвы (или другой матрицы) и доступного для всасывания в желудочно-кишечной среде. *In vitro* модели желудочно-кишечного тракта, используемые в исследованиях на птицах, варьируются от простых статических подходов физически обоснованного экстракционного теста (РВЕТ) до сложных динамических систем. Предложенная модель (Furman и др., 2006), обеспечивает надежную и воспроизводимую двухфазную (желудочно-кишечную) структуру, но, как и большинство статических систем, она не учитывает непрерывные процессы, такие как обновление жидкости, перенос пищевого содержимого или удаление растворенных загрязнителей. Напротив, динамические модели были разработаны и усовершенствованы с целью более точного имитирования физиологии птиц за счет включения механического воздействия, отбора проб с временным разрешением и обмена жидкостью (Martinez-Naro и др., 2009, Bean и др., 2016). Однако эти системы сложны в экспериментальном плане и менее подходят для рутинного применения.

В данном исследовании был применен модифицированный метод физически обоснованного экстракционного теста (РВЕТ) (Furman и др., 2006), усовершенствованный за счет включения сорбционного резервуара (Tenax) на кишечной фазе. Эта модификация устраняет ключевое ограничение статических моделей, обеспечивая непрерывное удаление десорбированных хлорорганических пестицидов, тем самым предотвращая их повторное распределение в почвенной матрице и лучше моделируя неравновесные условия. Моделируемые желудочная и кишечная фазы обеспечивают соответствующие физико-химические условия для мобилизации гидрофобных загрязнителей, в то время как Tenax выступает в качестве аналога процессов кишечного всасывания.

Хотя модель не воспроизводит всех динамических аспектов пищеварения птиц, она вносит существенное функциональное улучшение, сохраняя при этом простоту и воспроизводимость. Это особенно важно для гидрофобных соединений, таких как ХОП, биодоступность которых в значительной степени определяется процессами сорбции-десорбции. Возможность разделения почвенной, водной и связанной с Tenax фракций еще больше укрепляет интерпретацию распределения загрязнителей.

В предыдущих исследованиях, направленных на изучение и снижение биодоступности СОЗ, использовались модели пищеварительной

системы моногастричных животных и человека. Эти модели применялись для оценки всасывания и поведения химических соединений в пищеварительной системе, что способствовало разработке методов контроля загрязнения (Li и др., 2022, Li и др., 2015, Lu и др., 2021). Однако моделирование желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) птицы использовалось в основном для изучения биодоступности микотоксинов и тяжелых металлов (Solis-Cruz и др., 2017, Levengood и Skowron, 2001).

Целью данного исследования было моделирование желудочно-кишечного тракта кур *in vitro* и оценка биодоступности хлорорганических пестицидов в этих условиях. Такой подход позволит оценить пути переноса хлорорганических пестицидов из почвы в организм кур, что является важным шагом в изучении их биоаккумуляции и возможных мер по снижению биодоступности с помощью сорбентов.

## Материалы и методы исследования

### 2.1 Материалы и реагенты

Пепсин из слизистой оболочки желудка свиней (400 единиц/мг белка), панкреатин из поджелудочной железы свиней (8 x USP), пористый полимерный адсорбент Tenax (80–100 меш), n-гексан, безводный сульфат магния, хлорид натрия, дихлорметан, ацетон были получены от Sigma-Aldrich (США). Стандарты сертифицированных хлорорганических пестицидов: ДДТ (2,4-ДДД, 4,4-ДДД, 4,4-ДДТ, 4,4-ДДЭ), ГХЦГ ( $\alpha$ -ГХЦГ,  $\beta$ -ГХЦГ,  $\gamma$ -ГХЦГ) были приобретены у компании ТОО «Lezart» (Казахстан), гексахлоробензан 13С6 (НСВ), использованный в качестве внутреннего стандарта, был получен от компании Dr. Erhenstorfer (LGC Standards, Германия).

### 2.2 Добавление примесей в почву и ее старение

Образцы почвы были отобраны в саду (43.169472° с.ш., 76.768687° в.д.) в Алматинской области и проанализированы на наличие хлорорганических пестицидов. Были определены ее физико-химические свойства, включая влажность, рН, содержание сухого вещества, золы, органического вещества и содержание хлорорганических пестицидов. Затем почву высушили на воздухе при комнатной температуре и просеяли через сито с ячейками 2 мм.

Для приготовления загрязненной почвы к ней добавляли исходный стандартный раствор ХОП (10 мг/л) до достижения конечной концентрации

0,5 мг/кг (ДДТ и ГХЦГ) в сухом весе почвы. Затем обогащенную почву выдерживали в течение 2,5 месяцев в закрытых стеклянных емкостях в темноте. Образцы хранились в крытом помещении, подверженном воздействию окружающей среды; поэтому температура и влажность не контролировались и изменялись в зависимости от погодных условий снаружи.

### 2.3 Моделирование пищеварения *in vitro*

В данном исследовании для оценки биодоступности ХОП в почве с учетом сорбционного поглотителя использовалась модель пищеварения *in vitro*, описанная в другой работе с некоторыми модификациями (Furman и др., 2006). В качестве сорбционного резервуара использовался Tenax. Перед использованием Tenax (80–100 меш) заворачивали в фильтровальную бумагу и трижды экстрагировали смесью гексана и ацетона (объемное соотношение 1:1) в ультразвуковой ванне в течение 5 минут. Желудочную фазу готовили путем добавления 10 г пепсина в 1 л 1-процентного раствора NaCl и понижения рН до 2,0 с помощью HCl. Вкратце: 1 г сухой почвы добавляли в желудочную жидкость (20 мл) в пробирках Falcon объемом 50 мл и встряхивали на шейкер-инкубаторе в течение 1 часа при 40 °С со скоростью вращения 150 об/мин. После в желудочной фазе желудочный раствор модифицировали для перехода в кишечную фазу путем повышения рН до 7,0 с помощью 1,0 М NaHCO<sub>3</sub> и добавления 0,01 г панкреатина и 0,035 г желчных солей; кроме того, в пробирку добавляли 0,2 г Tenax в качестве абсорбирующего поглотителя (Li и др., 2015). Кишечную фазу встряхивали в течение 2 ч при 40 °С и 150 об/мин. После инкубации Tenax был отдельно собран, а супернатант и осадок были разделены центрифугированием при 5000 об/мин в течение 10 мин.

Биодоступность ХОП рассчитывалась по формуле 1:

$$\text{Bioaccessibility} = \frac{\text{in vitro OCPs}}{\text{total OCPs}} \times 100\% \quad (1)$$

Где *in vitro* OCPs – это масса ХОП, извлеченных методом *in vitro*, а total OCPs – это масса ХОП в почве до экстракции.

### 2.4 Экстракция образца

После центрифугирования экстракцию ХОП проводили из супернатанта, Tenax и остаточной почвы отдельно. ХОП экстрагировали из супернатанта методом жидко-жидкостной экс-

тракции (LLE) (Amutova и др., 2023). Пробу супернатанта (10 мл) экстрагировали 15 мл дихлорметана:гексана (1:1) и встряхивали на вортексе в течение 3 мин. Затем пробы центрифугировали в течение 5 мин при 5000 об/мин. Супернатат пропускали через фильтровальную бумагу с безводным сульфатом магния в круглодонную колбу. Экстракцию повторяли дважды. Объединенный фильтрат концентрировали при 60 °С на роторном испарителе до 1-1,5 мл. Тенax высушивали и экстрагировали 10 мл ацетона в ультразвуковой ванне 3 раза. Все экстракты объединяли и выпаривали до 1–1,5 мл.

Остатки проб почвы экстрагировали методом QuEChERS (Pinto и др., 2010), с небольшими модификациями. К остаткам проб почвы добавляли 1,5 мл деионизированной воды и встряхивали в течение 1 мин на вортексе. Затем добавляли 2,5 мл этилацетата и смесь снова встряхивали в течение 5 мин. После этого добавляли 1 г безводного  $MgSO_4$  и встряхивали как можно быстрее, чтобы предотвратить образование агрегатов  $MgSO_4$ . Затем пробирки центрифугировали при 5000 об/мин в течение 5 мин, и верхний слой собирали для последующего анализа методом ГХ-МС.

### 2.5 Анализ образцов

Анализ экстрактов проводили с помощью ГХ-МС (7890 В, Agilent Technologies). Вкратце,

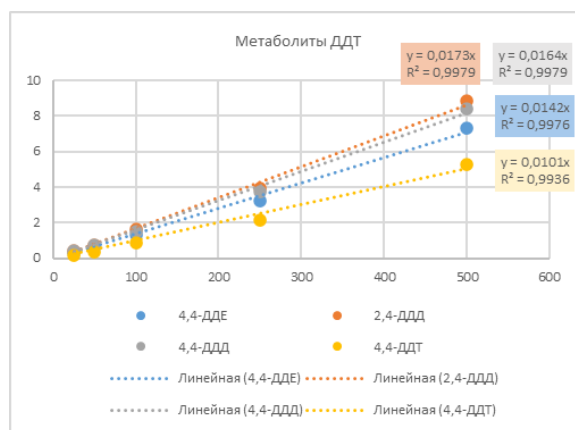
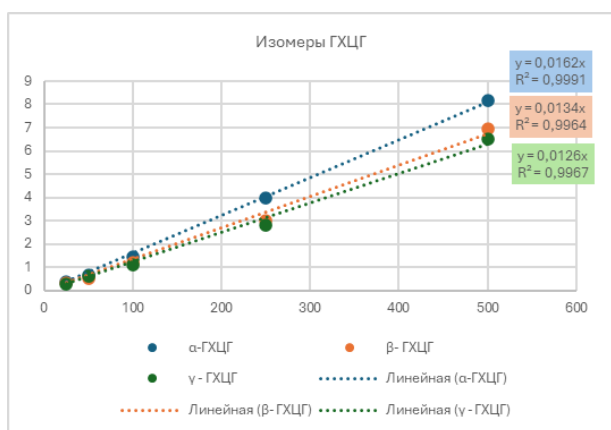
масс-спектрометр был настроен на разрешение 10 000 в режиме электронной ионизации (энергия электронов 70 эВ) (5975С, Agilent Technologies). Использовалась капиллярная колонка HP-5ms Ultra Inert (30 мкм × 250 мкм × 0,25 мкм) от Agilent J&W (Agilent Technologies) в режиме без разделения. Программа температур ГХ для анализа ХОП: от 120 °С (1 мин) со скоростью 40 °С/мин до 220 °С (13 мин). Общее время – 16,5 мин. Полученные сигналы интегрировали с помощью программы Mass Hunter (В 07.05.2479).

### 2.6 Контроль качества

Анализ моделирования пищеварения *in vitro* проводился в двух повторных определениях и включал контрольные пробы. Количественное определение проводилось с использованием внутреннего стандарта (меченного по  $^{13}C$  НСВ (Hexachlorobenzene)) и построением калибровочной кривой. Калибровочную кривую строили по серии стандартных растворов с концентрациями пестицидов 25, 50, 100, 250, 500 мкг/л и постоянной концентрацией внутреннего стандарта 100 мкг/л (Рисунок 1 – Данные по хлорорганическим пестицидам на основе типичного диапазона концентраций 25-500 мкг/л с 5 точками калибровки). Линейность оценивали по зависимости отношения площади пика пестицида к площади пика внутреннего стандарта от концентрации пестицида.

**Рисунок 1**

Данные по хлорорганическим пестицидам на основе типичного диапазона концентраций 25-500 мкг/л с 5 точками калибровки



## Результаты исследования и их обсуждение

### 3.1 Характеристика почвы

Физико-химические свойства почвы, использованной в данном исследовании, были определены до начала экспериментальных процедур, чтобы обеспечить правильную характеристику матрицы. Влажность почвы составляла 8,1 %, что указывает на относительно низкое содержание воды, характерное для состояния воздушной сушки. Содержание сухого вещества составляло 92,5 %, что подтверждает, что образцы состояли преимущественно из твердого материала.

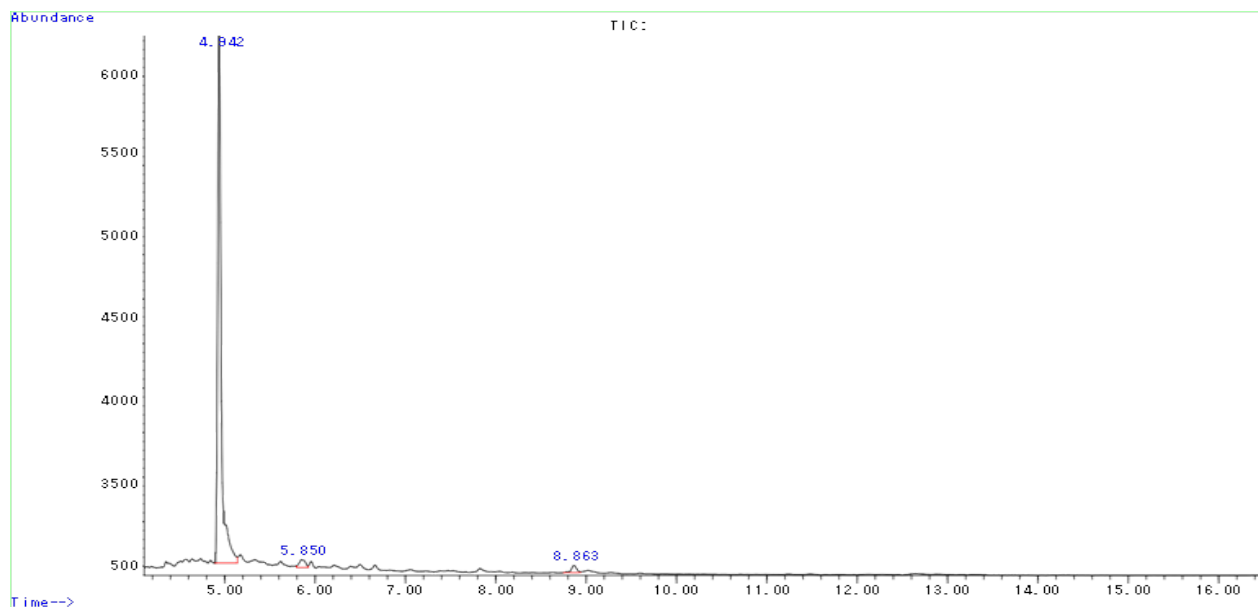
Содержание золы в почве составляло 27,9 %, что указывает на значительную долю

минеральных компонентов. Массовая доля органического углерода составляла 1,95 %, что соответствует содержанию органического вещества 3,4 %; это указывает на умеренное содержание органического вещества в почве. Такой уровень органического вещества имеет важное значение, поскольку он может влиять на сорбционные и удерживающие свойства гидрофобных органических загрязнителей, таких как хлорорганические пестициды.

рН почвы составил 8,0, что указывает на слабощелочные условия. Такие значения рН могут влиять на стабильность, подвижность и биодоступность загрязнителей в почвенной матрице.

**Рисунок 2**

*Хроматограмма образца отобранной почвы*



В отобранном образце почвы следов хлорорганических пестицидов не было обнаружено, что подтверждает хроматограмма образца (Рисунок 2). Концентрация хлорорганических пестицидов (ХОП) в образцах загрязненной почвы после старения колебалась от 4,5 до 5,0 мкг/г. Аналитический метод оказался высоконадежным, с коэффициентами извлечения от 92% до 100%, что подтверждает точность и эффективность процедур экстракции и количественного определения.

### 3.2 Биодоступность ХОП в *in vitro* модели желудочно-кишечного тракта кур

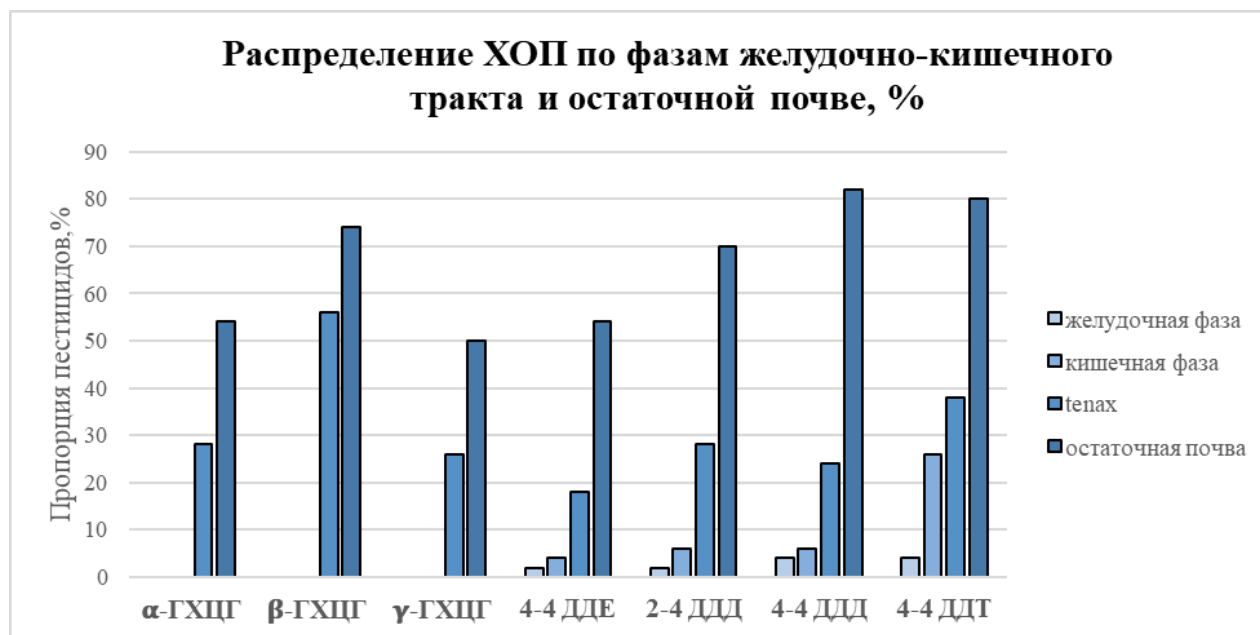
Наблюдаемое в данном исследовании увеличение мобилизации ХОП при переходе из желудочной среды в кишечную согласуется с предыдущими данными по гидрофобным органическим загрязнителям. Хотя концентрации ХОП в водной фазе оставались низкими в обеих средах (Рисунок 3 – Распределение хлорорганических пестицидов между желудочно-кишечными фазами и остаточной почвой, %), относи-

тельное увеличение в кишечной фазе (например, 4,4-ДДТ: 1% → 16%) отражает повышенную способность кишечных жидкостей к растворению. О подобных тенденциях широко сообщалось в отношении других гидрофобных загрязнителей, включая декабромдифениловый эфир (BDE-209) (Pan и др., 2016), полихлородифенил (ПХД) (Kang и др., 2013) и полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) (Tang и др., 2006), где биодоступность в кишечных условиях значительно превышала таковую в желудочных условиях. Этот эффект в первую очередь объясняется присутствием желчных солей, которые снижают поверхностное натяжение, способствуют образованию мицелл и увеличивают кажущуюся растворимость неполярных соединений. Кроме того, более высокий pH в кишечной фазе дополнительно повышает растворимость и мобилизацию гидрофобных загрязнителей (Kang и др., 2013, Oomen и др., 2001).

Однако полученные результаты также демонстрируют, что биодоступность в водной фазе сама по себе недооценивает потенциально доступную фракцию пестицидов. Значительная часть мобилизованных загрязнителей была связана с фракцией Tenax (17-53 %), что подчеркивает важность включения сорбционного резервуара для учета биодоступного пула. Это наблюдение согласуется с результатами исследования (Тао и др., 2009), которое показало, что значительная доля мобилизованных ХОП остается связанной с твердой или неводной фазами, что приводит к недооценке, если учитывать только концентрации растворенных веществ. Кроме того, преобладание ХОП в фракции остаточной почвы (59-78 %) подтверждает сильную сорбцию на органическом веществе почвы, что согласуется с известной гидрофобностью этих соединений.

**Рисунок 3**

Распределение хлорорганических пестицидов между желудочно-кишечными фазами и остаточной почвой, %



Значительное повышение биодоступности ХОП, наблюдавшееся при добавлении Tenax в данном исследовании, согласуется с результатами предыдущих работ, демонстрирующих решающую роль сорбционных резервуаров в преодолении ограничений статических моделей *in vitro*. В настоящей работе биодоступность уве-

личилась с 0,01–17,10 % (без Tenax) до 24,00–52,70 % (с Tenax) (Рисунок 4 – Биодоступность ХОП, измеренная с добавлением Tenax и без добавления), что соответствует многократному повышению, особенно для соединений β-ГХЦГ и ДДТ. О подобных тенденциях сообщалось: при использовании Tenax наблюдалось 3,4–22-крат-

ное увеличение биодоступности ДДТ (Pan и др., 2016), а при различных методах *in vitro*, таких как RBET, DIN, IVD, сообщалось о среднем увеличении до 9 раз (Li и др., 2023). Другие исследования продемонстрировали сопоставимые эффекты, включая 4,4-кратное увеличение для ПАУ (Li и др., 2015) и до 8-кратного для полибромированных дифениловых эфиров (ПБДЭ) (Fang и Stapleton, 2014) при использовании Tenax в качестве липофильного поглотителя. Аналогичным образом, включение сорбционной фазы увеличивало десорбцию метаболитов ДДТ до 20 раз, что подчеркивает: традиционные подходы RBET существенно занижают биодоступность из-за недостаточной емкости для гидрофобных органических загрязнителей (Juhasz и др., 2016).

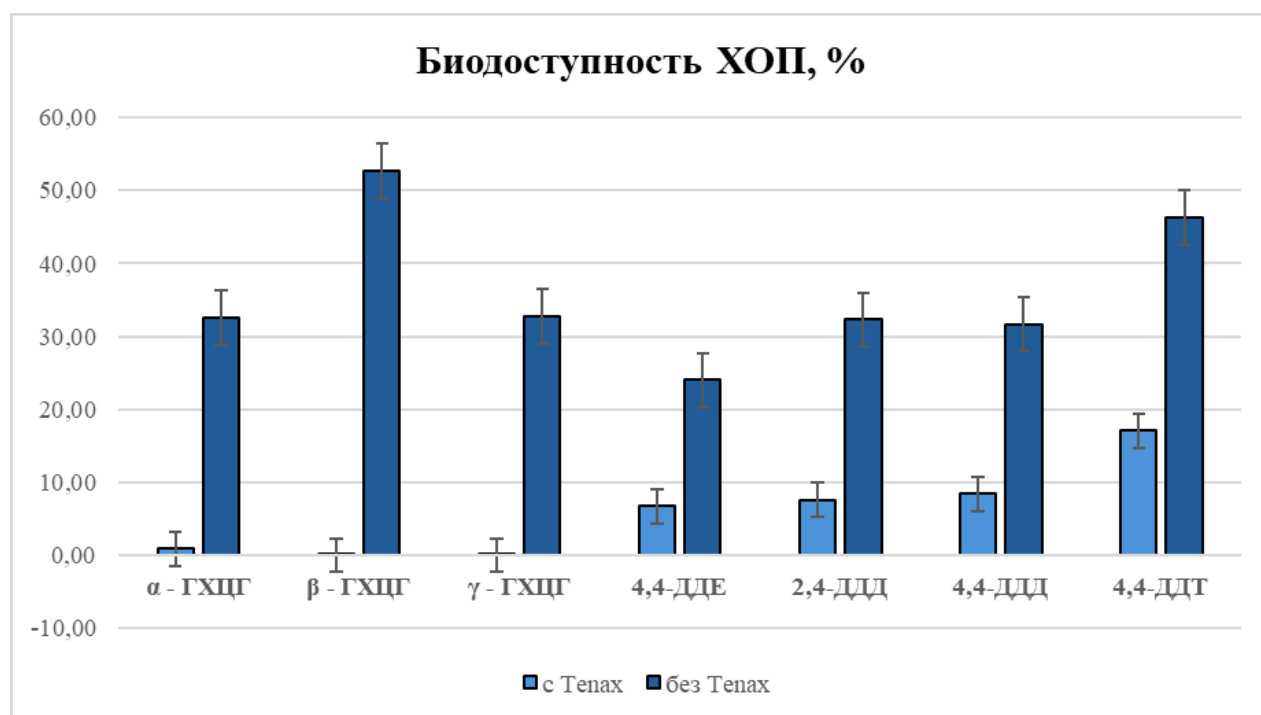
Механизм, лежащий в основе этого явления, заключается в способности Tenax действовать как бесконечный поглотитель, непрерывно удаляя десорбированные загрязнители из водной фазы и поддерживая градиент концентрации, который способствует дальнейшей десорбции из почвенной матрицы. Без такого поглотителя условия равновесия ограничивают высвобождение

загрязнителей, что приводит к искусственно заниженным значениям биодоступности, как сообщалось в нескольких исследованиях, где биодоступность метаболитов ДДТ оставалась ниже 4% в исторически загрязненных почвах (Juhasz и др., 2016).

Средняя биодоступность хлорорганических пестицидов значительно варьировалась между соединениями, колеблясь от 25% до 67% (Рисунок 5 — Средняя биодоступность (%) хлорорганических пестицидов, полученная с использованием метода *in vitro*). Наивысшая биодоступность наблюдалась для 4,4-ДДТ ( $67 \pm 6,35\%$ ), что указывает на больший потенциал мобилизации в условиях моделирования желудочно-кишечного тракта с помощью метода с использованием адсорбционного поглотителя. Среди изомеров ГХЦГ  $\beta$ -ГХЦГ продемонстрировал заметно более высокую биодоступность ( $55 \pm 11,74\%$ ) по сравнению с  $\alpha$ -ГХЦГ ( $29 \pm 3,74\%$ ) и  $\gamma$ -ГХЦГ ( $26 \pm 2,48\%$ ), что свидетельствует о различиях в физико-химическом поведении и взаимодействии с почвенной матрицей.

**Рисунок 4**

Биодоступность ХОП, измеренная с добавлением Tenax и без добавления



Умеренные значения биодоступности наблюдались для метаболитов ДДТ, включая 2,4-ДДД ( $37 \pm 9,69$  %) и 4,4-ДДД ( $34 \pm 7,75$  %), тогда как 4,4-ДДЕ продемонстрировал самую низкую биодоступность среди соединений, связанных с ДДТ ( $25 \pm 4,76$  %). Относительно более высокая изменчивость (SD), наблюдаемая для  $\beta$ -ГХЦГ и 2,4-ДДД, указывает на большую гетерогенность в поведении десорбции или чувствительности к экспериментальным условиям.

Полученные в данном исследовании значения биодоступности (25–67 %) находятся в широком диапазоне, зарегистрированном для гидрофобных органических загрязнителей в почвах и моделях желудочно-кишечного тракта. Относительно более высокие значения, наблюдаемые в настоящем исследовании, особенно для 4,4-ДДТ и  $\beta$ -ГХЦГ, можно объяснить включением сорбционного резервуара, который усиливает десорбцию и предотвращает восстановление равновесия.

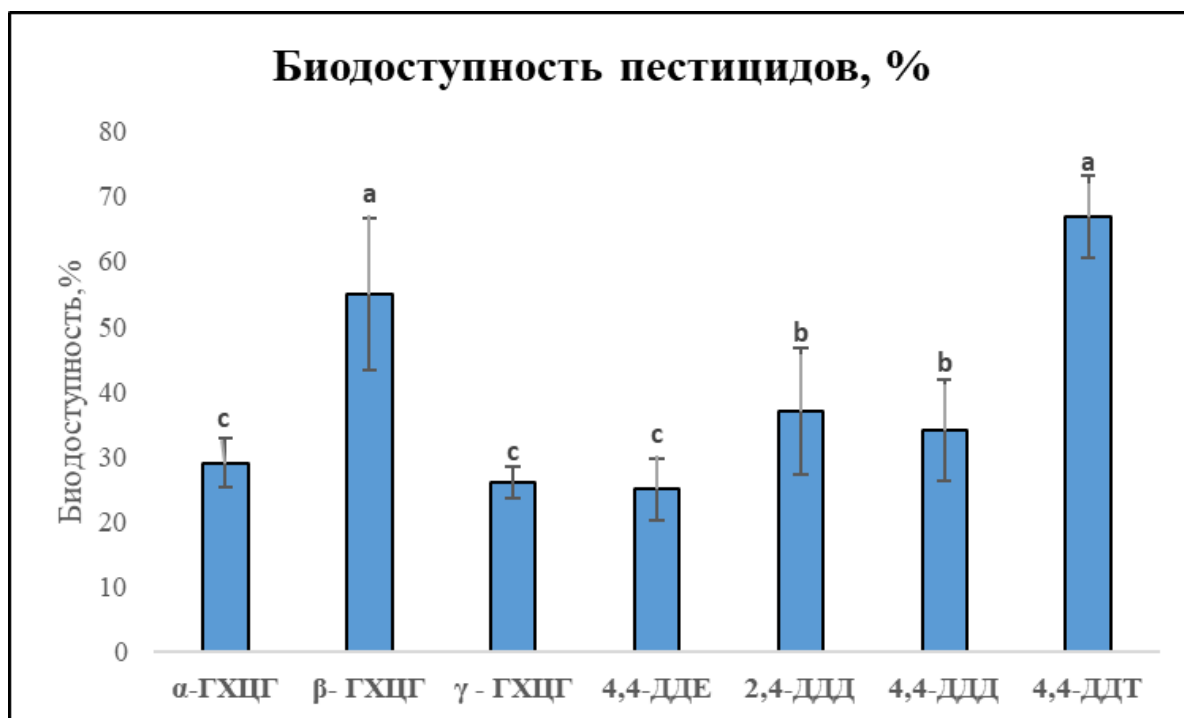
Кроме того, выбранные времена инкубации (1 час для желудочной и 2 часа для кишечной фаз) соответствуют подходам, основанным на РВЕТ, и достаточны для приближения к условиям равновесия. Время экстракции оказывает минимальное влияние на биодоступность по-

сле достижения равновесия, при этом большая часть десорбции происходит на начальных этапах пищеварения (Levengood и Skowron, 2001). Поэтому наблюдаемая в данном исследовании биодоступность, вероятно, определяется в первую очередь физико-химическими взаимодействиями (например, процессами сорбции–десорбции и образованием мицелл), а не кинетическими ограничениями.

Также было показано, что включение Tenax в модели *in vitro* пищеварения улучшает прогностическую способность анализов биодоступности в отношении биодоступности *in vivo*. Включение Tenax значительно усилило корреляции *in vivo*–*in vitro*: коэффициент детерминации ( $r^2$ ) для метода РВЕТ увеличился с 0,01 до 0,37, а для метода DIN была достигнута приемлемая корреляция ( $r^2 = 0,66$ ; наклон =  $0,78 \pm 0,21$ ) (Wang и др., 2013). Эти результаты указывают на то, что сорбционные резервуары могут повысить физиологическую релевантность *in vitro* моделей за счет более точного моделирования процессов абсорбции. Однако этот эффект зависел от метода, так как для IVD наблюдалось лишь незначительное улучшение, что свидетельствует о том, что состав и сложность модели влияют на эффективность включения Tenax.

Рисунок 5

Средняя биодоступность (%) хлорорганических пестицидов, полученная с использованием метода *in vitro*



Кроме того, предыдущие исследования подчеркивают, что дополнительные физиологические факторы, такие как присутствие пищевых компонентов и пищеварительных ферментов, могут дополнительно влиять на эффективность модели. В совокупности эти результаты свидетельствуют о том, что, хотя Тепах усиливает процессы, обусловленные десорбцией, для точного прогнозирования биодоступности *in vivo* необходимо учитывать как динамику сорбции, так и процессы биохимического пищеварения.

В этом контексте улучшенная биодоступность, наблюдаемая в настоящем исследовании при включении Тепах, подтверждает его роль в повышении экологической и биологической значимости *in vitro* модели, хотя по-прежнему необходима дальнейшая валидация по сравнению с данными *in vivo*.

### Заключение

Данное исследование демонстрирует, что модифицированная модель пищеварения *in vitro*, включающая сорбционный резервуар (Тепах), обеспечивает улучшенную и более реалистичную оценку биодоступности хлорорганических пестицидов (ХОП) в загрязненных почвах. В то время как традиционные подходы на основе РВЕТ занижают оценку биодоступности из-за ограничений, связанных с равновесием, включение Тепах позволяет осуществлять непрерывное удаление десорбированных загрязнителей, что лучше моделирует процессы всасывания в кишечнике и неравновесные условия.

Результаты показали, что биодоступность ХОП зависит от конкретного соединения, при этом средние значения варьируются от 25% до 67% и значительно увеличиваются в присутствии Тепах. Значительная доля мобилизованных загрязнителей была связана с сорбционным резервуаром, что подчеркивает: измерений только в водной фазе недостаточно для точной оценки биодоступного пула. Эти результаты подтверждают, что процессы сорбции-десорбции играют доминирующую роль в регулировании доступности гидрофобных загрязнителей в желудочно-кишечной среде.

В целом, разработанный подход устраняет разрыв между простыми статическими и сложными динамическими моделями, повышая физиологическую релевантность при сохранении простоты и воспроизводимости экспериментов. Согласованность результатов с данными литературы дополнительно подтверждает надежность метода. Важно отметить, что данное исследование восполняет существенный пробел в научных знаниях, применяя адаптированную для птицы модель *in vitro* для оценки биодоступности стойких органических загрязнителей.

Будущая работа должна быть сосредоточена на валидации модели по сравнению с данными *in vivo* и включении дополнительных физиологических параметров, таких как компоненты рациона и ферментативная активность, для дальнейшего повышения точности прогнозирования. Предлагаемый метод представляет собой ценный инструмент для оценки экологического риска и способствует снижению зависимости от испытаний на животных в исследованиях переноса загрязнителей в пищевой цепи.

### Источник финансирования

Данная работа была выполнена в рамках грантового финансирования ИРН AP26195775 «Оценка биодоступности хлорорганических пестицидов с использованием желудочно-кишечной модели кур в условиях *in vitro*» финансируемая Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

### Вклад авторов

А.Қ. Ахатжанова: Концептуализация, Курирование данных, Методология, Формальный анализ, Проведение исследования, Визуализация, Написание – первоначальный вариант; Ф.Б. Амутова: Курирование данных, Визуализация, Валидация Написание – рецензирование и редактирование; М.Н. Нурсеитова: Администрирование проекта, Привлечение финансирования, Написание – первоначальный вариант, Написание – рецензирование и редактирование; Н.Н. Ахметсадыков: Ресурсы; Г.С. Конуспаева: Научное руководство, Написание – рецензирование и редактирование; С. Юрьянц: Научное руководство, Написание – рецензирование и редактирование.

## Литература

- Akhmatzhanova, A., Amutova, F., Nurseitova, M., Delannoy, M., Jurjanz, S., & Konuspayeva, G. (2024). Assessment of the sequestration strategy based on brown coal Shoptkyol to reduce organochlorine pesticides transfer from contaminated soil to hen eggs. In *BIO Web of Conferences* (Vol. 100, p. 02005). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202410002005>
- Altynova, N., Khamdiyeva, O., Garshin, A., Baratzhanova, G., Amirgaliyeva, A., Seisenbayeva, A., ... & Djansugurova, L. (2023). Case-control study of the association between single nucleotide polymorphisms of genes involved in xenobiotic detoxification and antioxidant protection with the long-term influence of organochlorine pesticides on the population of the Almaty region. *Toxics*, *11*(12), 948. <https://doi.org/10.3390/toxics11120948>
- Amutova, F., Delannoy, M., Baubekova, A., Konuspayeva, G., & Jurjanz, S. (2021). Transfer of persistent organic pollutants in food of animal origin—meta-analysis of published data. *Chemosphere*, *262*, 128351. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128351>
- Amutova, F., Jurjanz, S., Akhmetsadykov, N., Kazankapova, M., Razafitianamaharavo, A., Renard, A., ... & Delannoy, M. (2023). Adsorption of organochlorinated pesticides: Adsorption kinetic and adsorption isotherm study. *Results in engineering*, *17*, 100823. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100823>
- Arrebola, J. P., Belhassen, H., Artacho-Cordón, F., Ghali, R., Ghorbel, H., Boussen, H., ... & Olea, N. (2015). Risk of female breast cancer and serum concentrations of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls: a case-control study in Tunisia. *Science of the total environment*, *520*, 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.045>
- Bean, T. G., Arnold, K. E., Lane, J., Pietravalle, S., & Boxall, A. B. (2016). An in vitro method for determining the bioaccessibility of pharmaceuticals in wildlife. *Environmental toxicology and chemistry*, *35*(9), 2349-2357. <https://doi.org/10.1002/etc.3406>
- Collas, C., Gourdine, J. L., Beramice, D., Badot, P. M., Feidt, C., & Jurjanz, S. (2023). Soil ingestion, a key determinant of exposure to environmental contaminants. The case study of chlordecone exposure in free-range pigs in the French West Indies. *Environmental Pollution*, *316*, 120486. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120486>
- Collas, C., Mahieu, M., Tricheur, A., Crini, N., Badot, P. M., Archimède, H., ... & Jurjanz, S. (2019). Cattle exposure to chlordecone through soil intake. The case-study of tropical grazing practices in the French West Indies. *Science of The Total Environment*, *668*, 161-170. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.384>
- Djanganalina, E., Altynova, N., Bakhtiyarova, S., Kapsysheva, U., Zhaksymov, B., Shadenova, E., ... & Djansugurova, L. (2020). Comprehensive assessment of unutilized and obsolete pesticides impact on genetic status and health of population of Almaty region. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *202*, 110905. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110905>
- Fang, M., & Stapleton, H. M. (2014). Evaluating the bioaccessibility of flame retardants in house dust using an in vitro Tenax bead-assisted sorptive physiologically based method. *Environmental science & technology*, *48*(22), 13323-13330. <https://doi.org/10.1021/es503918m>
- Furman, O., Strawn, D. G., Heinz, G. H., & Williams, B. (2006). Risk assessment test for lead bioaccessibility to waterfowl in mine-impacted soils. *Journal of Environmental Quality*, *35*(2), 450-458. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.0316>
- Jondreville, C., Bouveret, C., Lesueur-Jannoyer, M., Rychen, G., & Feidt, C. (2013). Relative bioavailability of tropical volcanic soil-bound chlordecone in laying hens (*Gallus domesticus*). *Environmental Science and Pollution Research*, *20*(1), 292-299. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1010-1>
- Juhasz, A. L., Herde, P., & Smith, E. (2016). Oral relative bioavailability of Dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT) in contaminated soil and its prediction using in vitro strategies for exposure refinement. *Environmental research*, *150*, 482-488. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.06.039>
- Jurjanz, S., Feidt, C., Pérez-Prieto, L. A., Ribeiro Filho, H. M. N., Rychen, G., & Delagarde, R. (2012). Soil intake of lactating dairy cows in intensive strip grazing systems. *Animal*, *6*(8), 1350-1359. <https://doi.org/10.1017/S1751731111002734>
- Kang, Y., Yin, Y., Man, Y., Li, L., Zhang, Q., Zeng, L., ... & Wong, M. H. (2013). Bioaccessibility of polychlorinated biphenyls in workplace dust and its implication for risk assessment. *Chemosphere*, *93*(6), 924-930. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.05.057>
- Konuspayeva, G., Jurjanz, S., Loiseau, G., Barci, V., Akhmetsadykova, S., Meldebekova, A., & Faye, B. (2011). Contamination of camel milk (heavy metals, organic pollutants and radionuclides) in Kazakhstan. *J. Environ. Prot. (Irvine, Calif)*, *2*(1), 90-96. <http://dx.doi.org/10.4236/jep.2011.21010>
- Levengood, J. M., & Skowron, L. A. (2001). Use of a simulated gizzard to measure bioavailability of metals and other elements to waterfowl. *Ecotoxicology*, *10*(5), 299-304. <https://doi.org/10.1023/a:1016763418647>
- Li, C., Teng, Y., & Ma, L. Q. (2015). Tenax as sorption sink for in vitro bioaccessibility measurement of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils. *Environmental Pollution*, *196*, 47-52. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.09.016>
- Li, C., Xu, S., Guan, D. X., Chen, X. X., & He, H. (2022). Assessment of DDT and its metabolites bioaccessibility in historically contaminated soils using unfed and fed in vitro methods. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, *108*(4), 672-677. <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03420-3>
- Li, C., Xu, S., Guan, D. X., Chen, X., & He, H. (2023). Comparison of in vitro strategies for predicting Dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT) and its metabolites bioavailability from soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *256*, 114885. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114885>
- Lu, M., Li, G., Yang, Y., & Yu, Y. (2021). A review on in-vitro oral bioaccessibility of organic pollutants and its application in human exposure assessment. *Science of the Total Environment*, *752*, 142001. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142001>
- Martinez-Haro, M., Taggart, M. A., Green, A. J., & Mateo, R. (2009). Avian digestive tract simulation to study the effect of grit geochemistry and food on Pb shot bioaccessibility. *Environmental science & technology*, *43*(24), 9480-9486. <https://doi.org/10.1002/etc.3406>

Nurzhanova, A. A., Inelova, Z. A., Djansugurova, L. B., Nesterova, S. G., Mit, N. V., Zhubanova, A. A., ... & Bekmanov, B. O. (2018). The problem of unutilized and banned pesticides in Kazakhstan. *News Natl. Acad. Sci. Repub. Kazakhstan. Ser. Biol. Med*, 4, 86-96.

Nurzhanova, A., Kalugin, S., & Zhambakin, K. (2013). Obsolete pesticides and application of colonizing plant species for remediation of contaminated soil in Kazakhstan. *Environmental science and pollution research*, 20(4), 2054-2063. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1111-x>

Nurzhanova, A., Kulakow, P., Rubin, E., Rakhimbayev, I., Sedlovskiy, A., Zhambakin, K., ... & Erickson, L. (2010). Obsolete pesticides pollution and phytoremediation of contaminated soil in Kazakhstan. *Application of phytotechnologies for cleanup of industrial, agricultural, and wastewater contamination*, 87-111. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-3592-9\\_6](https://doi.org/10.1007/978-90-481-3592-9_6)

Oomen, A. G., Tolls, J., Kruidenier, M., Bosgra, S. S., Sips, A. J., & Groten, J. P. (2001). Availability of polychlorinated biphenyls (PCBs) and lindane for uptake by intestinal Caco-2 cells. *Environmental Health Perspectives*, 109(7), 731. <https://doi.org/10.1289/ehp.01109731>

Pan, W., Kang, Y., Zeng, L., Zhang, Q., Luo, J., & Wong, M. H. (2016). Comparison of in vitro digestion model with in vivo relative bioavailability of BDE-209 in indoor dust and combination of in vitro digestion/Caco-2 cell model to estimate the daily intake of BDE-209 via indoor dust. *Environmental Pollution*, 218, 497-504. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.07.029>

Parada Jr, H., Wolff, M. S., Engel, L. S., White, A. J., Eng, S. M., Cleveland, R. J., ... & Gammon, M. D. (2016). Organochlorine insecticides DDT and chlordane in relation to survival following breast cancer. *International journal of cancer*, 138(3), 565-575. <https://doi.org/10.1002/ijc.29806>

Pinto, C. G., Laespada, M. E. F., Martín, S. H., Ferreira, A. M. C., Pavón, J. L. P., & Cordero, B. M. (2010). Simplified QuEChERS approach for the extraction of chlorinated compounds from soil samples. *Talanta*, 81(1-2), 385-391. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2009.12.013>

Sailaukhanuly, Y., Carlsen, L., Tulegenov, A., Nurzhanova, A., Kenessov, B., & Kamysbayev, D. (2016). Distribution and risk assessment of selected organochlorine pesticides in Kyzyl Kairat village from Kazakhstan. *Environmental monitoring and assessment*, 188(6), 358. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5353-9>

Shen, B., Wu, J., Zhan, S., & Jin, M. (2021). Residues of organochlorine pesticides (OCPs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in waters of the Ili-Balkhash Basin, arid Central Asia: Concentrations and risk assessment. *Chemosphere*, 273, 129705. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129705>

Solis-Cruz, B., Hernandez-Patlan, D., Beyssac, E., Latorre, J. D., Hernandez-Velasco, X., Merino-Guzman, R., ... & López-Arellano, R. (2017). Evaluation of chitosan and cellulosic polymers as binding adsorbent materials to prevent aflatoxin B1, fumonisin B1, ochratoxin, trichothecene, deoxynivalenol, and zearalenone mycotoxins through an in vitro gastrointestinal model for poultry. *Polymers*, 9(10), 529. <https://doi.org/10.3390/polym9100529>

Tang, X. Y., Tang, L., Zhu, Y. G., Xing, B. S., Duan, J., & Zheng, M. H. (2006). Assessment of the bioaccessibility of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from Beijing using an in vitro test. *Environmental Pollution*, 140(2), 279-285. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.07.010>

Tao, S., Lu, Y., Zhang, D., Yang, Y., Yang, Y., Lu, X., & Sai, D. (2009). Assessment of oral bioaccessibility of organochlorine pesticides in soil using an in vitro gastrointestinal model. *Environmental science & technology*, 43(12), 4524-4529. <https://doi.org/10.1021/es900188c>

Toleubayev, K., Jansen, K., & Van Huis, A. (2011). From integrated pest management to indiscriminate pesticide use in Kazakhstan. *Journal of Sustainable Agriculture*, 35(4), 350-375. <https://doi.org/10.1080/10440046.2011.562036>

Travel, A., Fournier, A., Marchand, P., Venisseau, A., Le Bouquin, S., Allain, V., ... & Jondreville, C. C. (2012). Transfert de polluants organiques persistants vers l'œuf de consommation: état des lieux, modalités et facteurs de risques. *Innovations Agronomiques*, 25, 313-330. <https://dx.doi.org/10.17180/rgh1-6c98>

Tulibayev, S. (2022). Implementation of Multilateral Environmental Agreements in Kazakhstan. *JE Asia & Int'l L.*, 15, 365.

Wang, W., Huang, M. J., Zheng, J. S., Cheung, K. C., & Wong, M. H. (2013). Exposure assessment and distribution of polychlorinated biphenyls (PCBs) contained in indoor and outdoor dusts and the impacts of particle size and bioaccessibility. *Science of the total environment*, 463, 1201-1209. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.04.059>

#### **Сведения об авторах:**

А.Қ. Ахатжанова (корреспондентный автор) – младший научный сотрудник, ТОО НПП «Антиген», докторант кафедры биотехнологии, Казахский Национальный университет имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: ahatzhana@gmail.com).

Ф.Б. Амутова – PhD, заведующий лабораторией, ТОО НПП «Антиген» (Алматы, Казахстан, e-mail: amutovafb@gmail.com).

М.Н. Нурсеитова – PhD, старший научный сотрудник, ТОО НПП «Антиген» (Алматы, Казахстан, e-mail: mnurseitova1@gmail.com).

Н.Н. Ахметсадыков – д.в.н., профессор, ТОО НПП «Антиген» (Алматы, Казахстан).

Г.С. Конуспаева – PhD, профессор кафедры биотехнологии, Казахский Национальный университет имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: konuspaevags@hotmail.fr).

С. Юрьянц – PhD, HDR, ассоц. Профессор, лаборатория Животные и АгроЭкосистемы, Университет Лотарингии (Нанси, Франция, e-mail: stefan.jurjan@univ-lorraine.fr).

**Авторлар туралы мәлімет:**

А.Қ. Ахатжанова (корреспонденттік автор) – кіші ғылыми қызметкер, «Антиген» Ғылыми-өндірістік кәсіпорны ЖШС, биотехнология кафедрасының докторанты, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: ahatzhana@gmail.com).

Ф.Б. Амутова – PhD, лаборатория меңгерушісі, «Антиген» Ғылыми-өндірістік кәсіпорны ЖШС (Алматы, Қазақстан, e-mail: amutovafb@gmail.com).

М.Н. Нурсейтова – PhD, аға ғылыми қызметкер, «Антиген» Ғылыми-өндірістік кәсіпорны ЖШС (Алматы, Қазақстан, e-mail: mnurseitova1@gmail.com).

Н.Н. Ахметсадыков – в.з.д., профессор, «Антиген» Ғылыми-өндірістік кәсіпорны ЖШС (Алматы, Қазақстан).

Г.С. Коңуспаева – PhD, биотехнология кафедрасының профессоры, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: konuspaevags@hotmail.fr).

С. Юръянц – PhD, HDR, қауымдастырылған профессор, Жануар және АгроЭкожүйелер лабораториясы, Лотарингия Университеті (Нанси, Франция, e-mail: stefan.jurjanz@univ-lorraine.fr).

**Information about the authors:**

Arailym Akhatzhanova (corresponding author) – junior researcher, “Scientific and production enterprise Antigen” LLP, PhD student of the department of Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National university (Almaty, Kazakhstan, e-mail: ahatzhana@gmail.com).

Farida Amutova – PhD, Head of the laboratory, “Scientific and production enterprise Antigen” LLP (Almaty, Kazakhstan, e-mail: amutovafb@gmail.com).

Moldir Nurseitova – PhD, senior researcher, “Scientific and production enterprise Antigen” LLP (Almaty, Kazakhstan, e-mail: mnurseitova1@gmail.com).

Nurlan Akhmetsadykov – doctor of veterinarian sciences, professor, “Scientific and production enterprise Antigen” LLP (Almaty, Kazakhstan).

Gaukhar Konuspayeva – PhD, professor of the department of Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National university (Almaty, Kazakhstan, e-mail: konuspaevags@hotmail.fr).

Stefan Jurjanz – PhD, HDR, assoc. professor, laboratory of Animals and AgroEcosystems, University of Lorraine, (Nancy, France, e-mail: stefan.jurjanz@univ-lorraine.fr).

Поступило 13 октября 2025 года

Повторно загружено 20 марта 2026 года

Принято 15 июня 2026 года

**ШОЛУ МАҚАЛАЛАР**



**REVIEW ARTICLES**



**ОБЗОРНЫЕ СТАТЬИ**

**Z.T. Syeda Bukhari** 

Johannes Gutenberg University Mainz, Mainz 55122, Germany

e-mail: dr.syedazanira@gmail.com

## INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR THE MONITORING AND PROTECTION OF PLANTS: FROM MOLECULAR DIAGNOSTICS TO ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Pests and pathogens cause losses estimated at 20–40% of global crop production, and the threat is intensifying under climate change and the globalisation of trade. Meanwhile, traditional methods of plant health monitoring, such as visual symptom inspection and pathogen culturing, are time-consuming, dependent on specialised expertise, and often unable to detect harmful organisms before significant damage occurs. The aim of this review is to provide an integrated account of the innovative technologies transforming the monitoring and protection of plants across three converging domains. The methodology is a structured narrative review of the international literature, organising the technologies into molecular diagnostics, digital monitoring, and artificial intelligence, and analysing their principles, applications, advantages, and limitations. The molecular technologies (PCR and its real-time and isothermal variants, and next-generation sequencing) identify harmful organisms from their nucleic acids with high sensitivity and specificity, increasingly at the point of need; the digital technologies (satellite remote sensing, unmanned aerial vehicles, and the agricultural Internet of Things) observe crops across scales from the region to the individual plant; and artificial intelligence (computer vision, machine learning, and predictive modelling) interprets the resulting data, diagnosing disease, identifying pests, and forecasting phytosanitary risks. The principal finding is that these technologies are complementary rather than competing approaches. Their integration into decision-support systems and digital platforms, together with emerging technologies such as CRISPR-based diagnostics and big data analytics, enables a more proactive, precise, and sustainable approach to plant protection that surpasses conventional methods. The value of the review lies in uniting domains usually treated in isolation, and its practical significance is its contribution to the early detection of threats and the reduction of crop losses essential to food security.

**Keywords:** plant disease diagnosis, molecular diagnostics, remote sensing, deep learning, integrated pest management.

З.Т. Саида Бухари

Иоганн Гутенберг атындағы Майнц университеті, Майнц 55122, Германия

e-mail: dr.syedazanira@gmail.com

### Өсімдіктерді мониторингтеу мен қорғаудың инновациялық технологиялары: молекулалық диагностикадан жасанды интеллектке дейін

Зиянкестер мен патогендер ауыл шаруашылығы дақылдарының әлемдік өндірісінің 20–40 %-ына дейінгі шығындарына себеп болады және бұл қауіп климаттың өзгеруі мен сауданың жаһандануы жағдайында күшейе түсуде. Сонымен қатар, өсімдіктердің денсаулық жағдайын бақылаудың дәстүрлі әдістері, атап айтқанда симптомдарды визуалды анықтау және патогендерді өсіру, көп уақытты қажет етеді, арнайы сараптамалық білімге тәуелді және көбінесе зиянды организмдерді елеулі залал туындағанға дейін анықтауға мүмкіндік бермейді. Осы шолудың мақсаты – өсімдіктерді мониторингтеу мен қорғауды түбегейлі өзгертетін инновациялық технологияларды өзара байланысқан үш бағыт аясында кешенді түрде сипаттау. Зерттеудің әдіснамалық негізі халықаралық ғылыми әдебиеттерге жасалған құрылымдалған шолу болып табылады, оның барысында технологиялар молекулалық диагностика, цифрлық мониторинг және жасанды интеллект бағыттары бойынша жүйеленіп, олардың жұмыс істеу қағидаттары, қолданылу салалары, артықшылықтары мен шектеулері талданды. Молекулалық технологиялар (ПТР, оның нақты уақыттағы және изотермиялық нұсқалары, сондай-ақ жаңа буын секвенирлеу әдістері) нуклеин қышқылдары негізінде зиянды организмдерді жоғары сезімталдықпен және нақтылықпен анықтауға мүмкіндік береді. Цифрлық технологиялар (спутниктік қашықтықтан зондау, ұшқышсыз ұшу аппараттары және ауыл шаруашылығындағы заттар интернеті) егістіктерді өңірлік деңгейден бастап жекелеген өсімдіктерге дейінгі әртүрлі кеңістіктік ауқымда бақылауға мүмкіндік береді. Жасанды интеллект әдістері (компьютерлік

тосанитарлық тәуекелдерді болжау) алынған деректерді талдап, ауруларды диагностикалауды, зиянкестерді анықтауды және фитосанитарлық тәуекелдерді болжауды қамтамасыз етеді. Негізгі қорытынды – бұл технологиялар бір-бірімен бәсекелеспейді, керісінше өзара толықтырады. Оларды шешім қабылдауды қолдау жүйелері мен цифрлық платформаларға біріктіру, сондай-ақ CRISPR негізіндегі диагностика және Big Data технологиялары сияқты жаңа бағыттарды қолдану өсімдіктерді қорғаудың анағұрлым проактивті, дәл және тұрақты тәсілін қалыптастырады. Шолудың ғылыми құндылығы – әдетте жеке қарастырылатын ғылыми бағыттарды біріктіруінде, ал практикалық маңыздылығы – азық-түлік қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін аса маңызды болып табылатын қауіптерді ерте анықтауға және өнім шығындарын азайтуға қосатын үлесінде.

**Түйін сөздер:** өсімдік ауруларын диагностикалау, молекулалық диагностика, қашықтықтан зондау, терең оқыту, зиянкестермен кешенді күрес.

З.Т. Саида Бухари

Майнцский университет имени Иоганна Гутенберга, Майнц 55122, Германия  
e-mail: dr.syedazanira@gmail.com

### **Инновационные технологии мониторинга и защиты растений: от молекулярной диагностики до искусственного интеллекта**

Вредители и патогены вызывают потери, оцениваемые в 20–40% мирового производства сельскохозяйственных культур, причём данная угроза усиливается под воздействием изменения климата и глобализации торговли. В то же время традиционные методы мониторинга здоровья растений, основанные на визуальном выявлении симптомов и культивировании патогенов, являются медленными, зависят от наличия специализированных экспертных знаний и зачастую не позволяют обнаружить вредоносные организмы до возникновения значительного ущерба. Целью настоящего обзора является комплексное представление инновационных технологий, трансформирующих системы мониторинга и защиты растений в рамках трёх взаимосвязанных направлений. Методологической основой исследования послужил структурированный обзор международной научной литературы, предусматривающий классификацию технологий по трём направлениям: молекулярная диагностика, цифровой мониторинг и искусственный интеллект, а также анализ их принципов действия, областей применения, преимуществ и ограничений. Молекулярные технологии (ПЦР, её варианты в режиме реального времени и изотермические методы амплификации, а также секвенирование нового поколения) обеспечивают высокочувствительное и высокоспецифичное выявление вредоносных организмов по их нуклеиновым кислотам непосредственно в месте проведения диагностики. Цифровые технологии (спутниковое дистанционное зондирование, беспилотные летательные аппараты и сельскохозяйственный интернет вещей) позволяют осуществлять наблюдение за посевами на различных пространственных уровнях – от региональных территорий до отдельных растений. Методы искусственного интеллекта (компьютерное зрение, машинное обучение и методы прогнозирования) обеспечивают интерпретацию получаемых данных, диагностику заболеваний, идентификацию вредителей и прогнозирование фитосанитарных рисков. Основным выводом исследования заключается в том, что указанные технологии являются взаимодополняющими, а не конкурирующими подходами. Их интеграция в системы поддержки принятия решений и цифровые платформы в сочетании с перспективными направлениями, такими как диагностика на основе CRISPR и технологии больших данных, обеспечивает более проактивный, точный и устойчивый подход к защите растений, превосходящий традиционные методы. Научная ценность обзора заключается в объединении направлений, которые обычно рассматриваются изолированно друг от друга, а его практическая значимость состоит в содействии раннему выявлению угроз и снижению потерь урожая, что имеет ключевое значение для обеспечения продовольственной безопасности.

**Ключевые слова:** диагностика болезней растений, молекулярная диагностика, дистанционное зондирование, глубокое обучение, интегрированная защита растений.

### **Abbreviations**

PCR – polymerase chain reaction; qPCR – quantitative real-time PCR; RT-PCR – reverse-transcription PCR; LAMP – loop-mediated isothermal amplification; RPA – recombinase polymerase amplification;

NGS – next-generation sequencing; HTS – high-throughput sequencing; CNN – convolutional neural network; UAV – unmanned aerial vehicle; IoT – Internet of Things; NDVI – normalised difference vegetation index; AI – artificial intelligence; DSS – decision-support system; COI – cytochrome c oxidase subunit I.

## Introduction

The plants that feed the world are under continuous assault from a taxonomically diverse assemblage of harmful organisms – fungi and oomycetes, bacteria, viruses and viroids, nematodes, and insect pests – whose cumulative effect upon agricultural production is immense. An expert-based global assessment estimated mean yield losses to pathogens and pests of 21.5% for wheat, 30.0% for rice, 22.5% for maize, 17.2% for potato, and 21.4% for soybean, with the heaviest burdens falling upon the food-deficit regions least able to absorb them (Savary et al., 2019). The Food and Agriculture Organization estimates that up to 40% of global crop production is lost annually to plant pests and diseases, at a cost exceeding 220 billion United States dollars for plant diseases alone (FAO, 2021). These losses are not static: the changing climate is reshaping the geography of plant disease, with pests and pathogens observed to have shifted polewards at a mean rate of approximately 2.7 kilometres per year since 1960 (Bebber et al., 2013), and modelling projects further substantial reorganisation of the global pattern of infection risk through the present century (Chaloner et al., 2021).

Against this background, the timely and accurate detection of harmful organisms is of the first importance, for the early identification of a threat – before symptoms appear, before an epidemic develops, before an invasive species becomes established – may determine whether it is contained or allowed to spread. Yet the traditional methods of monitoring plant health are poorly suited to this task. The visual inspection of plants for the symptoms of disease depends upon the appearance of those symptoms, which may lag the infection by days or weeks, and upon the scarce expertise required to interpret them; the culture and the microscopic examination of pathogens are slow, demanding of specialised skill, and inapplicable to the many organisms that cannot be cultured; and the serological methods, though valuable, are frequently insufficiently sensitive to detect organisms present in small numbers or at early stages, and unable to discriminate closely related strains. These limitations – of speed, of sensitivity, of specificity, of scalability, and of dependence upon scarce expertise – have motivated the development of the innovative technologies that this review surveys.

The object of this review is the body of innovative technologies for the monitoring and protection of plants; its subject is their principles, applications,

and integration. The aim is to provide an integrated account spanning the molecular, the digital, and the artificial-intelligence domains, which have hitherto frequently been treated in isolation, and to show that their integration – rather than the isolated application of any one – is the distinguishing achievement and the principal promise of the contemporary science of plant protection. The scientific significance of the review lies in this synthesis; its practical significance lies in the contribution of these technologies to the early detection of threats and the reduction of the crop losses upon which the security of the world's food supply depends.

The literature on the innovative technologies of plant protection has grown rapidly across three largely separate communities. In molecular diagnostics, foundational work established the polymerase chain reaction and, subsequently, its real-time quantitative form as the standard for sensitive and specific pathogen detection, while the introduction of loop-mediated isothermal amplification opened the way to field-deployable, instrument-light diagnosis, and the advent of high-throughput sequencing extended detection to the untargeted discovery of novel and unexpected agents. In digital monitoring, the literature on precision agriculture and remote sensing has documented the observation of crop condition across scales from the satellite to the unmanned aerial vehicle and the in-field sensor network. In artificial intelligence, a large body of work has demonstrated the diagnosis of plant disease from images by deep convolutional networks, the identification of pests, and the forecasting of phytosanitary risk.

The scientific contribution of these bodies of work is considerable, yet they have for the most part developed independently, each community advancing its own technologies with limited reference to the others. The principal gap that the present review addresses is the absence of an integrated account that unites the molecular, the digital, and the artificial-intelligence domains and that emphasises their complementarity and their integration – the union of the molecular identification of a pathogen with the digital mapping of its spread, and the interpretation of both by artificial intelligence – as the distinguishing feature and the principal promise of the contemporary field. This review draws together more than forty international studies across the three domains, analyses their respective contributions, and synthesises them into a unified account directed at that integration.

Several strands of this literature bear directly upon the present synthesis. The foundational work

on DNA barcoding established that a short, standardised gene sequence can serve as a universal identifier of species, furnishing the conceptual basis for the molecular identification of pests and pathogens alike (Hebert et al., 2003). The reviews of molecular diagnostics have charted the progression from the enzyme-linked immunosorbent assay to the polymerase chain reaction and, latterly, to next-generation sequencing, documenting at each step gains in sensitivity, specificity, and breadth of detection (Boonham et al., 2014; Hariharan & Prasanath, 2021). In parallel, the surveys of artificial intelligence in agriculture have catalogued the rapid displacement of hand-designed image features by learned representations, and the consequent transformation of automated disease diagnosis (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018). What unites these separate literatures, and what this review seeks to make explicit, is that each addresses a different facet of a single problem – the timely, accurate, and scalable detection of threats to the plant – and that their convergence is therefore not incidental but necessary.

### Materials and methods

This work is a structured narrative review of the international scientific literature on innovative technologies for plant monitoring and protection. The research question guiding the review was how molecular, digital, and artificial intelligence technologies function in plant protection, what their respective strengths and limitations are, and how their integration may provide a more effective and sustainable approach to plant protection than the isolated application of any single technology.

The review was conducted by identifying, across the three domains, foundational studies, landmark methodological papers, principal application studies, and relevant recent publications from the international peer-reviewed literature. The technologies were organised into three groups – molecular diagnostics, digital monitoring, and artificial intelligence – and analysed according to their underlying principles, applications in the detection and management of phytopathogens and pests, demonstrated performance, and limitations. The analysis subsequently addressed the integration of these domains through decision-support systems, digital platforms, and emerging technological frontiers. Throughout the review, technologies were compared with one another and with the traditional methods they supplement or supersede, and their performance was evaluated ac-

ording to sensitivity, specificity, speed, scalability, cost, and suitability for field deployment.

The literature search was conducted using the Scopus, Web of Science, and PubMed databases, supplemented by Google Scholar. Peer-reviewed publications published primarily between 2016 and 2025 were included, while earlier landmark studies (2000–2015) were selectively incorporated to provide the conceptual and methodological foundations of molecular diagnostics, digital monitoring, and artificial intelligence applications in plant protection. Publications were selected based on their scientific relevance, methodological quality, topical relevance, and practical applicability to plant monitoring and protection technologies.

The assessment criteria were defined as follows: sensitivity referred to the ability to detect an organism present in low abundance or at an early stage; specificity referred to the ability to distinguish target organisms from closely related non-target organisms; speed referred to the time interval between sampling and obtaining results; scalability referred to the ability to extend applications from individual samples to field and regional levels; cost referred to the requirements for equipment, reagents, and specialised expertise; and field-readiness referred to the suitability of technologies for deployment outside laboratory conditions by non-specialist users.

### Results and discussion

The review distinguishes three converging domains of innovative technology – molecular diagnostics, digital monitoring, and artificial intelligence – and their integration. Each is considered in turn.

#### *1. Molecular technologies for the diagnosis of harmful organisms*

The polymerase chain reaction (PCR) remains a workhorse for pathogen diagnostics. PCR can amplify minute amounts of DNA or RNA from a plant sample with high sensitivity and specificity; in practice, primers are designed to match unique pathogen genes, yielding a diagnostic fragment. PCR-based assays have been developed for bacteria (e.g. *Xanthomonas*, *Ralstonia* spp.), fungi (e.g. *Magnaporthe oryzae*), and nematodes. However, PCR requires purified nucleic acids and laboratory thermocyclers and is sensitive to inhibitors in crude samples (Lievens & Thomma, 2005; Boonham et al., 2014). PCR also cannot distinguish live from dead organisms and, by itself, does not quantify pathogen load (Lievens &

Thomma, 2005); furthermore, opening tubes for gel electrophoresis raises the risk of contamination, and PCR must often be followed by post-PCR analysis to confirm results (Boonham et al., 2014).

To address speed and throughput, quantitative real-time PCR (qPCR) uses fluorescent probes or dyes to detect amplification as it happens (Boonham et al., 2014). qPCR removes the need for gel runs and provides enhanced speed and sensitivity relative to conventional PCR (Boonham et al., 2014). It can quantify pathogen DNA, allowing threshold-based decision-making, and typical plant-virus assays are now multiplexed to test several viruses in one tube (Boonham et al., 2014). The trade-offs are higher equipment and reagent cost and the need for skilled operators (Hariharan & Prasannath, 2021). Overall, PCR and qPCR assays remain the gold standard for pathogen confirmation in diagnostic laboratories and are widely used in regulatory testing.

The strengths of the amplification methods rest upon the specificity with which a primer binds only its intended target and the sensitivity with which a single starting molecule may be multiplied into a detectable quantity. These properties allow the detection of a pathogen present in numbers far too small to produce a visible symptom or to be cultured, and the discrimination of closely related organisms – of one species of *Phytophthora* from another, or of a virulent strain from an avirulent one – that the older serological and microbiological methods could not achieve (Lievens & Thomma, 2005). Against these strengths must be set the requirement, in the conventional laboratory format, for extracted and purified nucleic acid, for a thermocycler, and for skilled operators, and the inability of a test designed for one organism to detect any other; the molecular methods are powerful precisely where the target is known and the question is its presence, less so where the task is the discovery of an unknown agent (Lievens & Thomma, 2005; Boonham et al., 2014).

Isothermal methods have emerged to bring PCR-like sensitivity to the field. Loop-mediated isothermal amplification (LAMP) is especially popular in plant pathology, using four or more primers and a strand-displacing polymerase to amplify DNA at a constant temperature of about 60–65 °C (Notomi et al., 2000). Ivanov et al. (2021) describe LAMP as more robust and sensitive than PCR, since it avoids thermocycling and tolerates simpler sample preparation. Reaction times are short (often 10–30 minutes), and amplification can be read by simple visual cues such as turbidity or colorimetric dyes (Ivanov et al., 2021). LAMP can be run on a simple heat

block (Ivanov et al., 2021) and read by eye. Tomlinson et al. (2007) demonstrated early LAMP tests for the oomycete *Phytophthora ramorum* that worked without specialized instruments and allowed naked-eye detection, and Niessen and Vogel (2010) showed that placing a piece of infected barley seed directly into a LAMP mix could reliably detect the fungus *Fusarium graminearum*.

The practical benefits of LAMP are well documented: assays are usually faster than PCR, require a single temperature step, and tolerate inhibitors, so that they can amplify targets from crude plant sap, soil, or tissue without extensive DNA purification. For example, a LAMP test for *Phytophthora capsici* (pepper blight) could detect the pathogen from leaf samples using a simple 5–10 minute crude extraction (Ivanov et al., 2021), and portable LAMP devices now allow DNA-based diagnosis directly in the field (Ivanov et al., 2021). LAMP also has challenges: primer design is complex and error-prone (Ivanov et al., 2021), and the high amplification efficiency makes contamination control critical (Ivanov et al., 2021). Despite these issues, recent surveys list hundreds of LAMP assays targeting fungi, oomycetes, bacteria, viruses, and even pest insects (Ivanov et al., 2021; Hariharan & Prasannath, 2021).

LAMP is not the only isothermal method of importance. Recombinase polymerase amplification (RPA) amplifies DNA at a still lower and gentler temperature, of about 37 to 42 °C – close to body heat, so that in some implementations the warmth of the hand suffices – using a recombinase enzyme to drive the binding of primers in place of the heat of thermocycling (Babu et al., 2018). RPA is rapid, frequently yielding a result within twenty to forty minutes, tolerant of the inhibitors present in crude plant extracts, and readily coupled to a lateral-flow strip for a visual read-out, and it has been applied to the detection of a range of plant viruses, bacteria, and fungi in field-deployable formats (Babu et al., 2018; Ivanov et al., 2021). Its chief limitations are the comparative complexity and cost of its proprietary reagents and the care its primer and probe design demands; nonetheless, together with LAMP it constitutes the foundation of the field-deployable molecular diagnosis of plant disease, and the coupling of either method to a CRISPR-based read-out, considered below, is among the most promising recent developments (Babu et al., 2018; Ivanov et al., 2021).

High-throughput sequencing, often called next-generation sequencing (NGS), has revolutionized pathogen detection and surveillance. Unlike target-

ed assays, sequencing can survey all nucleic acids in a sample, identifying both known and novel agents and several pathogens simultaneously (Boonham et al., 2014). NGS technologies (Illumina, Oxford Nanopore, PacBio, and others) produce millions of reads in parallel, enabling comprehensive analysis of plant-associated microbiomes and pathogen populations; entire viral genomes are routinely assembled from infected plant samples, facilitating the surveillance of emerging variants. Metagenomic sequencing is especially powerful, for it can detect any pathogen – virus, bacterium, fungus, or nematode – present in a sample without prior knowledge, and Boonham et al. (2014) cite studies in which NGS was used to monitor pathogen evolution and disease spread. The data load and complexity are challenges, but the power of the technology is undisputed.

The power of sequencing for the discovery of the unknown deserves emphasis, for it marks a genuine departure from the targeted methods. A metagenomic analysis, sequencing the total nucleic acid of a sample without prior selection, can in principle detect any organism present – a virus never before described, a bacterium unexpected in the host, a mixed infection of several agents – and so serves not only to confirm a suspected diagnosis but to discover the cause of a disease whose agent is unknown (Boonham et al., 2014). This capacity has transformed plant virology in particular, where the sequencing of total RNA from a symptomatic plant routinely reveals the full complement of viruses it carries, and has been applied to the investigation of disease outbreaks, the certification of planting material, and the surveillance of quarantine pathogens. The obstacles are no longer chiefly those of generating the sequence, which has become rapid and inexpensive, but those of interpreting it: the assembly of the reads, their comparison against reference databases, and the distinction of the pathogen from the innocuous background demand bioinformatic skill and computational resource, and the very sensitivity of the method raises the question of how to interpret the detection of an organism whose role in disease is uncertain (Boonham et al., 2014).

These tools have been applied broadly across pathogen types. In plant virology, multiplex RT-PCR and qPCR assays routinely detect viruses such as *Citrus tristeza virus*, and the methods of virus diagnostics have progressed from serological tests such as ELISA through PCR to next-generation sequencing (Boonham et al., 2014); bacterial pathogens such as *Ralstonia solanacearum* and *Xanthomonas oryzae* are detected by qPCR with high

accuracy (Hariharan & Prasannath, 2021). In fungal and oomycete disease, numerous LAMP assays exist for pathogens such as *Phytophthora* spp., *Fusarium* spp., and *Puccinia* spp. (Tomlinson et al., 2007; Hariharan & Prasannath, 2021), and LAMP can detect wheat rust pathogens such as *Puccinia striiformis* one to two days after infection, before symptoms are visible (Ivanov et al., 2021). Insect pests are also diagnosed molecularly: Agarwal et al. (2020) designed a LAMP assay targeting the mitochondrial COI gene of the grape phylloxera (*Daktulosphaira vitifoliae*), and Agarwal et al. (2023) developed a LAMP test for the Asian citrus psyllid (*Diaphorina citri*). Emerging metabarcoding and metagenomic approaches can screen leaf, soil, or insect-trap samples for pathogens and pests at once, informing integrated pest management (Hebert et al., 2003; Boonham et al., 2014). In sum, molecular diagnostics now cover the full spectrum of plant pathogens and extend into insect-pest monitoring, enabling earlier and more specific detection than visual scouting.

The molecular identification of pests rests upon a foundation laid by DNA barcoding, the proposal that a short, standardised gene sequence – for animals, a region of the mitochondrial cytochrome c oxidase I gene – can serve as a universal marker for the identification of species (Hebert et al., 2003). Because this sequence varies little within a species but appreciably between species, it permits the assignment of an unknown specimen to its species by comparison against a reference library, and so the identification of a pest from a fragment, an egg, or an immature stage that morphology could not resolve. Upon this foundation the field-deployable assays for insect pests have been built, the LAMP tests for the grape phylloxera and the Asian citrus psyllid among them, which target conserved genes and return a species-level identification in minutes without the expertise of a taxonomist (Hebert et al., 2003; Agarwal et al., 2020). The same principle underlies the metabarcoding of environmental samples, in which the barcode regions amplified from the total DNA of a soil, water, or trap sample reveal the assemblage of species present, extending the molecular identification of pests from the individual specimen to the community (figure 1).

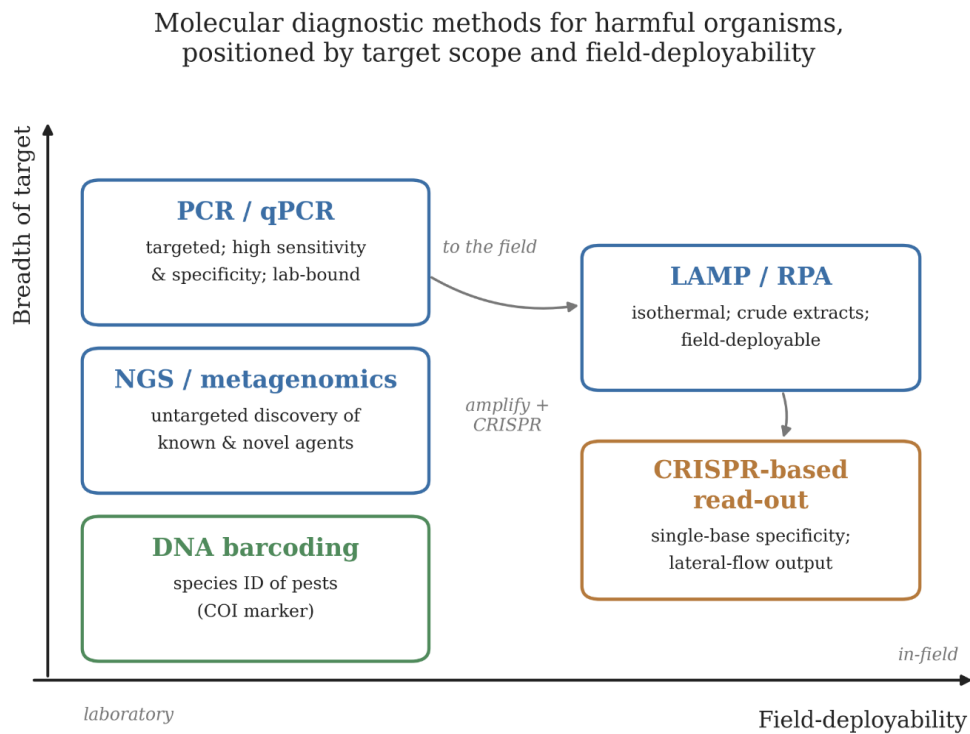
## 2. Digital technologies for the monitoring of plants

Whereas the molecular technologies diagnose harmful organisms from individual samples, the digital technologies of monitoring observe crops

continuously and across large areas, detecting the signs of stress, disease, and infestation and mapping their spatial pattern. They rest upon the principle that the radiation reflected and emitted by vegetation carries information about its physiological condition – healthy vegetation absorbing strongly in the

red, where chlorophyll captures light, and reflecting strongly in the near-infrared, with an abrupt transition, the “red edge,” between them – so that the alterations of the spectral signature that accompany stress may be detected, frequently before symptoms are visible to the eye.

**Figure 1**  
Molecular diagnostic methods for the detection of harmful organisms, positioned by the breadth of their target and their field-deployability



The detection of plant disease by imaging sensors has become a discipline in its own right, drawing together precision agriculture and plant phenotyping, and resting upon the careful study of how the optical properties of a leaf change as infection alters its pigments, its cell structure, and its water content (Mahlein, 2016). These changes are not uniform across the spectrum but concentrated in particular regions, and their pattern differs from one disease to another: the pigments that absorb in the visible region decline as chlorosis and necrosis develop; the internal structure of the leaf, which governs reflectance in the near-infrared, is disrupted as tissue is destroyed; and the water content, which governs absorption in the shortwave infrared, falls as the plant’s water relations are disturbed. Because each pathogen produces its own characteristic progres-

sion of these effects, a sufficiently detailed measurement of the spectral signature can not only detect that a plant is stressed but begin to identify the cause, distinguishing, for example, the net blotch, the rust, and the powdery mildew of barley by the differing shapes of their reflectance curves (Mahlein, 2016; Terentev et al., 2022).

Satellites carrying remote-sensing instruments observe the crops of the entire world from orbit, providing a synoptic view across regions that no other platform can match. Several systems are of particular importance for agriculture: the Landsat programme, continued by Landsat 9 (launched in 2021), provides imagery at 30-metre resolution with a half-century unbroken record; the Sentinel-2 mission of the European Copernicus programme provides imagery at 10- to 20-metre resolution across

thirteen spectral bands – including several red-edge bands – with a five-day revisit interval and free availability; and commercial constellations of small satellites provide imagery at a few metres' resolution with near-daily revisit. The information in reflected radiation is commonly distilled into vegetation indices, of which the normalised difference vegetation index (NDVI) is the most widely used; it rises with the density and vigour of healthy vegetation and falls as vegetation becomes stressed, and its variation across a field or its change over time reveals the spatial and temporal pattern of crop condition (Drusch et al., 2012; Sishodia et al., 2020). The principal contribution of satellites lies in the detection and mapping of stress over large areas; their limitations – a spatial resolution that may be too coarse to resolve the early, patchy onset of disease, a revisit interval that cloud may extend, and the difficulty of distinguishing the specific cause of a detected stress – are addressed, in part, by the aerial and ground-based methods (Sishodia et al., 2020).

The applications of satellite remote sensing in precision agriculture are correspondingly broad, encompassing the assessment of crop biomass and vigour, the estimation of yield, the mapping of soil and water status, the guidance of variable-rate application of inputs, and the detection of the stress imposed by disease, drought, and nutrient deficiency (Sishodia et al., 2020). The limitations of the satellite are, however, equally real. The spatial resolution of the freely available systems may be too coarse to resolve the early, patchy onset of disease within a field; the revisit interval, though short, may be extended by cloud, which obscures the optical view of the surface; and the vegetation indices, while sensitive to the presence of stress, are frequently unable to distinguish its specific cause, since drought, disease, and nutrient deficiency may depress the same index in similar ways. NDVI in particular saturates over dense canopies, losing sensitivity where the vegetation is most vigorous, and declines only after the reduction of chlorophyll is already advanced, so that it may register a problem only once it is well established. These limitations are addressed, in part, by the finer resolution and the richer spectral and thermal information of the aerial and ground-based methods (Sishodia et al., 2020; Mahlein, 2016).

Considered together, the platforms of remote sensing form a continuum of scale, each suited to a different grain of observation, and the art of their application lies in their combination. The satellite surveys the region and the season, detecting the broad patterns of stress and furnishing the long record

against which change may be judged; the drone surveys the field and the day, resolving the patch and the plant and responding to the immediate question; the in-field sensor surveys the point in continuous time, recording the microclimate within the canopy where infection begins. No one of these displaces the others, and the most complete picture of the state of a crop is assembled by drawing upon all three – the satellite to direct attention, the drone to localise and characterise, the sensor to monitor the conditions that govern the course of disease (Drusch et al., 2012; Sishodia et al., 2020; Farooq et al., 2019). The integration of these complementary scales of observation, and of the optical, spectral, and thermal information they gather, is among the principal achievements of digital crop monitoring and a foundation of the integrated protection considered later in this review.

Between the satellite and the in-field sensor lies the unmanned aerial vehicle (UAV), or drone, which observes the crop from low altitude with a detail and a flexibility that neither satellite nor ground sensor can provide, resolving features of the order of centimetres and so detecting the early, localised onset of disease that the coarser resolution of a satellite would miss. Drones carry payloads of multispectral, hyperspectral, and thermal sensors, and the images they capture are commonly assembled by photogrammetry into a single high-resolution map of the field. Multispectral imaging measures reflectance in a few broad bands, sufficient to compute the principal vegetation indices; hyperspectral imaging measures reflectance in hundreds of narrow, contiguous bands, permitting the detection of subtle and specific spectral features that distinguish one cause of stress from another and that may reveal disease at an early stage, the red-edge region being of particular value; and thermal imaging detects the canopy temperature governed chiefly by transpiration, serving as a sensitive indicator of the water stress and disturbances of water relations that accompany many diseases, frequently before visible symptoms appear. Studies of the cereal rusts and of many other diseases have shown that hyperspectral data, combined with machine learning, can distinguish diseased from healthy plants before symptoms are visible to the eye (Terentev et al., 2022).

The hyperspectral approach has been developed into a sophisticated body of technique, in which the hundreds of measured wavebands are reduced, by the methods of statistics and machine learning, to the few that best discriminate a given disease, and combined into spectral disease indices tailored to

particular pathogens (Mahlein et al., 2018). By these means, studies of the cereal rusts and of many other diseases have shown that hyperspectral data can detect infection at an early stage, identify which disease is present, and quantify its severity. The transfer of these methods from the controlled conditions of the laboratory and the glasshouse to the variable conditions of the field remains, however, a substantial challenge, for the changing illumination, the mixed background, and the natural variability of the crop all complicate the spectral signal; the bridging of this gap between laboratory and field is among the central practical problems of sensor-based phytopathology (Mahlein et al., 2018; Terentev et al., 2022).

The unmanned aerial vehicle has, in the space of a decade, passed from a research curiosity to a practical instrument of crop monitoring, and the reasons for its rise are instructive. It occupies a niche of resolution and flexibility that neither the satellite nor the ground sensor can fill: flying below the cloud that obscures the satellite, it is unconstrained by the revisit schedule of an orbit and may be dispatched whenever and wherever it is needed; flying above the crop, it surveys in a single flight an area that would take a person days to walk; and resolving features of the order of centimetres, it discerns the early and localised onset of disease that the coarser satellite would average away. Its payload may be chosen to the task – a multispectral camera for the routine computation of vegetation indices, a hyperspectral sensor for the discrimination of specific diseases, a thermal camera for the detection of water stress – and the imagery it gathers is assembled by photogrammetry into a map of the whole field, within which the distribution of stress may be read at a glance (Mahlein et al., 2018; Terentev et al., 2022). Its limitations are those of endurance, of payload, of the regulation of airspace, and of the labour of flying and of processing the imagery, but within these bounds it has become a central instrument of precision crop protection.

Thermal imaging deserves particular notice, for it exploits a different physical principle from the optical methods and so furnishes information complementary to theirs. The temperature of a leaf is governed largely by transpiration, the evaporation of water from its surface, which cools it as perspiration cools the skin; when a plant closes its stomata in response to water stress, or when disease disrupts its water relations, transpiration falls and the leaf warms. Because this response frequently precedes any visible symptom and any change in the optical

reflectance, a thermal camera can in principle reveal stress at a very early stage, and the canopy temperature, measured against the temperature of the air, has been used as an indicator of water status and of the disturbances that accompany many diseases (Mahlein, 2016). The interpretation of thermal imagery is complicated, however, by the many factors other than disease that influence leaf temperature – the ambient temperature, the humidity, the wind, the radiation of the sun – so that thermal data are most powerful when combined with the optical and the spectral, each sensor compensating for the blind spots of the others (Mahlein et al., 2018).

The continuous acquisition of data from the field is accomplished increasingly through the agricultural Internet of Things (IoT) – the extension of network connectivity to the sensors and devices distributed throughout the agricultural environment. An IoT system comprises a perception layer of sensors measuring temperature, humidity, leaf wetness, soil moisture, and other variables; a communication layer, frequently a low-power wide-area network such as LoRaWAN that transmits small quantities of data over several kilometres at very low power; and an application layer that stores, processes, and acts upon the data. Networks of microclimate sensors supply the data required by the disease-forecasting models that predict the risk of infection and guide the timing of protective measures, while automated monitoring systems – among them the camera-equipped “smart traps” that capture images of the insects they catch and transmit them for automatic identification and counting – replace the laborious manual inspection by which pest populations have traditionally been monitored, providing a continuous and timely picture of pest abundance and distribution (Liakos et al., 2018; Wolfert et al., 2017; Soussi et al., 2024).

The architecture of such systems is commonly described in terms of layers: a perception layer of sensors measuring temperature, humidity, leaf wetness, soil moisture, light, and other variables; a network layer that conveys the measurements, frequently by a low-power wide-area network such as LoRaWAN that transmits small quantities of data over several kilometres at very low power, suiting the dispersed and power-constrained conditions of the farm; and an application layer that stores, processes, and acts upon the data, increasingly with the support of cloud computing and data analytics (Farooq et al., 2019). The connection of this architecture to cloud computing and big-data analytics is what converts a scattering of measurements into

a coherent picture of the state of the crop, and its integration supports the broader enterprise of precision agriculture, in which inputs are applied not uniformly but in proportion to local need, reducing both cost and environmental burden (Farooq et al., 2019; Soussi et al., 2024).

The choice among the imaging methods involves a characteristic trade-off between the richness of the spectral information and the practicality of its acquisition and analysis. Multispectral imaging, measuring a few broad bands, yields data that are compact, readily processed, and sufficient for the computation of the principal vegetation indices, and it is for these reasons the most widely deployed; its limitation is that the few broad bands cannot resolve the fine spectral features by which one cause of stress is distinguished from another. Hyperspectral imaging, measuring hundreds of narrow and contiguous bands, captures the full shape of the reflectance curve and so permits the detection and identification of specific diseases, but at the cost of instruments more expensive and delicate, data far larger and more complex, and analyses that demand the methods of machine learning to extract the few informative bands from the many (Mahlein et al., 2018; Terentev et al., 2022). The history of sensor-based phytopathology may be read, in part, as the search for the point of balance between these competing virtues, and as the gradual descent of hyperspectral capability from the laboratory toward the affordable field instrument (Mahlein, 2016; Mahlein et al., 2018).

The normalised difference vegetation index, for all its ubiquity, is but one of a family of vegetation indices, and its limitations have driven the development of others suited to particular purposes. The index saturates over dense canopies, losing its sensitivity precisely where the vegetation is most vigorous, and it responds to a fall in chlorophyll only once that fall is well advanced, so that it may register a disease only after the damage is done; it cannot, moreover, distinguish the cause of a depression in greenness, which drought, disease, and nutrient deficiency may all produce (Sishodia et al., 2020). The remedies are indices tuned to other features of the reflectance: those exploiting the red edge, the steep transition between the red and the near-infrared, which respond to chlorophyll content with greater sensitivity and at an earlier stage; those exploiting the shortwave infrared, which respond to the water content of the canopy and so to the water stress that accompanies many diseases; and the spectral disease indices, derived from hyperspectral data, which

combine the particular wavebands that best distinguish a given pathogen (Mahlein et al., 2018; Sishodia et al., 2020). The proliferation of these indices reflects the central lesson of the field, that no single measure captures the whole of a plant's condition, and that the detection and identification of disease are best served by the combination of complementary measures (Mahlein, 2016; Mahlein et al., 2018).

A recurring consequence of all these technologies is the generation of data in quantities that exceed by far the capacity of any person to examine, and the resulting deluge is at once the great opportunity and the great challenge of digital monitoring (Singh et al., 2016). A single drone flight may yield thousands of images; a network of in-field sensors may report continuously through a growing season; a satellite constellation may revisit a field every few days for years. The value latent in such data is realised only through the methods of data assimilation, feature extraction, and machine learning that turn raw measurement into useful knowledge, and the development of these methods has therefore advanced in step with the sensors themselves, the one without the other being of little use (Singh et al., 2016; Liakos et al., 2018). It is at this junction – where the data of the digital sensors meet the methods of artificial intelligence – that the monitoring of plants passes into their intelligent interpretation, the subject of the section that follows.

### *3. Artificial intelligence in plant protection*

The digital technologies generate data far exceeding the capacity of any person to examine, and the conversion of this data into useful knowledge – the detection of disease, the identification of pests, the prediction of outbreaks – is accomplished increasingly by artificial intelligence (AI), and above all by the methods of machine learning, which learn from data to perform tasks formerly requiring human expertise. The visual diagnosis of plant disease by computer has been among the most successful applications, transformed over the past decade by deep learning, which dispenses with the manual design of image features, learning instead, directly from labelled images, both the features relevant to the task and the rule for classifying them. The networks best suited to this task are the convolutional neural networks (CNNs), whose design exploits the spatial structure of images, building from the raw image a hierarchy of features of increasing abstraction (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018).

The training of such networks from scratch demands very large collections of labelled images and

great computational resources, and the dominant practical technique is therefore transfer learning, in which a network already trained upon a vast general collection of images is adapted, by further training upon a smaller collection of plant images, to the particular task of disease diagnosis (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018). The application of machine learning across agriculture has, more broadly, grown rapidly and now encompasses not only the diagnosis of disease but the prediction of yield, the detection of weeds, the management of soil and water, and the recognition of animal and plant stress, drawing upon the full range of learning methods, from the support-vector machine and the random forest to the deep neural network (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018; Liakos et al., 2018).

The accuracy attained by convolutional networks under controlled conditions has been remarkable. A landmark study applied convolutional networks to the PlantVillage dataset – over 54,000 images of leaves spanning 38 classes of crop and disease – and reported, for the best network trained by transfer learning, an accuracy exceeding 99% in assigning an image to the correct class (Mohanty et al., 2016). Subsequent studies have repeatedly reported accuracies of comparable magnitude across larger collections and a succession of architectures (Ferentinos, 2018), and systematic comparisons of the principal network architectures have found the deeper and more modern of them, such as the densely connected networks, to attain accuracies approaching the ceiling of the benchmark datasets, in one careful comparison reaching 99.75% (Too et al., 2019). These results require an important caution, however: the high accuracies were attained largely upon images captured under controlled and uniform conditions, and the same networks, applied to images captured under the variable conditions of the field, have frequently performed far less well – the landmark study itself found accuracy falling to around a third upon images from different sources (Mohanty et al., 2016). The narrowing of this gap, through the assembly of representative collections of field images, through transfer learning and data augmentation, and through the retention of human oversight, is the central practical challenge of the field. The opacity of the deep network, which cannot of itself explain its judgements, is a further limitation that the methods of explainable artificial intelligence seek to address.

The distinction among the principal types of task that these networks perform is worth drawing, for it bears upon their application. Classification

networks assign a whole image to a category, answering the question of which disease, if any, a leaf displays; detection networks locate and delimit the objects of interest within a larger image, drawing a box about each diseased region or each insect; and segmentation networks classify the image pixel by pixel, delineating exactly the diseased area and so permitting the quantification of severity. Each type has its place in plant protection, and the literature documents the rapid development of all three, with a clear trend toward models that are at once more accurate, smaller, and faster, and so better suited to deployment upon the modest hardware of a field device (Liu & Wang, 2021). These tasks may be situated within a broader scheme of the decision cycle of plant stress phenotyping, which distinguishes the identification of a stress, its classification by type, the quantification of its severity, and the prediction of its development – a framework that has helped to organise the application of machine learning across the whole of crop research and breeding, not the diagnosis of disease alone (Singh et al., 2016).

The forecasting of disease repays a closer look, for it brings together the data of monitoring and the understanding of biology in a manner that exemplifies the integration this review commends. The process-based models, grounded in the biology of the pathogen, compute from the recorded course of temperature, humidity, and leaf wetness the progress of infection through its stages – the germination of a spore, the penetration of the host, the development of the lesion, the production of the next generation of spores – and so predict, from the weather alone, the periods of greatest risk (González-Domínguez et al., 2023). The empirical models, by contrast, learn the relationship between conditions and disease from historical records, and the methods of machine learning have enlarged the scope and the accuracy of this approach, integrating the many variables that bear upon risk and discerning patterns too complex for a person to formulate (González-Domínguez et al., 2023; Liakos et al., 2018). The two traditions are complementary, the mechanistic understanding lending interpretability and generality to the data-driven model, the data correcting and refining the mechanistic one, and their combination, fed by the real-time data of the agricultural Internet of Things, promises forecasts grounded at once in biology and in the conditions actually obtaining within a particular crop (González-Domínguez et al., 2023; Farooq et al., 2019).

A recurring theme across all these applications is the gap between performance under controlled

conditions and performance in the field, and the recognition of this gap has reshaped the priorities of the field (Barbedo, 2016). The difficulty is not chiefly the design of the network but the data upon which it is trained: a model trained upon clean images of detached leaves against a uniform background learns features that do not transfer to the cluttered, variably lit, multiply infected scenes of the real crop. The remedies are several – the assembly of large datasets of genuine field images, the augmentation of training data to embrace the variability of real conditions, the use of transfer learning to make the most of limited labelled data, and the careful validation of models upon images genuinely independent of those used in training – but the gap has not been closed, and the prudent deployment of these systems retains a place for human judgement (Barbedo, 2016; Mohanty et al., 2016).

The opacity of the deep network – its tendency to deliver a judgement without disclosing the grounds upon which it rests – is a limitation of particular consequence in a domain where the cost of error is a misdirected or omitted treatment. A network may attain high accuracy upon a benchmark yet rest its decisions upon features irrelevant to the disease, such as the lighting or the background of the training images, and so fail unpredictably upon new data. The methods of explainable artificial intelligence seek to open this black box, among them the techniques that highlight the regions of an image upon which a classification turns, allowing a human expert to judge whether the network attends to the symptom or to some artefact; such visualisation both builds the trust necessary for adoption and exposes the failures of reasoning that bare accuracy conceals (Singh et al., 2016; Barbedo, 2016). The retention of human oversight, informed by these methods, is widely held to be the prudent course in the present state of the art.

Underlying all these considerations is the question of data, which has come to be seen as more decisive than the choice of network architecture. The training of a deep network demands a large collection of images, each labelled with the correct diagnosis, and the quality of the resulting model is bounded by the quality and representativeness of this collection. The early successes of the field rested upon collections of images captured under controlled conditions, which proved a frail foundation for application in the variable field; the present effort is therefore directed at the assembly of large datasets of genuine field images, embracing the diversity of crop, of disease stage, of lighting, and of

background that the real world presents, and at the techniques – data augmentation, transfer learning, and the generation of synthetic images – by which the most may be made of the labelled data available (Liu & Wang, 2021; Singh et al., 2016). The labelling of these images, which requires expert knowledge and great labour, remains a principal bottleneck, and the sharing of curated datasets among researchers is accordingly of considerable value to the field (Mohanty et al., 2016; Liu & Wang, 2021).

The same methods serve for the recognition of insect and other animal pests, though the task is more demanding, since pests are often small, diverse, variable through their life cycle, and set against a complex and cluttered background (Barbedo, 2016). For the location and counting of pests within an image, the object-detection networks are employed, and among them the single-stage detectors of the YOLO family are favoured for their speed, which permits detection in real time and so suits the processing of the continuous stream of images from a camera trap (Liu & Wang, 2021). The camera-equipped smart trap, which captures and transmits images for automatic identification and counting, provides a continuous monitoring of pest populations far less laborious than the manual inspection of traps, and a particular value lies in the early detection of invasive and quarantine pests, whose interception before establishment is the foremost object of phytosanitary security (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018; Liu & Wang, 2021).

The automatic monitoring of insect pests illustrates with particular clarity the convergence of the digital sensor and the artificial intelligence that interprets its output. The traditional monitoring of pest populations rests upon traps that must be visited, emptied, and their catch identified and counted by a person – a labour so demanding that it is performed infrequently and over few sites, yielding a picture of pest abundance that is coarse in both space and time. The camera-equipped smart trap replaces this labour with automation: it photographs the insects it catches, transmits the images for analysis, and applies an object-detection network to identify and count them, returning a continuous and spatially detailed record of pest abundance without the visit of a person (Liu & Wang, 2021). The value of such monitoring is greatest for the invasive and quarantine pests whose early interception is the object of phytosanitary security, for a network of smart traps may detect the first arrival of a threat in time for its containment, and the same network, reporting continuously, may track the progress of an established

pest and inform the timing of its control (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018; Liu & Wang, 2021). The challenges are those of the reliable identification of small and similar species under field conditions, and of the power and connectivity that a remote trap requires, but the principle is established and its adoption is spreading.

The broader application of machine learning across agriculture, surveyed in the recent literature, encompasses not only the diagnosis of disease but the prediction of yield, the detection of weeds, the management of soil and water, and the recognition of animal and plant stress, and it draws upon the full range of learning methods, from the support-vector machine and the random forest to the deep neural network (Liakos et al., 2018). The value of these methods grows with the volume and variety of the data available to them, and the convergence of machine learning with the data streams of precision agriculture – the imagery of satellites and drones, the measurements of in-field sensors, the records of weather and management – is therefore mutually reinforcing: the data give the models something to learn from, and the models give the data their meaning (Wolfert et al., 2017; Liakos et al., 2018). It is in this convergence that the forecasting of phytosanitary risk finds its firmest foundation.

Beyond the detection of organisms already present, artificial intelligence supports the forecasting of phytosanitary risk – the prediction of where and when disease and pests will appear. The forecasting of disease rests upon the principle that its development depends upon the conjunction of a susceptible host, a virulent pathogen, and a favourable environment, the favourable conditions being specifiable and monitorable. Two broad traditions of modelling have developed over the past half-century. The process-based, or mechanistic, models embody the biology of the pathogen in mathematical descriptions of its life cycle, computing from the course of weather the progress of infection; the data-driven, or empirical, models, including those of machine learning, learn the relationship between conditions and disease from historical records without explicit representation of the underlying biology (González-Domínguez et al., 2023).

The evolution of these models over the last fifty years has been driven, as a recent and authoritative review observes, by three advances: in the sensors and automatic data-collection technology that supply the environmental inputs, in the instruments and methods of botanical epidemiology that furnish the biological understanding, and in the data analytics

and computer science that turn data into prediction (González-Domínguez et al., 2023). The wheat rusts and apple scab serve as the classic case studies of this progress, the former illustrating the development of empirical models from weather data, the latter the refinement of process-based models grounded in the biology of the pathogen. The two traditions are increasingly combined, the mechanistic understanding constraining and informing the data-driven model, and the whole is increasingly fed by the real-time data of the agricultural Internet of Things, so that a forecast may rest upon the conditions actually obtaining within a particular crop rather than upon the average conditions of a region (González-Domínguez et al., 2023; Farooq et al., 2019).

The forecasting of disease and pests attains its fullest expression in the early-warning systems operated at regional, national, and international scales, which unite the data of monitoring with the models of prediction and deliver their conclusions to those who must act upon them. A novel and powerful source of data for such systems is furnished by the aggregation of the diagnoses gathered by mobile applications: when many growers photograph and identify the diseases of their crops through a shared application, the accumulated reports constitute a continuously renewed map of the occurrence of pests and diseases, from which their spread may be tracked in near real time and the regions of emerging risk identified. In this way the same artificial intelligence that diagnoses a disease from a photograph contributes, through the aggregation of its diagnoses, to the surveillance of disease across a whole region – an instance of the convergence of the individual and the collective, the local and the global, that characterises the contemporary science of plant protection (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018; González-Domínguez et al., 2023).

#### *4. Integration of technologies and emerging frontiers*

The three domains surveyed above are powerful in themselves, but their fullest power is realised in their integration – the union of the molecular and the digital, of the laboratory and the field. The molecular technologies furnish the identification of a pathogen by its sequence and the characterisation of its population; the digital technologies furnish the detection and mapping of disease across a region and the prediction of its spread; and their integration yields a management more powerful than either alone – the deployment of the resistance that molecular analysis identifies in the places that digital

analysis shows to be at risk, and the anticipation of the breakdown of resistance from molecular monitoring combined with digital monitoring of spread. This integration depends upon cloud platforms that provide storage and computation as a service, upon the bioinformatic systems and reference databases that analyse molecular data, and upon the interoperability of data from different sources, whose achievement through common standards is among the principal challenges.

The most complete expression of this integration is the digital twin – a virtual replica of a physical crop or farm, continuously updated from the data of sensors, imagery, and weather, within which the state of the crop may be monitored, its future simulated, and the consequences of an intervention explored before it is undertaken (Pylidianis et al., 2021). Constructed from the same elements as the broader smart farm – the sensors and devices of the agricultural Internet of Things, coordinated through cloud computing – the digital twin draws these elements together into a single dynamic model, and so offers, in principle, a means of integrating the molecular, the digital, and the predictive into one coherent representation. Its realisation in agriculture is at an early stage, and the challenges are considerable: the complexity of the living system to be modelled, the volume and heterogeneity of the data to be assimilated, and the questions of data ownership and privacy that the gathering of so much information raises (Pylidianis et al., 2021; Wolfert et al., 2017). The broader integration of agricultural data rests, in turn, upon the big-data infrastructure of smart farming – the cloud platforms, the analytics, and the data standards through which the streams from many sources are combined – and upon the resolution of the attendant questions of governance, interoperability, and the distribution of the value that the data create (Wolfert et al., 2017).

The digital twin merits closer consideration, for it represents the most ambitious form of the integration of agricultural data. In its fullest conception, a digital twin is not merely a static model of a crop but a living virtual counterpart, continuously updated from the streams of sensor, image, and weather data, so that its state tracks the state of the real crop and may be interrogated in its stead. Within such a model the consequences of an action – the application of a treatment, the alteration of an irrigation schedule – may be simulated before the action is taken, and the future of the crop projected from its present condition, so that management becomes anticipatory rather than reactive (Pylidianis et al., 2021).

The construction of a digital twin draws upon every technology surveyed in this review: the sensors and devices of the agricultural Internet of Things to supply its data, the cloud computing to coordinate them, the machine learning to interpret them, and, in principle, the molecular diagnostics to ground its representation of the crop's health in the identity of the organisms present (Pylidianis et al., 2021; Farooq et al., 2019). Its realisation in agriculture remains at an early stage, impeded by the complexity of the living system to be modelled and by the volume and heterogeneity of the data to be assimilated, but it offers a vision of the fully integrated, anticipatory protection of plants toward which the field is tending.

The integration of agricultural data acquires its value, for the protection of plants, only in the decisions it informs, and the systems that convert integrated data into guidance are the decision-support systems (DSS). A DSS gathers the data of monitoring, applies the relevant forecasting models and analyses, and presents to the grower not raw data but actionable guidance – a warning that conditions favour a disease, an assessment of the risk a pest presents, or a recommendation for intervention – thereby embodying the anticipatory, knowledge-based management that integrated pest management commends. Such systems are delivered increasingly through the smartphones and digital platforms that growers already command; the mobile application for disease diagnosis exemplifies this delivery, diagnosing disease from a photograph and returning advice within seconds, and, through the aggregation of its users' observations, generating maps of disease occurrence.

The value of the decision-support system rests upon the quality and timeliness of the data that feed it, and it is here that the convergence of the technologies surveyed in this review is most directly useful. The microclimate data of the agricultural Internet of Things furnish the forecasting models with measurements made within the crop itself; the imagery of satellites and drones, interpreted by artificial intelligence, furnishes the spatial pattern of stress; and the molecular diagnostics furnish the specific identification of the pathogen present. A decision-support system that draws upon all three can offer guidance more precise, more timely, and more reliable than any single source could support, and the delivery of such guidance through the smartphone places it within reach of growers who command no other computing resource (Farooq et al., 2019; Wolfert et al., 2017; Liakos et al., 2018). The realisation of this promise, however, depends upon the interoperabil-

ity of the several data streams and upon the trust of the grower in the guidance offered, neither of which can be taken for granted.

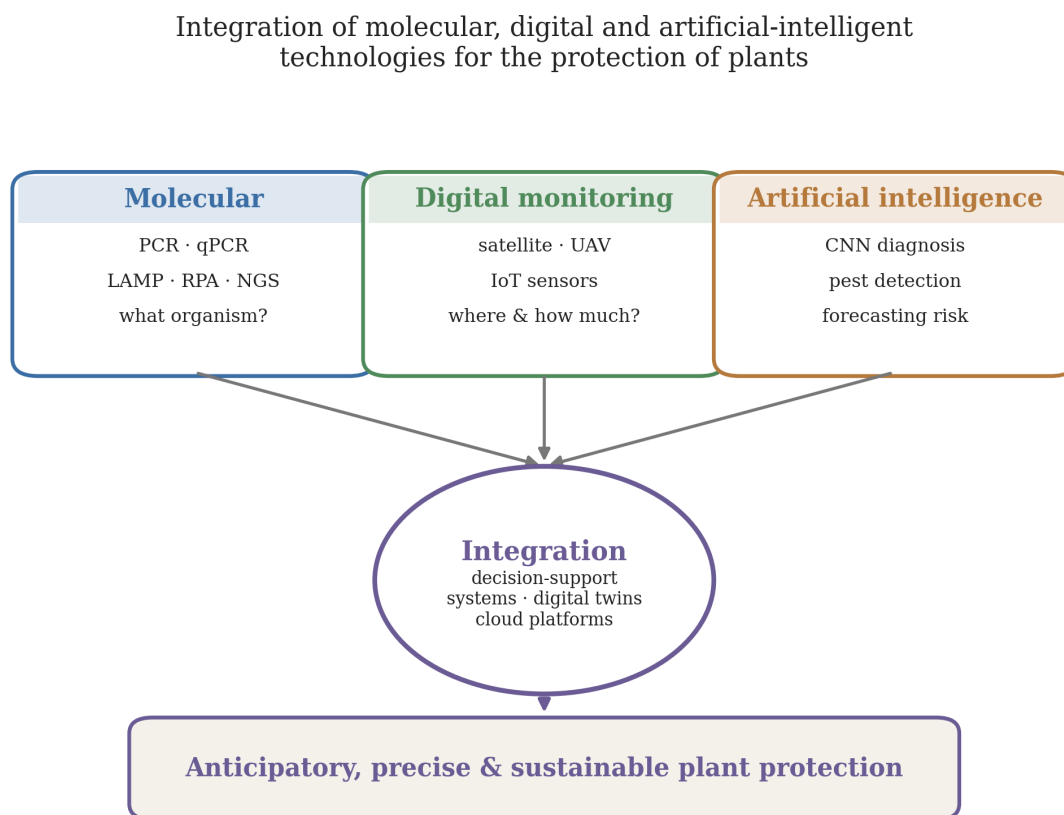
Among the most promising emerging frontiers is the application of CRISPR/Cas systems to diagnosis. Certain CRISPR-associated enzymes, when programmed to recognise a target sequence, exhibit upon binding a “collateral” cleavage of reporter molecules that may be coupled to a fluorescent or visual read-out; this principle underlies the SHERLOCK platform, based on the RNA-targeting enzyme Cas13 (Gootenberg et al., 2017), and the DETECTR platform, based on the DNA-targeting enzyme Cas12a (Chen et al., 2018). Combined with an isothermal amplification step, these methods attain a sensitivity reaching a few molecules, a specificity fine enough to discriminate a single-nucleotide difference, and a read-out simple enough to be read on a lateral-flow strip, uniting sensitivity, specificity, speed, and simplicity to a degree few other methods attain (Pozharskiy et al., 2025). Further frontiers include the analysis of the big data generated by monitoring and molecular technologies, whose aggregation across many farms and seasons reveals patterns invisible in any single dataset, and the digital platforms – increasingly augmented by conversational assistants founded upon recent advances in language models – that carry the power of these technologies into the hands of the world’s growers.

The application of the CRISPR/Cas systems to plant diagnostics is itself a rapidly developing field, and recent reviews catalogue a growing number of assays directed at the viruses, bacteria, and fungi of crops, frequently coupled to an isothermal amplification step and read out upon a lateral-flow strip in the manner of a pregnancy test, so that a molecular diagnosis of laboratory sensitivity may be obtained in the field without laboratory equipment (Pozharskiy et al., 2025). The principal remaining obstacles are the need, in most current assays, for a separate amplification step that complicates the workflow, and the requirement that an assay be designed and validated anew for each target; the development of amplification-free assays and of multiplexed assays able to detect several pathogens at once is an active direction of research (Pozharskiy et al., 2025). Together with these molecular advances, the maturing of the digital platforms – the cloud services, the analytics, and the conversational interfaces through which the power of these technologies is delivered – promises to lower further the barrier between the laboratory and the field, and to place the means of

precise diagnosis and timely decision in the hands of those who work the land.

The integration of these technologies is nowhere more consequential than in the surveillance of disease and the management of invasive and quarantine threats, where the union of the molecular and the digital yields a capability neither could supply alone. The molecular methods identify, with certainty and at the level of the strain, the organism present in a sample; the digital methods map, across a region, the distribution of the symptoms that organism produces and predict, from the conditions, the course of its spread; and artificial intelligence, drawing the diagnoses of many growers into a single picture, tracks in near real time the advance of a threat across a landscape (Boonham et al., 2014; González-Domínguez et al., 2023; Liu & Wang, 2021). The early detection that this integration affords – the interception of an invasive pest before it establishes, the recognition of a new disease before it spreads – is the foremost object of phytosanitary security, and the contribution of the technologies surveyed here to that object is among the strongest arguments for their adoption (Hebert et al., 2003; Boonham et al., 2014).

The realisation of this integrated capability is, however, attended by challenges that are as much organisational and economic as they are technical. The data of the several technologies are generated in different formats, by different instruments, under different standards, and their combination into a single coherent picture demands an interoperability that common standards alone can secure (Wolfert et al., 2017). The infrastructure of storage, computation, and analysis that the integration requires represents a cost that not every grower can bear, and there is a real risk that the benefits of these technologies accrue disproportionately to the large and well-resourced, widening rather than narrowing the inequalities of agriculture (Wolfert et al., 2017; Soussi et al., 2024). The questions of who owns the data that the sensors gather, who may use them, and who captures the value they create are unresolved, and bear directly upon the trust without which growers will not adopt the systems offered them (Wolfert et al., 2017; Pylianidis et al., 2021). The imperative that the benefits of these technologies be made accessible to all the world’s growers, and not the smallholders who stand to gain the most, is therefore not a peripheral concern but central to the realisation of their promise (Farooq et al., 2019; Soussi et al., 2024) (figure 2).

**Figure 2***Integration of the three domains of technology into an anticipatory protection of plants*

The frontier of these technologies continues to advance, and several directions of development promise to extend their reach. The analysis of the big data accumulated by monitoring and molecular technologies, aggregated across many farms and many seasons, reveals patterns of disease and pest occurrence invisible in any single dataset, and so supports a surveillance and a prediction of phytosanitary risk at scales hitherto unattainable (Wolfert et al., 2017). The maturing of the molecular methods – the coupling of isothermal amplification to CRISPR-based read-outs, the development of amplification-free and multiplexed assays – promises to bring the sensitivity and specificity of the laboratory to the field in ever simpler and cheaper formats (Pozharskiy et al., 2025; Babu et al., 2018). And the digital platforms through which these technologies are delivered grow steadily more capable and more accessible, so that the diagnosis, the forecast, and the recommendation may be placed within reach of growers who command no specialist resource. The cumulative effect of these advances is to lower the barrier between the laboratory and the field, and to

distribute the means of precise and timely protection more widely than before – a trajectory that, if its attendant challenges of cost, access, and trust can be met, promises a protection of the world’s crops at once more effective and more sustainable than the methods it supersedes (Wolfert et al., 2017; Soussi et al., 2024).

Taken together, the results of this review indicate that the molecular, digital, and artificial-intelligent technologies are complementary rather than competing, each addressing limitations of the others: molecular diagnostics supplies the specific identification that imaging cannot, imaging supplies the spatial coverage that point sampling cannot, and artificial intelligence supplies the interpretation that the volume of data demands. Their integration, compared with the isolated application of any one, yields an anticipatory and precise protection of plants that is at once more effective, more economical, and more sustainable than the traditional methods it supersedes – a conclusion consistent with the trajectory of the field reported across the international literature.

## Conclusion

This review set out to provide an integrated account of the innovative technologies transforming the monitoring and protection of plants, examining their principles, applications, and limitations by a structured review of the international literature. Its principal results may be summarised as follows. The molecular technologies of diagnosis – PCR and its real-time and isothermal variants, and next-generation sequencing – identify harmful organisms from their nucleic acids with a sensitivity, specificity, and speed beyond the reach of traditional methods, and increasingly at the point of need. The digital technologies of monitoring – satellite remote sensing, unmanned aerial vehicles, and the agricultural Internet of Things – observe crops across scales from the region to the individual plant, detecting the signs of stress frequently before they are visible. Artificial intelligence interprets the resulting data, diagnosing disease and identifying pests with an accuracy approaching that of the human expert and forecasting phytosanitary risk. And the integration of these technologies, in decision-support systems and digital platforms, converts their combined knowledge into actionable guidance.

The principal conclusion is that these technologies are complementary rather than competing, and that their integration – the union of the molecular and the digital, of deep understanding and powerful instrument – yields an anticipatory, precise, and sustainable protection of plants superior to the methods it supersedes. This integrated protection contributes to the early detection of threats and the reduction of crop losses, and so to the development of scientific knowledge in plant protection and to the security of the world's food supply under a changing climate. Its realisation depends, however, upon the resolution of real challenges: the narrowing of the gap between performance under controlled conditions and in the field; the improvement of the reliability, robustness, and affordability of the technologies; the resolution of questions of data governance and cybersecurity; and, above all, the imperative that the benefits be made accessible to all the world's growers, including the smallholders who stand to gain the most. The prospects for the practical implementation of these technologies are bright, and the principal direction for further research is the deepening of their integration – the development of the standards, the interoperability, and the unified systems through which the molecular, the digital, and the artificial-intelligent may be brought together into a single, intelligent enterprise of plant protection.

## References

- Agarwal, A., Cunningham, J. P., Valenzuela, I., & Blacket, M. J. (2020). A diagnostic LAMP assay for the destructive grapevine insect pest, phylloxera (*Daktulosphaira vitifoliae*). *Scientific Reports*, 10, 21229. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77928-9>
- Agarwal, A., Martoni, F., Eow, L., Rodoni, B. C., & Blacket, M. J. (2023). LAMP assay for the detection of the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Psylloidea: Psyllidae). *Scientific Reports*, 13, 10895. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37721-w>
- Babu, B., Ochoa-Corona, F. M., & Paret, M. L. (2018). Recombinase polymerase amplification applied to plant virus detection and potential implications. *Analytical Biochemistry*, 546, 72–77. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2018.01.021>
- Barbedo, J. G. A. (2016). A review on the main challenges in automatic plant disease identification based on visible range images. *Biosystems Engineering*, 144, 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.01.017>
- Bebber, D. P., Ramotowski, M. A. T., & Gurr, S. J. (2013). Crop pests and pathogens move polewards in a warming world. *Nature Climate Change*, 3(11), 985–988. <https://doi.org/10.1038/nclimate1990>
- Boonham, N., Kreuze, J., Winter, S., van der Vlugt, R., Bergervoet, J., Tomlinson, J., & Mumford, R. (2014). Methods in virus diagnostics: From ELISA to next generation sequencing. *Virus Research*, 186, 20–31. <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2013.12.007>
- Chaloner, T. M., Gurr, S. J., & Bebber, D. P. (2021). Plant pathogen infection risk tracks global crop yields under climate change. *Nature Climate Change*, 11(8), 710–715. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01104-8>
- Chen, J. S., Ma, E., Harrington, L. B., Da Costa, M., Tian, X., Palefsky, J. M., & Doudna, J. A. (2018). CRISPR-Cas12a target binding unleashes indiscriminate single-stranded DNase activity. *Science*, 360(6387), 436–439. <https://doi.org/10.1126/science.aar6245>
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Farooq, M. S., Riaz, S., Abid, A., Abid, K., & Naeem, M. A. (2019). A survey on the role of IoT in agriculture for the implementation of smart farming. *IEEE Access*, 7, 156237–156271. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2949703>
- Ferentinos, K. P. (2018). Deep learning models for plant disease detection and diagnosis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 145, 311–318. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.01.009>

- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). Scientific review of the impact of climate change on plant pests. FAO on behalf of the IPPC Secretariat. <https://doi.org/10.4060/cb4769en>
- González-Domínguez, E., Caffi, T., Rossi, V., Salotti, I., & Fedele, G. (2023). Plant disease models and forecasting: Changes in principles and applications over the last 50 years. *Phytopathology*, 113(4), 678–693. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-10-22-0362-KD>
- Gootenberg, J. S., Abudayyeh, O. O., Lee, J. W., Essletzbichler, P., Dy, A. J., Joung, J., Verdine, V., Donghia, N., Daringer, N. M., Freije, C. A., Myhrvold, C., Bhattacharyya, R. P., Livny, J., Regev, A., Koonin, E. V., Hung, D. T., Sabeti, P. C., Collins, J. J., & Zhang, F. (2017). Nucleic acid detection with CRISPR-Cas13a/C2c2. *Science*, 356(6336), 438–442. <https://doi.org/10.1126/science.aam9321>
- Hariharan, G., & Prasannath, K. (2021). Recent advances in molecular diagnostics of fungal plant pathogens: A mini review. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 10, 600234. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2020.600234>
- Hebert, P. D. N., Cywinska, A., Ball, S. L., & deWaard, J. R. (2003). Biological identifications through DNA barcodes. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 270(1512), 313–321. <https://doi.org/10.1098/rspb.2002.2218>
- Ivanov, A. V., Safenkova, I. V., Zherdev, A. V., & Dzantiev, B. B. (2021). The potential use of isothermal amplification assays for in-field diagnostics of plant pathogens. *Plants*, 10(11), 2424. <https://doi.org/10.3390/plants10112424>
- Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 70–90. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016>
- Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674. <https://doi.org/10.3390/s18082674>
- Lievens, B., & Thomma, B. P. H. J. (2005). Recent developments in pathogen detection arrays: Implications for fungal plant pathogens and use in practice. *Phytopathology*, 95(12), 1374–1380. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-95-1374>
- Liu, J., & Wang, X. (2021). Plant diseases and pests detection based on deep learning: A review. *Plant Methods*, 17, 22. <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00722-9>
- Mahlein, A.-K. (2016). Plant disease detection by imaging sensors – Parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. *Plant Disease*, 100(2), 241–251. <https://doi.org/10.1094/PDIS-03-15-0340-FE>
- Mahlein, A.-K., Kuska, M. T., Behmann, J., Polder, G., & Walter, A. (2018). Hyperspectral sensors and imaging technologies in phytopathology: State of the art. *Annual Review of Phytopathology*, 56, 535–558. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080417-050100>
- Mohanty, S. P., Hughes, D. P., & Salathé, M. (2016). Using deep learning for image-based plant disease detection. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1419. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01419>
- Niessen, L., & Vogel, R. F. (2010). Detection of *Fusarium graminearum* DNA using a loop-mediated isothermal amplification (LAMP) assay. *International Journal of Food Microbiology*, 140(2–3), 183–191. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2010.03.036>
- Notomi, T., Okayama, H., Masubuchi, H., Yonekawa, T., Watanabe, K., Amino, N., & Hase, T. (2000). Loop-mediated isothermal amplification of DNA. *Nucleic Acids Research*, 28(12), e63. <https://doi.org/10.1093/nar/28.12.e63>
- Pozharskiy, A., Kostyukova, V., Adilbayeva, K., Taskuzhina, A., & Gritsenko, D. (2025). CRISPR/Cas-based detection systems – emerging tools for plant pathology. *Open Agriculture*, 10(1), 20250458. <https://doi.org/10.1515/opag-2025-0458>
- Pylaniadis, C., Osinga, S., & Athanasiadis, I. N. (2021). Introducing digital twins to agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 184, 105942. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105942>
- Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S. J., Esker, P., McRoberts, N., & Nelson, A. (2019). The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature Ecology & Evolution*, 3(3), 430–439. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y>
- Singh, A., Ganapathysubramanian, B., Singh, A. K., & Sarkar, S. (2016). Machine learning for high-throughput stress phenotyping in plants. *Trends in Plant Science*, 21(2), 110–124. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.10.015>
- Sishodia, R. P., Ray, R. L., & Singh, S. K. (2020). Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. *Remote Sensing*, 12(19), 3136. <https://doi.org/10.3390/rs12193136>
- Soussi, A., Zero, E., Sacile, R., Trincherò, D., & Fossa, M. (2024). Smart sensors and smart data for precision agriculture: A review. *Sensors*, 24(8), 2647. <https://doi.org/10.3390/s24082647>
- Terentev, A., Dolzhenko, V., Fedotov, A., & Eremenko, D. (2022). Current state of hyperspectral remote sensing for early plant disease detection: A review. *Sensors*, 22(3), 757. <https://doi.org/10.3390/s22030757>
- Tomlinson, J. A., Barker, I., & Boonham, N. (2007). Faster, simpler, more-specific methods for improved molecular detection of *Phytophthora ramorum* in the field. *Applied and Environmental Microbiology*, 73(12), 4040–4047. <https://doi.org/10.1128/AEM.00161-07>
- Too, E. C., Li, Y., Njuki, S., & Liu, Y. (2019). A comparative study of fine-tuning deep learning models for plant disease identification. *Computers and Electronics in Agriculture*, 161, 272–279. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.03.032>
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). Big data in smart farming – A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>

**Information about the author:**

*Syeda Bukhari Zanira Tahir – researcher at Johannes Gutenberg University Mainz (Mainz 55122, Germany, e-mail: dr.syedazanira@gmail.com).*

**Автор туралы мәлімет:**

*Саида Бухари Занира Тахир – Иоганн Гутенберг атындағы Майнц университетінің зерттеушісі (Майнц 55122, Германия, e-mail: dr.syedazanira@gmail.com).*

**Сведения об авторе:**

*Саида Бухари Занира Тахир – исследователь Майнцского университета имени Иоганна Гутенберга (Майнц 55122, Германия, e-mail: dr.syedazanira@gmail.com).*

А.А. Нуржанова<sup>1</sup> , А.Ю. Муратова<sup>2</sup> , А.С. Нурмагамбетова<sup>1</sup> ,  
Ж.Е. Жумашева<sup>1</sup> , А. Мамирова<sup>3\*</sup> 

<sup>1</sup> Институт биологии и биотехнологии растений, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup> Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов

ФИЦ Саратовский научный центр РАН, Саратов, Россия

<sup>3</sup> Кафедра биотехнологии, Факультет биологии и биотехнологии,  
Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

\*e-mail: Aigerim.mamirova@mail.com

## БИОЧАР – ИНСТРУМЕНТ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БИОТЕХНОЛОГИИ

В данном обзоре были рассмотрены вопросы применения биочара в качестве удобрения и носителя интродуцируемых микроорганизмов для решения задач экологической биотехнологии. Более того в обзоре описаны методы получения биочара с заданными физико-химическими свойствами, механизмы его взаимодействия с органическими (пестицидами) и неорганическими (тяжёлыми металлами) загрязнителями, а также потенциальные риски, связанные с его использованием. Особое внимание было уделено механизмам иммобилизации микробных клеток на поверхности биочара, их взаимодействию с углеродной матрицей и возможностям применения таких композиций для очистки почв от загрязнителей. В обзоре обобщены и углублены знания об использовании микроорганизмов, иммобилизованных на биочаре, для восстановления структурных характеристик почвы и повышения её плодородия.

Повышение эффективности фиторемедиации является стратегически важным этапом исследований. С целью ускорения наращивания биомассы растений, повышения эффективности технологии очистки и адаптивности растений, биочар рассматривается в качестве внедряемого инструмента для усиления технологий био- и фиторемедиации. Биочар получали путём термического разложения растительных или животных остатков в анаэробных условиях или при пониженном содержании кислорода. Положительное влияние на свойства почвы и рост растений объяснялось наличием в его составе минералов (K, Ca, P, Na, Mg и др.), способствующих нейтрализации кислотности, снижению абиотического стресса и стимуляции роста растений. Кроме того, биочар адсорбировал токсичные элементы, что приводило к снижению их мобильности, биодоступности и фито- и экотоксичности. Практическое применение биочара было представлено как инновационный подход к минимизации загрязнения почв.

Целью статьи является расширение представлений о современных методах иммобилизации микроорганизмов на биочаре для улучшения почвенных свойств, повышения плодородия и эффективной стабилизации органических и неорганических загрязнителей в окружающей среде.

**Ключевые слова:** биочар, пиролиз, почва, тяжелые металлы, стойкие органические загрязнители.

A.A. Nurzhanova<sup>1</sup>, A.Yu. Muratova<sup>2</sup>, A.S. Nurmagambetova<sup>1</sup>,  
Zh.E. Zhumasheva<sup>1</sup> and A. Mamirova<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Plant Biology and Biotechnology, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms  
FRC Saratov Scientific Centre RAS, Saratov, Russia

<sup>3</sup>Department of Biotechnology, Faculty of Biology and Biotechnology,  
Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

\*e-mail: Aigerim.mamirova@mail.com

### Biochar as a tool of environmental biotechnology

Current review examines the application of biochar as both a soil amendment and a carrier for microbial cells aimed at addressing challenges in environmental biotechnology. Furthermore, the review describes methods for producing biochar with tailored physicochemical properties, mechanisms of its interaction with organic (pesticides) and inorganic (heavy metals) contaminants, and the potential environmental risks associated with its application. Particular attention is given to the mechanisms of microbial cell immobilization on the biochar surface, their interactions with the carbon matrix, and the potential

of such biochar–microbe complexes for soil remediation. The review consolidates and advances current knowledge on the use of biochar-immobilized microorganisms for restoring soil structural characteristics and enhancing its fertility.

Improving the efficiency of phytoremediation is a strategically important research objective. To improve plant biomass yield, increase the effectiveness of remediation technologies, and accelerate plant adaptability, biochar is considered a promising tool for enhancing both bio- and phytoremediation processes. Biochar is produced through the thermal decomposition of plant or animal residues under anaerobic or low-oxygen conditions. Its positive impact on soil properties and plant growth is attributed to the presence of minerals (K, Ca, P, Na, Mg, etc.), which help neutralize soil acidity, reduce abiotic stress, and stimulate plant development. Furthermore, biochar exhibits strong sorption capacity for toxic elements, thereby reducing their mobility, bioavailability, and phyto- and ecotoxicity. In practical applications, biochar is presented as an innovative approach for mitigating soil contamination.

The aim of the current study is to broaden the understanding of up-to-date methods for microbial immobilization on biochar to improve soil properties, enhance fertility, and effectively stabilize both organic and inorganic contaminants in the environmental matrices.

**Keywords:** biochar, pyrolysis, soil, potentially toxic elements, persistent organic pollutants.

А.А. Нуржанова<sup>1</sup>, А.Ю. Муратова<sup>2</sup>, А.С. Нурмагамбетова<sup>1</sup>,  
Ж.Е. Жумашева<sup>1</sup>, А. Мамирова<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институты, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Өсімдіктер және микроорганизмдер биохимиясы және физиологиясы институты РҒА ФҒО Саратов ғылыми орталығы, Саратов, Ресей

<sup>3</sup>Биотехнология кафедрасы, биология және биотехнология факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

\*e-mail: Aigerim.mamirova@mail.com

### Биочар – қоршаған орта биотехнология құралы

Бұл шолуда биочарды қоршаған орта биотехнологиясының мәселелерін шешу үшін тыңайтқыш және енгізілген микроорганизмдердің тасымалдаушысы ретінде пайдалану мәселелері қарастырылды. Сонымен қатар шолуда физикалық және химиялық қасиеттері көрсетілген биочарды алу әдістері, оның органикалық (пестицидтер) және бейорганикалық (ауыр металдар) ластаушы заттармен әрекеттесу механизмдері, сондай-ақ оны пайдаланумен байланысты ықтимал қауіптер сипатталған. Биочардың бетіндегі микроб жасушаларының иммобилизациялану механизмдеріне, олардың көміртекті матрицамен әрекеттесуіне және мұндай композицияларды топырақты ластаушы заттардан тазарту үшін пайдалану мүмкіндіктеріне ерекше назар аударылды. Шолу топырақтың құрылымдық ерекшеліктерін қалпына келтіру және оның құнарлылығын арттыру үшін биочарға иммобилизацияланған микроорганизмдерді қолдану туралы білімді жинақтайды және тереңдетеді.

Фиторемедиацияның тиімділігін арттыру зерттеудің стратегиялық маңызды кезеңі болып табылады. Өсімдік биомассасының өсуін жеделдету, тазарту технологиясының тиімділігін және өсімдіктердің бейімделуін арттыру мақсатында биочар био- және фиторемедиация технологияларын жетілдірудің іске асырылған құралы ретінде қарастырылады. Биочар өсімдік немесе жануар қалдықтарын анаэробты жағдайда немесе оттегінің төмендетілген деңгейінде термодырату арқылы алынды. Биочар топырақ қасиеттеріне және өсімдіктердің өсуіне оң әсері оның құрамында қышқылдықты бейтараптандыруға, абиотикалық стрессті төмендетуге және өсімдіктердің өсуін ынталандыруға көмектесетін минералдардың (K, Ca, P, Na, Mg және т.б.) болуымен түсіндірілді. Сонымен қатар биочар улы элементтерді өзіне сіңірді, бұл олардың қозғалғыштығының, биожетімділігінің, фито- және экоуыттылығының төмендеуіне әкелді. Биочарды тәжірибелік қолдану топырақтың ластануын азайтудың инновациялық тәсілі ретінде ұсынылды.

Мақаланың мақсаты – топырақтың қасиеттерін жақсарту, құнарлылығын арттыру және қоршаған ортадағы органикалық және бейорганикалық ластаушы заттарды тиімді тұрақтандыру үшін биочарды микроорганизмдерді иммобилизациялаудың заманауи әдістері туралы түсінікті кеңейту.

**Түйін сөздер:** биочар, пиролиз, топырақ, ауыр металдар, тұрақты органикалық ластаушылар.

## Введение

В настоящее время по результатам ежегодного экологического мониторинга в Республике Казахстан и зарубежных исследований регулярно выявляются экологические матрицы, загрязнённые веществами различного происхождения (Brunet, 2001; Mamirova et al., 2019; Tarla et al., 2020). Загрязнение расположенных вблизи промышленных объектов сельскохозяйственных почв токсичными тяжелыми металлами и металлоидами, такими как As, Cd и Pb, а также менее токсичными Cu и Zn, вызывает серьезную озабоченность с точки зрения безопасности пищевых культур, а также окружающей среды и здоровья населения (Lwin et al., 2023; Ma et al., 2024; Sharma et al., 2022;). Тяжелые металлы (ТМ) накапливаются в верхнем слое почвы 0–10 см, вымывая подвижные формы в нижние горизонты до 80 см (Chen et al., 2021; Pichtel, 2016;). Литературные данные за последние 25 лет свидетельствуют о наличии в Казахстане загрязненных тяжелыми металлами участков вблизи промышленных объектов (Baubekova et al., 2021; Safirova, 2019). Присутствие очагов загрязнения требует разработки и внедрения технологий для восстановления нарушенных экологических матриц. Общие методы физико-химической реабилитации загрязненных ксенобиотиками земель требуют больших инвестиций (Gunasundari & Senthil Kumar, 2017). Считается, что традиционные методы восстановления часто оказываются неадекватными в решении сложной проблемы детоксикации поллютантов, тем самым подчеркивая потребность в инновационных подходах к борьбе с загрязнителями, их эффективное устранение (Gamalero & Glick, 2024). В настоящее время фиторемедиация является многообещающей технологией, которая гармонично взаимодействует с экосистемой. Преимуществом данной технологии является отсутствие необходимости дорогостоящего оборудования и возможность извлечения широкого спектра загрязнителей из матриц окружающей среды (Lekshmi et al., 2024; Yan et al., 2020). Технология фиторемедиации имеет некоторые лимитирующие параметры, такие как длина корней растений, долгий период восстановления, климатические различия и использование не эндемичных видов, которые могут привести к нарушению биоразнообразия, медленный рост растений, ограничивающий быстрый эффект, и низкий урожай биомассы (Nsanganwimana et al., 2014; Wan et al.,

2016). Для улучшения вышеуказанных аспектов, технология фиторемедиации была усилена использованием органических и неорганических почвенных добавок (органические кислоты, поверхностно-активные вещества, наночастицы, рамнолипиды, биочар), а также использованием ассоциации растений с микроорганизмами (Kidd et al., 2017; Llovet et al., 2021; Mamirova et al., 2021; Nebeská et al., 2021; Pidlisnyuk et al., 2021; Radziemska et al., 2022). Считают, что использование этих приемов является стратегически важным этапом повышения эффективности фиторемедиации (Lin et al., 2021). Фиторемедиация, основанная на синергетическом действии растений и связанных с ними микроорганизмов, является на сегодня перспективным *in situ* подходом к восстановлению почвы, загрязненной тяжелыми металлами по сравнению с традиционными методами очистки (Baker et al., 2000; Deepika & Haritash, 2024; Pilon-Smits, 2005; Tarla et al., 2020; Tsao, 2003). Например, Khan et al. (2017) выявили важность *Catharanthus roseus* и их ассоциации с ризобактериями в фиторемедиации почвы, загрязненной Cu и Pb. Авторы проиллюстрировали, что *C. roseus*, инокулированный бактериальными штаммами *Pseudomonas fluorescens* RB4 и *Bacillus subtilis* 189, продемонстрировал более высокие показатели биомассы из-за смягчения химического стресса. Наряду с бактериями арбускулярные микоризные грибы также обладают способностью стимулировать рост растений и эффективность фитотехнологии (Bhantana et al., 2021). Однако недостатками этого подхода являются низкая колонизация микроорганизмами корней при высоких уровнях стресса от тяжелых металлов и плохое состояние роста растений (Wu et al., 2024). Биоремедиация с использованием микроорганизмов имеет некоторые ограничения: токсичность высоких концентраций загрязнителей для микроорганизмов; дефицит питательных веществ в загрязненной среде; конкуренция микробов-интродуцентов с местной микробиотой, их выживание и пролиферация (Oro et al., 2024). Для преодоления этих недостатков, микроорганизмы иммобилизуют на различных твердых матрицах, в частности биочаре, наночастицах и других для обеспечения стабильности и повышения эффективности восстановления (Liang et al., 2023; Schommer et al., 2024; Upadhyayula et al., 2009; Wu et al., 2019). В обзоре Ouyang et al. (2023) отмечено, что по сравнению с традиционными физическими и химическими методами очистки внесение биочара

является перспективным подходом к снижению загрязнения почвы путем иммобилизации тяжелых металлов и органических загрязнителей.

Научное сообщество стало уделять пристальное внимание широкому использованию биочара в области экологической биотехнологии, так как он эффективен при очистке окружающей среды, загрязненной тяжелыми металлами, может стабилизировать тяжелые металлы в почвах, уменьшая их подвижность и биодоступность (Forján et al., 2018; Gong et al., 2019; Narayanan & Ma, 2022). Анализ литературы свидетельствует о масштабных исследованиях по применению биоугольных материалов (биочаров) для улучшения различных почвенных экосистем (Huang et al., 2023). Практическое использование биочара рассматривают, как инновационный подход для минимизации загрязнения почвы (Ahmad et al., 2014; Kabir et al., 2023). В обзоре Nguyen et al. (2023) есть указания на то, что биочар может удалять до 80% тяжелых металлов из загрязненных почв. Интерес к биочару из года в год растет. По последним расчетам, сделанным в начале 2023 года аналитическим центром Precedence Research, рынок биочара в 2022 году составлял 220 млн долл. Ожидается, что в рамках следующих 10 лет – к 2032 году, его доля будет более 633 млн долл. Стоимость биочара варьирует от ста до пяти тысяч долларов США за тонну (Maroušek et al., 2019). По данным авторитетной американской фирмы по исследованию рынка и консалтингу мировой рынок биочара оценивается в 541,8 млн долларов США в 2023 году и, как ожидается, будет расти с годовым темпом прироста 13,9% с 2024 по 2030 год (Grand View Research, 2024).

Таким образом, целью настоящей обзорной статьи являлись обобщение и обсуждение современных научных представлений, а также выявление пробелов в знаниях о взаимодействии биочара с окружающей средой, загрязняющими веществами и микроорганизмами. Для достижения поставленной цели был проведен поиск научной литературы в трёх основных базах данных: Web of Science, Scopus и Google Scholar. Поиск осуществлялся с использованием следующих комбинаций ключевых слов: «biochar» AND «soil»; «biochar» AND «contamination»; «biochar» AND «POPs»; «biochar» AND «heavy metals»; «biochar» AND «microorganisms». Результаты поиска были отфильтрованы таким образом, чтобы охватить научные статьи, опубликованные в период с 2015 по 2025 год.

### *1. Методы получения биочара*

Биочар производится путем разложения остатков животных или растений в условиях анаэробных или при низком содержании кислорода (Grand View Research, 2024; K. Huang et al., 2023; Janus et al., 2020; Khan et al., 2017; Kononchuk et al., 2022; Novak et al., 2018; Tomczyk et al., 2020; Wagner & Kaupenjohann, 2015). Использование разного исходного сырья также приводит к вариативности площади поверхности, пористости и функциональных групп на поверхности биочара, что влияет на его свойства. Рисовая шелуха, древесная кора, хвосты сахарной свеклы, кожура фруктов, сосновая древесина, древесные отходы и растительные остатки являются наиболее распространенным сырьем для производства биочара в сельскохозяйственном секторе (Khawkomol et al., 2021). Эффективность биочара в различных областях применения зависит от исходного сырья, его состава, а также температуры пиролиза и методов, используемых для его производства (Boorboori & Lackóová, 2023; Brtnicky et al., 2021; Fang et al., 2015). Продемонстрировано, что биочар на основе древесины содержит больше углерода и меньше доступных растениям питательных веществ, в то время как биочар на основе навоза имеет обратную тенденцию. Биочар на основе травы по своим характеристикам обычно находится между древесным и навозным биочарами (Ippolito et al., 2020; Reyhanitabar et al., 2020). В зависимости от производства биочара различают пиролитический и гидротермальный. Биочар, полученный путем гидротермальной карбонизации, называется гидрочар. Гидрочар, полученный из отходов, включая макулатуру, пищевые отходы, смешанные твердые бытовые отходы и отходы анаэробного сбраживания, имеет выход от 29 до 63% при температуре от 225 до 265°C (Fang et al., 2015). Гидрочар обычно кислый, обладает особыми физико-химическими свойствами, что делает его очень подходящим для использования в производстве биоэнергии, улучшении почвы, связывании углерода и очистке сточных вод от загрязнения (Azzaz et al., 2020; Fang et al., 2015; Khanzada et al., 2024). Благодаря своим многочисленным поверхностным функциональным группам гидрочар обладает значительной адсорбционной способностью как для полярных, так и для неполярных органических загрязнителей (Hesham et al., 2021; Mahmood Al-Nuaimy et al., 2024).

Биочар получают из биомассы путем пиролиза в три этапа: пред-пиролиз при температуре

до 200°C, во время которого выделяются влага и летучие вещества. Испарение воды приводит к разрыву связей и образованию групп перекиси водорода, -COOH и -CO; основным этап пиролиза – при 200 до 500°C происходит ароматизация и внутримолекулярная конденсация гемицеллюлозы и целлюлозы, что приводит к образованию твердого биочара; заключительный этап – при температуре выше 500°C – включает деградацию лигнина и других органических веществ с прочными химическими связями (Pahnila et al., 2023; Zhang et al., 2017). Содержание целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина в исходном сырье, а также температура пиролиза, используемая для получения биочара, влияют на его свойства (Amalina et al., 2022; Pahnila et al., 2023; Yang et al., 2007). Температура процесса пиролиза колеблется от 350 до 1500°C при ограниченном присутствии кислорода: быстрый пиролиз (400-600°C), медленный пиролиз (350-800°C) и газификация (700-1500°C) (Tomczyk et al., 2020). Биочар, полученный при высокой температуре (от 400 до 700°C), характеризуется высокой площадью поверхности, микро-пористостью и повышенной соматичностью и гидрофобностью (Kołodziejka et al., 2012). Процесс приготовления биочара приводит к образованию пористой структуры (Dong et al., 2024). Образующиеся поры подразделяют на микропоры (диаметром менее 2 нм), мезопоры (2–50 нм) и макропоры (более 50 нм). В отличие от гидрочара с ароматической структурой и высокой термической стабильностью, считают, что биочар экономически более эффективен (Gascó et al., 2018; Zhu et al., 2018), обладает большой химической и биологической стабильностью, высокой способностью к катионному обмену, большой удельной площадью поверхности и концентрацией функциональных групп (He et al., 2019; Prapagdee & Tawinteung, 2017). Большинство видов биочара имеют нейтральную или щелочную кислотность и способны повышать pH кислых почв. Положительное воздействие биочара на почву и рост растений связано с присутствием в его составе минералов (K, Ca, P, Na, Mg и т.д.), которые способствуют нейтрализации кислотности почвы, снижению стресса и росту растений (He et al., 2019; Литвинович и др., 2016). Пиролитический биочар является щелочным, используется для рекультивации кислых почв, а гидротермально приготовленный биочар является кислым и может использоваться для рекультивации засоленных почв (Liang et al., 2023).

## *2. Взаимодействие тяжелых металлов в почве с биочаром*

При рекультивации почвы повсеместно применяется биочар из-за его пористой структуры, большой площади поверхности и химического состава (Kabir et al., 2023; Majewska & Hanaka, 2025). Способность биочара сорбировать тяжелые металлы, снижать их подвижность, биодоступность и, следовательно, токсичность в почве продемонстрирована во многих опубликованных работах (Ghosh & Maiti, 2021; Gogoi et al., 2021; Gu et al., 2020; Janus et al., 2020). Механизмы взаимодействия металлов с биочаром в почве подразделяю на прямые (электростатическая адсорбция, ионный обмен, комплексообразование и осаждение) и косвенные (изменение свойств почвы, например, pH, катионообменная емкость, содержание минералов и органического углерода) (He et al., 2019). Поскольку ТМ являются как катионными, так и анионными, они взаимодействуют с анионными и катионными ионами биочара и непосредственно абсорбируются на поверхности материала, тем самым снижая их биодоступность в почве. Поэтому биочар рассматривают, как эффективный адсорбент тяжелых металлов. Способность к катионному обмену делает биочар эффективным инструментом для стабилизации загрязнения почвы и снижения биодоступности токсичных элементов для организмов в зависимости от размера частиц, метода внесения и дозы (Fijałkowska et al., 2021; Narayanan & Ma, 2022; Rees et al., 2014). Анионные металлоиды, включая Cr, Se и As, часто встречаются в почвах с щелочным pH по сравнению с катионными металлоидами, которые плохо адсорбируются отрицательно заряженной почвой (He et al., 2021; Narayanan & Ma, 2022). Стабилизация тяжелых металлов в почве путем применения биочара зависит от типа адсорбента, который, в свою очередь, определяется типом сырья и температурой пиролиза (Aslam et al., 2017; Beesley & Marmiroli, 2011). Например, при загрязнении почвы ионами Cu (II), Zn (II) и Pb (II) адсорбционная способность биочаров увеличивалась в следующем порядке: древесина > рисовая шелуха > подсолнечная шелуха. Добавление в почву биочара из подсолнечной шелухи, древесины и рисовой шелухи привело к повышению эффективности удаления металлов во всех случаях (более 77%), а увеличение процентной адсорбции ионов Cu и Pb составило 9-19%, Zn – 11-21% (Burachevskaya et al., 2023). При сравнении различных адсорбентов (гаше-

ная известь, фосфогипс, костная мука и биочар) в сельскохозяйственной почве, загрязненной As, Cd и Pb, выявлено, что среди сорбентов наибольшей сорбционной стабильностью ионов As ( $0,007 \text{ л мг}^{-1}$ ), Cd ( $0,121 \text{ л мг}^{-1}$ ) и Pb ( $2,273 \text{ л мг}^{-1}$ ) обладал биочар, что доказывает стабильность биочара по сравнению с другими добавками (Lwin et al., 2023).

Однако, помимо положительного влияния от внесения биочара в почву, имеются некоторые ограничения: снижение влажности почвы, усиление эрозии и засоленности, а также снижение биодоступности питательных веществ, необходимых для роста и развития растительного организма (Brtnicky et al., 2021). Вопрос безопасности применения биочара для рекультивации почв и роста растений остается открытым (He et al., 2019; Narayanan & Ma, 2022; Schimmelpfennig & Glaser, 2012). Считают, что содержание катионных и анионных элементов в биочаре, выброс их в почву в процессе «старения» или вдыхание пыли при их использовании представляет эколого-медицинский риск (Gu et al., 2020). Исследования в данной области ограничены, известно, что в процессе «старения» биочара на поверхности образуется широкий спектр функциональных групп (карбоксильные, гидроксильные и фенольные) (Narayanan & Ma, 2022), но при этом процесс «старения» не влияет на способность биочара стабилизировать катионные элементы в почве (Ghosh & Maiti, 2021; Narayanan & Ma, 2022; Rathnayake et al., 2021). Разработка стратегии стабилизации анионных металлов является слабо изученным вопросом, и одним из важных аспектов – правильный подбор биочара (Gupta et al., 2021).

Итак, внесение биочара в почву улучшает поглощение и стабилизацию различных загрязняющих веществ. Считают, что обогащенная биочаром почва может улучшить подвижность металлов и металлоидов, механизм их стабилизации обусловлен увеличением pH почвы (Gupta et al., 2021; Hassan et al., 2024; He et al., 2019; Majewska & Hanaka, 2025; Mamirova et al., 2024; Narayanan & Ma, 2022; Schommer et al., 2024; Song et al., 2016). Биочар сохраняется в почве в течение сотен и тысяч лет. За счет повышения pH, пористости и вододоступности биочар может создать благоприятные условия для развития корневой системы и активности микробных сообществ в почве. Биочар может катализировать биотические и абиотические процессы,

особенно в ризосфере, которые усиливают поступление питательных веществ и их образование растениями, низкий уровень фитотоксинов, стимулируют развитие растений и повышают устойчивость к климатическим воздействиям и внешним стрессорам окружающей среды (Joseph et al., 2021).

### *3. Взаимодействие пестицидов в почве с биочаром*

Сложные структуры почвы и микробные экосистемы, присутствующие в реальных сельскохозяйственных условиях, могут влиять на адсорбцию, биодоступность и долгосрочные эффекты взаимодействия биочара с пестицидами. Биодоступность пестицидов в почве с помощью биочара зависит от многих факторов: химической структуры, физико-химических свойств почвы; структуры пор, удельной поверхности и поверхностных функциональных групп (J. Huang et al., 2023). Поэтому считают, что углубленные исследования механизмов адсорбции биочара помогут продвинуть применение биочара и повысить его эффективность для снижения экологического риска от пестицидов (Dong et al., 2024). В настоящее время биочар рассматривают, как новый стабилизирующий агент, который может адсорбировать пестициды посредством взаимодействия химической (электростатическое притяжение) и физической адсорбции (объем пор, распределение размеров пор и удельная площадь поверхности). Эти два типа адсорбции часто взаимодействуют друг с другом и работают вместе в процессе адсорбции пестицидов (Cheng et al., 2021; Dong et al., 2024; Gogoi et al., 2021). Биочар может сильно адсорбировать пестициды в почве благодаря своим рыхлым и пористым свойствам, большой удельной площади поверхности и поверхностной энергии, а также высокой ароматической структуре (Bahia, 2022). Продемонстрировано, что адсорбция обычно является первым процессом, который начинается сразу после внесения пестицидов в почву. Таким образом, способность биочара адсорбировать пестициды может быть важным фактором, который может влиять на другие процессы, такие как химический транспорт, выщелачивание, биодоступность и экотоксикологическое воздействие на окружающую среду (Khorrgram et al., 2016; Kookana et al., 2011). Адсорбционная способность биочара для гидрофобных и гидрофильных органических

соединений зависит от поверхностных гидрофильных групп, карбонизированных и некарбонизированных частей биочара, общих свойств и пористой поверхности. На поверхности биочара формируется химическая связь с функциональными группами, содержащими кислород и азот, пестицидов, тем самым стабилизируя их в почве (Gogoi et al., 2021). Биочар обладает способностью ускорять процесс деградации пестицидов в почве за счет увеличения популяции почвенных микроорганизмов. Почвенные микроорганизмы используют молекулы пестицидов, как источник питательных веществ и доноров электронов. За счет гидролиза, конъюгации и деградации, они ускоряют процесс минерализации пестицидов в почве (Wu et al., 2019). Однако механизмы, влияющие на экологическую судьбу и поведение пестицидов в почве с биочаром, для снижения экологического риска от пестицидов мало изучены (Khorram et al., 2016). Согласно данным литературы, повышение стабилизации пестицида на биочаре объясняют повышенным содержанием углерода в почве, площадью поверхности, катионообменной способностью (Caga et al., 2022; Luo et al., 2022; Yan et al., 2022). В статье Yan et al. (2022) оценили влияние биочара, полученного из рисовой соломы при 550°C, на распределение имидаклоприда в системе растение-почва-грунтовые воды. Исследование показало, что биочар с высокой площадью поверхности и пористостью может стабилизировать пестицид и снизить его потенциальный вред для растений и грунтовых вод. Отмечено снижение распределения пестицида до 0.57, 0.11 и 13.4% соответственно. Обнаружено, что выщелачивание пестицидов с помощью биочара зависит от структуры макропор почвы. Макропоры увеличивают перемещение загрязняющих веществ через почвенный профиль (Iversen et al., 2012). Применение биочара из сосновой щепы (промышленно пиролизованного при температуре от 300 до 550 °C) снизило кумулятивное выщелачивание атразина на 52% в гомогенизированных почвенных колонках (Delwiche et al., 2014).

Итак, согласно литературным данным, биочар может регулировать поведение загрязняющих веществ, таких как пестициды, тяжелые металлы (Khorram et al., 2016; Meng et al., 2025; Mi et al., 2025), что делает его потенциально полезным для восстановления почвы, загрязненной пестицидами (Lin et al., 2022; Zhang et al., 2019).

#### *4. Механизмы взаимодействия биочара с микроорганизмами*

Одним из главных этапов микробной биотехнологии является иммобилизация микроорганизмов на твердых матрицах, в частности биочаре (Deng et al., 2022; Schommer et al., 2024; Wu et al., 2019; Yu et al., 2025). Поры биочара являются местом обитания микроорганизмов, обеспечивающим убежище и питательные вещества для улучшения колонизации и развития микробных сообществ на поверхности и внутри. Иммобилизация микробных клеток на биочаре зависит от способа пиролиза, сырья и его свойств: площади поверхности, размер пор, pH, гидрофобности, функциональных групп и питательных веществ. Ключевыми факторами, влияющими на эффективность очистки иммобилизованными на биочаре микробными клетками, являются концентрация загрязняющего вещества, время инкубации, температура и pH (Schommer et al., 2023). Считают, что для иммобилизации бактерий более приемлем биочар, пиролизированный при более высоких температурах >500°C (Schommer et al., 2024). В статье K. Huang et al. (2023) обосновывают, что ключевым механизмом, посредством которого биочар влияет на микроорганизмы почвы после внесения их в почву, является следующее: структура пор биочара обеспечивает благоприятную среду обитания для микроорганизмов и способствует их росту; биочар способствует росту и размножению микроорганизмов почвы путем улучшения pH почвы, содержания воды и содержания агрегатов; биочар обеспечивает достаточное количество питательных веществ для микроорганизмов почвы; эффект адсорбции биочара снижает концентрацию и содержание токсичных и вредных веществ в почве, уменьшая токсическое воздействие вредных веществ на микроорганизмы, тем самым демонстрируя хороший потенциал для борьбы с загрязнением почвы.

Выбор микроорганизмов для иммобилизации на биочаре играет важную роль, они должны соответствовать следующим требованиям: а) быть устойчивыми к широкому спектру климатических условий; б) быть способными выживать в среде с высоким уровнем загрязнения; в) предварительно должны быть оценены на способность к деградации загрязнителя; г) должны быть непатогенными; д) демонстрировать рост; е) должны быть экологически безопасны (Schommer et

al., 2023). Обнаружено, что микроорганизмы, обладающие ростостимулирующими свойствами (PGPM) и устойчивостью к металлам при иммобилизации на биочаре смягчают абиотические стрессы, вызванные загрязняющим веществом, и выживают в этих условиях (Dai et al., 2019; Waheed et al., 2025). Иммобилизованные клетки PGPM на биочаре могут повысить эффективность удаления более 60% загрязняющих веществ из воды (Bouabidi et al., 2019). В обзоре Xiang et al. (2022) отмечают, что партнерство растений, PGPM и биочара имеет решающее значение для устойчивой рекультивации органических загрязнителей. Авторы считают, что иммобилизованные клетки демонстрируют более высокую эффективность удаления различных загрязнителей в 8 раз синергически за счет физико-химической сорбции и микробной деградации, чем не иммобилизованные PGPM клетки. Интерес к PGPM обусловлен тем, что они способствуют адаптации растений к стрессовым условиям и влияют на рост и развитие растений через различные механизмы, а именно: фиксацию азота, солюбилизацию фосфатов, синтез сидерофоров, фитогормонов и АЦК-дезаминазы, подавляя развитие фитопатогенных микроорганизмов (Albureikan, 2023; Nurzhanova et al., 2023; Rogia et al., 2022).

Процесс иммобилизации бактерий на биочаре выполняется тремя методами, которые различаются в зависимости от процедур и условий, включая адсорбцию, адаптацию и прикрепление бактерии на поверхности или внутри поры в результате электростатического взаимодействия и ковалентного связывания, и их рост. Механизмами иммобилизации клеток являются в первую очередь адсорбция и образование биопленки на биоугле, что свидетельствует об успешности иммобилизации. Метод адсорбции используют в основном в лабораторных условиях (Bouabidi et al., 2019; Wu et al., 2021). Различают два типа взаимодействия биочара с бактериями: прямое и косвенное. При прямом взаимодействии с бактериями биочар может выступать в качестве защитного барьера между бактериями и средой для бактериальной колонизации; бактерии, обитающие в биочаре, могут быстрее адаптироваться к экологическим стрессам (Ouyang et al., 2023; Zhu et al., 2017). Косвенное взаимодействие биочара с бактериями происходит за счет улучшения физико-химических свойств почвы, облегчающего выживание бактерий, повышающего их численность в почве; влияющего на подвижность тяже-

лых металлов и других вредных веществ в почве, что снижает их биологическое воздействие на бактерии (Chen et al., 2021). Отмечено, что не все биочары подходят для использования в качестве носителей для микробных клеток, жизнеспособных и биodeградирующих загрязняющие вещества. Для улучшенной ремедиации требуются материал-носитель с высокими характеристиками связывания клеток. Восстановительный процесс почвы, загрязненной тяжелыми металлами зависит от способа иммобилизации бактерий на биочаре (Ouyang et al., 2024). Рекультивации почвы зависит от механизма взаимодействия биочара и бактерий с тяжелыми металлами, при этом бактерии играют основную роль в данном процессе (Cheng et al., 2021; Ouyang et al., 2023; Wu et al., 2019). Например, биочар с очень высоким pH, чрезмерным количеством золы и неорганических или органических загрязнителей может быть токсичным и/или бесполезным для галофобных или ацидофильных растений и бактерий (Xiang et al., 2022). Например, при иммобилизации штамма *Bacillus cereus* RC-1 на биочаре, полученном из рисовой соломы, куриного помета и осадков сточных вод, выявлено, что биочар, полученный из рисовой соломы адсорбировал ионы  $Cd^{2+}$  в количестве  $159 \text{ мг г}^{-1}$  (Huang et al., 2020). Биопрепарат, созданный на основе биочара, полученного из кокосовой шелухи в качестве материала-носителя и *Arthrobacter subterraneus* в качестве активного ингредиента, эффективно снижал содержание взрывчатых веществ в почве: до 86.0% гексагидро-1,3,5-тринитро-1,3,5-триазина и 80.4% октагидро-1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетразоцина при исходной их концентрации в почве  $50 \text{ мг кг}^{-1}$ . Время выживания *Arthrobacter subterraneus* на биочаре составляло 6 месяцев (Sharma et al., 2023). На стратегию выживаемости микроорганизмов на биочаре влияют следующие факторы: доступность биогенных элементов, (углерод, азот, калии и фосфор в водорастворимой форме), наличие макропор, которые обеспечивает необходимую влажность, газообмен, снабжение кислородом, конкурентоспособность (Manikandan et al., 2023). Например, сорбция клеток *Azospirillum brasilense* SR80 на коммерческом биочаре (ООО “ДианАгро”, Россия) из древесины березы в условиях аэрации на качалке достигает 38% уже через 2 ч культивирования. Временном интервале 2-6 ч наблюдается снижение за счет десорбции не закрепившихся клеток и только через 24 ч эффективность иммобилизации составляет 53%. Численность

иммобилизованных клеток *A. brasilense* SR80 при культивировании в среде Луриа-Бертани в условиях аэрации на качалке достигает  $9.3 \times 10^9$  КОЕ г<sup>-1</sup> сухого биочара. Отмечено, что использование биочара при температуре 22 и 30°C сопровождалось увеличением биodeградации нефти до 29 и 35%, соответственно, относительно суспендированных клеток (Muratova et al., 2022).

Таким образом, микробная иммобилизация на биочаре, как новая технология представляет собой многообещающее решение для восстановления загрязненных органическими и неорганическими загрязнителями среды и вопроса повышении продуктивности в аграрном секторе. Однако, практическое совместное использование биочара и бактерий в массовом производстве затруднена сложностью их взаимодействия с учетом климатических условий и условий среды, дозировки, сроков годности; стабильности биочара, длительности транспортировки, хранения и экологической безопасности (Dai et al., 2019).

### Заключение

Микроорганизмы являются важным компонентом ремедиации почв, загрязнённых органическими и неорганическими токсикантами. Их иммобилизация на биочаре способствует снижению токсичности, подвижности и биодоступности загрязнителей, а также повышает эффективность процессов ремедиации. Несмотря на значительный прогресс в изучении биочара как инструмента восстановления деградированных загрязнённых почв, ряд фундаментальных и прикладных вопросов остается недостаточно изученным. Практическое совместное использование биочара и микроорганизмов в массовом производстве затруднено сложностью их взаимодействия, зависящего от климатических

условий, свойств окружающей среды, дозировки, сроков хранения, стабильности биочара, особенностей транспортировки, а также требований экологической безопасности.

В перспективе особое внимание следует уделить разработке технологий, основанных на использовании биочара в качестве носителя микроорганизмов, обладающих ростостимулирующими свойствами, а также созданию устойчивых микробных консорциумов, способных обеспечивать деградацию пестицидов и других стойких органических загрязнителей, одновременно способствуя иммобилизации тяжёлых металлов. Реализация этих направлений позволит повысить эффективность ремедиации и будет способствовать разработке устойчивых технологий восстановления загрязнённых экосистем.

### Конфликт интересов

Все авторы прочитали и ознакомлены с содержанием статьи и не имеют конфликта интересов.

### Источник финансирования

Исследование проведено в рамках проекта AP23487419, поддержанного Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

### Вклад авторов

Концептуализация, А.А.Н.; Методология, А.С.Н. и Ж.Ж.; Программное обеспечение, А.М.; Формальный анализ, А.Ю.М.; Исследование, А.С.Н. и Ж.Ж.; Курирование данных, А.М.; Написание текста – Подготовка первоначального варианта, А.А.Н., А.Ю.М. и А.М.; Написание текстов – рецензирование и редактирование, А.А.Н., А.Ю.М. и А.М.; Администрирование проекта, А.А.Н.; Привлечение финансирования, А.А.Н.

### Литература

- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S. S., & Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99, 19–33. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>
- Albureikan, M. O. I. (2023). Rhizosphere microorganisms with different strategies and mechanisms to enhance plant growth in the occurrence of different environmental stress factors. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 17(3), 1341–1355. <https://doi.org/10.22207/JPAM.17.3.59>
- Amalina, F., Razak, A. S. A., Krishnan, S., Zularisam, A. W., & Nasrullah, M. (2022). A comprehensive assessment of the method for producing biochar, its characterization, stability, and potential applications in regenerative economic sustainability – A review. *Cleaner Materials*, 3, 100045. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100045>

Aslam, Z., Khalid, M., Naveed, M., Shahid, M., & Aon, M. (2017). Evaluation of green waste and poplar twigs biochar produced at low and high pyrolytic temperature for efficient removal of metals from water. *Water, Air, & Soil Pollution*, 228(11), 432. <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3615-y>

Azzaz, A. A., Khiari, B., Jellali, S., Ghimbeu, C. M., & Jeguirim, M. (2020). Hydrochars production, characterization and application for wastewater treatment: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127, 109882. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109882>

Bahia, W. (2022). Adsorption-desorption behavior and pesticide bioavailability of biochar in soil. *Science Insights*, 41(6), 725–731. <https://doi.org/10.15354/si.22.re093>

Baker, A. J. M., McGrath, S. P., Reeves, R. D., & Smith, J. A. C. (2000). Metal hyperaccumulator plants: A review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils. In N. Terry & G. S. Banuelos (Eds.), *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780367803148>

Baubekova, A., Akindykova, A., Mamirova, A., Dumat, C., & Jurjanz, S. (2021). Evaluation of environmental contamination by toxic trace elements in Kazakhstan based on reviews of available scientific data. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(32), 43315–43328. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14979-z>

Beesley, L., & Marmiroli, M. (2011). The immobilisation and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar. *Environmental Pollution*, 159(2), 474–480. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.016>

Bhantana, P., Rana, M. S., Sun, X., Moussa, M. G., Saleem, M. H., Syaifudin, M., Shah, A., Poudel, A., Pun, A. B., Bhat, M. A., Mandal, D. L., Shah, S., Zhihao, D., Tan, Q., & Hu, C.-X. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi and its major role in plant growth, zinc nutrition, phosphorous regulation and phytoremediation. *Symbiosis*, 84(1), 19–37. <https://doi.org/10.1007/s13199-021-00756-6>

Boorboori, M. R., & Lackóová, L. (2023). Biochar; an effective factor in improving phytoremediation of metal(iod)s in polluted sites. *Frontiers in Environmental Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1253144>

Bouabidi, Z. B., El-Naas, M. H., & Zhang, Z. (2019). Immobilization of microbial cells for the biotreatment of wastewater: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 17(1), 241–257. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0795-7>

Brtnicky, M., Datta, R., Holatko, J., Bielska, L., Gusiatin, Z. M., Kucerik, J., Hammerschmidt, T., Danish, S., Radziemska, M., Mravcova, L., Fahad, S., Kintl, A., Sudoma, M., Ahmed, N., & Pecina, V. (2021). A critical review of the possible adverse effects of biochar in the soil environment. *Science of The Total Environment*, 796, 148756. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148756>

Brunet, R. (2001). Hauts lieux et mauvais lieux du Kazakhstan. *L'Espace géographique*, 30(1), 37–51. Cairn.info. <https://doi.org/10.3917/eg.301.0037>

Burachevskaya, M., Minkina, T., Bauer, T., Lobzenko, I., Fedorenko, A., Mazarji, M., Sushkova, S., Mandzhieva, S., Nazarenko, A., Butova, V., Wong, M. H., & Rajput, V. D. (2023). Fabrication of biochar derived from different types of feedstocks as an efficient adsorbent for soil heavy metal removal. *Scientific Reports*, 13(1), 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-27638-9>

Cara, I. G., ōpa, D., Puiu, I., & Jitǎreanu, G. (2022). Biochar a promising strategy for pesticide-contaminated soils. *Agriculture*, 12(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101579>

Chen, W., Zeng, F., Liu, W., Bu, J., Hu, G., Xie, S., Yao, H., Zhou, H., Qi, S., & Huang, H. (2021). Organochlorine pesticides in karst soil: Levels, distribution, and source diagnosis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(21), Article 21. <https://doi.org/10.3390/ijerph182111589>

Cheng, N., Wang, B., Wu, P., Lee, X., Xing, Y., Chen, M., & Gao, B. (2021). Adsorption of emerging contaminants from water and wastewater by modified biochar: A review. *Environmental Pollution*, 273, 116448. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116448>

Dai, Y., Zhang, N., Xing, C., Cui, Q., & Sun, Q. (2019). The adsorption, regeneration and engineering applications of biochar for removal organic pollutants: A review. *Chemosphere*, 223, 12–27. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.161>

Deepika, & Haritash, A. K. (2024). Phytoremediation of chromium (VI)-contaminated soil by *Euphorbia tithymaloides* L. and metagenomic analysis of rhizospheric bacterial community. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235(8), 512. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07305-z>

Delwiche, K. B., Lehmann, J., & Walter, M. T. (2014). Atrazine leaching from biochar-amended soils. *Chemosphere*, 95, 346–352. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.09.043>

Deng, M., Li, K., Yan, Y.-J., Huang, F., & Peng, D. (2022). Enhanced cadmium removal by growing *Bacillus cereus* RC-1 immobilized on different magnetic biochars through simultaneous adsorption and bioaccumulation. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(13), 18495–18507. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17125-x>

Dong, X., Chu, Y., Tong, Z., Sun, M., Meng, D., Yi, X., Gao, T., Wang, M., & Duan, J. (2024). Mechanisms of adsorption and functionalization of biochar for pesticides: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 272, 116019. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116019>

Fang, J., Gao, B., Chen, J., & Zimmerman, A. R. (2015). Hydrochars derived from plant biomass under various conditions: Characterization and potential applications and impacts. *Chemical Engineering Journal*, 267, 253–259. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.01.026>

Fijałkowska, G., Wiśniewska, M., Szewczuk-Karpisz, K., Jędruchiewicz, K., & Oleszczuk, P. (2021). Comparison of lead(II) ions accumulation and bioavailability on the montmorillonite and kaolinite surfaces in the presence of polyacrylamide soil flocculant. *Chemosphere*, 276, 130088. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130088>

Forján, R., Rodríguez-Vila, A., Cerqueira, B., Covelo, E. F., Marcet, P., & Asensio, V. (2018). Comparative effect of compost and technosol enhanced with biochar on the fertility of a degraded soil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(10), 610. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6997-4>

Gamalero, E., & Glick, B. R. (2024). Use of plant growth-promoting bacteria to facilitate phytoremediation. *AIMS Microbiology*, 10(2), 415–448. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2024021>

- Gascó, G., Paz-Ferreiro, J., Álvarez, M. L., Saa, A., & Méndez, A. (2018). Biochars and hydrochars prepared by pyrolysis and hydrothermal carbonisation of pig manure. *Waste Management*, 79, 395–403. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.015>
- Ghosh, D., & Maiti, S. K. (2021). Biochar assisted phytoremediation and biomass disposal in heavy metal contaminated mine soils: A review. *International Journal of Phytoremediation*, 23(6), 559–576. <https://doi.org/10.1080/15226514.2020.1840510>
- Gogoi, L., Narzari, R., Chutia, R. S., Borkotoki, B., Gogoi, N., & Katakai, R. (2021). Chapter Two – Remediation of heavy metal contaminated soil: Role of biochar. In A. K. Sarmah (Ed.), *Advances in Chemical Pollution, Environmental Management and Protection* (Vol. 7, pp. 39–63). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.apmp.2021.08.002>
- Gong, X., Huang, D., Liu, Y., Zeng, G., Chen, S., Wang, R., Xu, P., Cheng, M., Zhang, C., & Xue, W. (2019). Biochar facilitated the phytoremediation of cadmium contaminated sediments: Metal behavior, plant toxicity, and microbial activity. *Science of The Total Environment*, 666, 1126–1133. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.215>
- Grand View Research. (2024). *Biochar Market Size, Share & Trends Analysis Report by Technology (Gasification, Pyrolysis), By Application (Agriculture, Others), By Region (North America, Asia Pacific), And Segment Forecasts, 2024–2030* (Nos. 978-1-68038-681-3; p. 100). Grand View Research. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/biochar-market>
- Gu, J., Yao, J., Duran, R., Sunahara, G., & Zhou, X. (2020). Alteration of mixture toxicity in nonferrous metal mine tailings treated by biochar. *Journal of Environmental Management*, 265, 110511. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110511>
- Gunasundari, E., & Senthil Kumar, P. (2017). Higher adsorption capacity of *Spirulina platensis* alga for Cr(VI) ions removal: Parameter optimisation, equilibrium, kinetic and thermodynamic predictions. *IET Nanobiotechnology*, 11(3), 317–328. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2016.0121>
- Gupta, A., Sharma, V., Sharma, K., Kumar, V., Choudhary, S., Mankotia, P., Kumar, B., Mishra, H., Moulick, A., Ekielski, A., & Mishra, P. K. (2021). A review of adsorbents for heavy metal decontamination: Growing approach to wastewater treatment. *Materials*, 14(16), Article 16. <https://doi.org/10.3390/ma14164702>
- Hassan, N. S., Jalil, A. A., Izzuddin, N. M., Bahari, M. B., Hatta, A. H., Kasmani, R. M., & Norazahar, N. (2024). Recent advances in lignocellulosic biomass-derived biochar-based photocatalyst for wastewater remediation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 163, 105670. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105670>
- He, L., Zhong, H., Liu, G., Dai, Z., Brookes, P. C., & Xu, J. (2019). Remediation of heavy metal contaminated soils by biochar: Mechanisms, potential risks and applications in China. *Environmental Pollution*, 252, 846–855. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.151>
- He, M., Xiong, X., Wang, L., Hou, D., Bolan, N. S., Ok, Y. S., Rinklebe, J., & Tsang, D. C. W. (2021). A critical review on performance indicators for evaluating soil biota and soil health of biochar-amended soils. *Journal of Hazardous Materials*, 414, 125378. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125378>
- Hesham, A., Awad, Y., Jahin, H., El-Korashy, S., Maher, S., Kalil, H., & Khairy, G. (2021). Hydrochar for industrial wastewater treatment: An overview on its advantages and applications. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 11(3), 626.
- Huang, F., Li, K., Wu, R.-R., Yan, Y.-J., & Xiao, R.-B. (2020). Insight into the Cd<sup>2+</sup> biosorption by viable *Bacillus cereus* RC-1 immobilized on different biochars: Roles of bacterial cell and biochar matrix. *Journal of Cleaner Production*, 272, 122743. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122743>
- Huang, J., Tan, X., Ali, I., Duan, Z., Naz, I., Cao, J., Ruan, Y., & Wang, Y. (2023). More effective application of biochar-based immobilization technology in the environment: Understanding the role of biochar. *Science of The Total Environment*, 872, 162021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162021>
- Huang, K., Zhang, J., Tang, G., Bao, D., Wang, T., & Kong, D. (2023). Impacts and mechanisms of biochar on soil microorganisms. *Plant, Soil and Environment*, 69(2), 45–54. <https://doi.org/10.17221/348/2022-PSE>
- Ippolito, J. A., Cui, L., Kammann, C., Wrage-Mönnig, N., Estavillo, J. M., Fuertes-Mendizabal, T., Cayuela, M. L., Sigua, G., Novak, J., Spokas, K., & Borchard, N. (2020). Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: A comprehensive meta-data analysis review. *Biochar*, 2(4), 421–438. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00067-x>
- Iversen, B. V., Lamandé, M., Torp, S. B., Greve, M. H., Heckrath, G., de Jonge, L. W., Moldrup, P., & Jacobsen, O. H. (2012). Macropores and macropore transport: Relating basic soil properties to macropore density and soil hydraulic properties. *Soil Science*, 177(9), 535. <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e31826dd155>
- Janus, A., Waterlot, C., Douay, F., & Pelfrène, A. (2020). *Ex situ* evaluation of the effects of biochars on environmental and toxicological availabilities of metals and polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(2), 1852–1869. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06764-w>
- Joseph, S., Cowie, A. L., Van Zwieten, L., Bolan, N., Budai, A., Buss, W., Cayuela, M. L., Graber, E. R., Ippolito, J. A., Kuzyakov, Y., Luo, Y., Ok, Y. S., Palansooriya, K. N., Shepherd, J., Stephens, S., Weng, Z. (Han), & Lehmann, J. (2021). How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. *GCB Bioenergy*, 13(11), 1731–1764. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12885>
- Kabir, E., Kim, K.-H., & Kwon, E. E. (2023). Biochar as a tool for the improvement of soil and environment. *Frontiers in Environmental Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1324533>
- Khan, W. U., Ahmad, S. R., Yasin, N. A., Ali, A., & Ahmad, A. (2017). Effect of *Pseudomonas fluorescens* RB4 and *Bacillus subtilis* 189 on the phytoremediation potential of *Catharanthus roseus* (L.) in Cu and Pb-contaminated soils. *International Journal of Phytoremediation*, 19(6), 514–521. <https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1254154>
- Khanzada, A. K., Al-Hazmi, H. E., Kurniawan, T. A., Majtacz, J., Piechota, G., Kumar, G., Ezzati, P., Saeb, M. R., Rabiee, N., Karimi-Maleh, H., Lima, E. C., & Mąkinia, J. (2024). Hydrochar as a bio-based adsorbent for heavy metals removal: A review of production processes, adsorption mechanisms, kinetic models, regeneration and reusability. *Science of The Total Environment*, 945, 173972. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173972>

- Khawkomol, S., Neamchan, R., Thongsamer, T., Vinitnantharat, S., Panpradit, B., Sohsalam, P., Werner, D., & Mrozik, W. (2021). Potential of biochar derived from agricultural residues for sustainable management. *Sustainability*, *13*(15), Article 15. <https://doi.org/10.3390/su13158147>
- Khorram, M. S., Zhang, Q., Lin, D., Zheng, Y., Fang, H., & Yu, Y. (2016). Biochar: A review of its impact on pesticide behavior in soil environments and its potential applications. *Journal of Environmental Sciences*, *44*, 269–279. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.12.027>
- Kidd, P. S., Álvarez-López, V., Becerra-Castro, C., Cabello-Conejo, M., & Prieto-Fernández, Á. (2017). Chapter Three— Potential role of plant-associated bacteria in plant metal uptake and implications in phytotechnologies. In A. Cuypers & J. Vangronsveld (Eds.), *Advances in Botanical Research* (Vol. 83, pp. 87–126). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.abr.2016.12.004>
- Kołodźńska, D., Wnętrzak, R., Leahy, J. J., Hayes, M. H. B., Kwapiński, W., & Hubicki, Z. (2012). Kinetic and adsorptive characterization of biochar in metal ions removal. *Chemical Engineering Journal*, *197*, 295–305. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.05.025>
- Kononchuk, O., Pidlisnyuk, V., Mamirova, A., Khomenchuk, V., Herts, A., Grycová, B., Klemencová, K., Leštinský, P., & Shapoval, P. (2022). Evaluation of the impact of varied biochars produced from *M. × giganteus* waste and application rate on the soil properties and physiological parameters of *Spinacia oleracea* L. *Environmental Technology & Innovation*, *28*, 102898. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102898>
- Kookana, R. S., Sarmah, A. K., Van Zwieten, L., Krull, E., & Singh, B. (2011). Chapter Three – Biochar application to soil: Agronomic and environmental benefits and unintended consequences. In D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 112, pp. 103–143). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385538-1.00003-2>
- Lekshmi, S., Lekshmi, A. A., Achuthavari, D., & Chandran, S. S. (2024). Critical analysis of sustainable ways of removing insidious pollutants from the environment through phytoremediation techniques. *Chemistry and Ecology*, *40*(8), 892–917. (world). <https://doi.org/10.1080/02757540.2024.2365164>
- Liang, J., Chang, J., Xie, J., Yang, L., Sheteiwy, M. S., Moustafa, A.-R. A., Zaghoul, M. S., & Ren, H. (2023). Microorganisms and biochar improve the remediation efficiency of *Paspalum vaginatum* and *Pennisetum alopecuroides* on cadmium-contaminated soil. *Toxics*, *11*(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/toxics11070582>
- Lin, H., Liu, C., Li, B., & Dong, Y. (2021). *Trifolium repens* L. regulated phytoremediation of heavy metal contaminated soil by promoting soil enzyme activities and beneficial rhizosphere associated microorganisms. *Journal of Hazardous Materials*, *402*, 123829. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123829>
- Lin, Q., Tan, X., Almatrafi, E., Yang, Y., Wang, W., Luo, H., Qin, F., Zhou, C., Zeng, G., & Zhang, C. (2022). Effects of biochar-based materials on the bioavailability of soil organic pollutants and their biological impacts. *Science of The Total Environment*, *826*, 153956. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153956>
- Llovet, A., Mattana, S., Chin-Pampillo, J., Gascó, G., Sánchez, S., Mondini, C., Briones, M. J. I., Márquez, L., Alcañiz, J. M., Ribas, A., & Domene, X. (2021). Long-term effects of gasification biochar application on soil functions in a Mediterranean agroecosystem: Higher addition rates sequester more carbon but pose a risk to soil faunal communities. *Science of The Total Environment*, *801*, 149580. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149580>
- Luo, Z., Yao, B., Yang, X., Wang, L., Xu, Z., Yan, X., Tian, L., Zhou, H., & Zhou, Y. (2022). Novel insights into the adsorption of organic contaminants by biochar: A review. *Chemosphere*, *287*, 132113. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132113>
- Lwin, C. S., Kim, Y.-N., Lee, M., & Kim, K.-R. (2023). Sorption of As, Cd, and Pb by soil amendments: In situ immobilization mechanisms and implementation in contaminated agricultural soils. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(48), 105732–105741. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29298-8>
- Ma, L., Zhang, L., Zhang, S., Zhou, M., Huang, W., Zou, X., He, Z., & Shu, L. (2024). Soil protists are more resilient to the combined effect of microplastics and heavy metals than bacterial communities. *Science of The Total Environment*, *906*, 167645. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167645>
- Mahmood Al-Nuaimy, M. N., Azizi, N., Nural, Y., & Yabalak, E. (2024). Recent advances in environmental and agricultural applications of hydrochars: A review. *Environmental Research*, *250*, 117923. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117923>
- Majewska, M., & Hanaka, A. (2025). Biochar in the bioremediation of metal-contaminated soils. *Agronomy*, *15*(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/agronomy15020273>
- Mamirova, A., Pidlisnyuk, V., Amirbekov, A., Ševců, A., & Nurzhanova, A. (2021). Phytoremediation potential of *Miscanthus sinensis* And. In organochlorine pesticides contaminated soil amended by Tween 20 and Activated carbon. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*(13), 16092–16106. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11609-y>
- Mamirova, A., Pidlisnyuk, V., Hrabak, P., Shapoval, P., & Nurzhanova, A. (2024). Biochar-supported phytoremediation of dredged sediments contaminated by HCH isomers and trace elements using *Paulownia tomentosa*. *Sustainability*, *16*(20), Article 20. <https://doi.org/10.3390/su16209080>
- Mamirova, A., Nurzhanova, A., & Pidlisnyuk, V. (2019). POP pesticides and reclamation methods. *Reports of The National Academy of Sciences of The Republic of Kazakhstan*, *6*(328), 21–34. <https://doi.org/10.32014/2019.2518-1483.164>
- Manikandan, S., Vickram, S., Subbaiya, R., Karmegam, N., Woong Chang, S., Ravindran, B., & Kumar Awasthi, M. (2023). Comprehensive review on recent production trends and applications of biochar for greener environment. *Bioresource Technology*, *388*, 129725. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129725>
- Maroušek, J., Strunecký, O., & Stehel, V. (2019). Biochar farming: Defining economically perspective applications. *Clean Technologies and Environmental Policy*, *21*(7), 1389–1395. <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01728-7>
- Meng, F., Wang, Y., & Wei, Y. (2025). Advancements in biochar for soil remediation of heavy metals and/or organic pollutants. *Materials*, *18*(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/ma18071524>

- Mi, L., Liu, Y., Huang, Q., Zhao, L., Qin, X., Sun, Y., & Li, B. (2025). Enhanced adsorption and regulation mechanism of ball milling-modified biochar on Cd and atrazine in soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(9), 5091–5105. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36015-0>
- Muratova, A. Yu., Panchenko, L. V., Dubrovskaya, E. V., Lyubun', E. V., Golubev, S. N., Sungurtseva, I. Yu., Zakharevich, A. M., Biktasheva, L. R., Galitskaya, P. Yu., & Turkovskaya, O. V. (2022). Bioremediation potential of biochar-immobilized cells of *Azospirillum brasilense*. *Microbiology*, 91(5), 514–522. <https://doi.org/10.1134/S0026261722601336>
- Narayanan, M., & Ma, Y. (2022). Influences of biochar on bioremediation/phytoremediation potential of metal-contaminated soils. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.929730>
- Nebeská, D., Trögl, J., Ševců, A., Špánek, R., Marková, K., Davis, L., Burdová, H., & Pidlisnyuk, V. (2021). *Miscanthus × giganteus* role in phytodegradation and changes in bacterial community of soil contaminated by petroleum industry. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 224, 112630. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112630>
- Nguyen, T.-B., Sherpa, K., Bui, X.-T., Nguyen, V.-T., Vo, T.-D.-H., Ho, H.-T.-T., Chen, C.-W., & Dong, C.-D. (2023). Biochar for soil remediation: A comprehensive review of current research on pollutant removal. *Environmental Pollution*, 337, 122571. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122571>
- Novak, J. M., Ippolito, J. A., Ducey, T. F., Watts, D. W., Spokas, K. A., Trippe, K. M., Sigua, G. C., & Johnson, M. G. (2018). Remediation of an acidic mine spoil: *Miscanthus* biochar and lime amendment affects metal availability, plant growth, and soil enzyme activity. *Chemosphere*, 205, 709–718. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.107>
- Nsanganwimana, F., Pourrut, B., Mench, M., & Douay, F. (2014). Suitability of *Miscanthus* species for managing inorganic and organic contaminated land and restoring ecosystem services. A review. *Journal of Environmental Management*, 143, 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.04.027>
- Nurzhanova, A. A., Pidlisnyuk, V., Berzhanova, R., Nurmagambetova, A. S., Terletskaia, N., Omirbekova, N., Berkinbayev, G., & Mamirova, A. (2023). PGPR-driven phytoremediation and physiobiochemical response of *Miscanthus × giganteus* to stress induced by the trace elements. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(42), 96098–96113. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29031-5>
- Oro, C. E. D., Saorin Puton, B. M., Venquiaruto, L. D., Dallago, R. M., & Tres, M. V. (2024). Effective microbial strategies to remediate contaminated agricultural soils and conserve functions. *Agronomy*, 14(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/agronomy14112637>
- Ouyang, P., Narayanan, M., Shi, X., Chen, X., Li, Z., Luo, Y., & Ma, Y. (2023). Integrating biochar and bacteria for sustainable remediation of metal-contaminated soils. *Biochar*, 5(1), 63. <https://doi.org/10.1007/s42773-023-00265-3>
- Ouyang, X., Lin, H., Hu, Z., Zheng, Y., Li, P., & Huang, W. (2024). Effect of biochar structure on H<sub>2</sub>S emissions during sludge aerobic composting: Insights into microscale characterization and microbial mechanism. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(11), 12469–12482. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03388-y>
- Pahnila, M., Koskela, A., Sulasalmi, P., & Fabritius, T. (2023). A review of pyrolysis technologies and the effect of process parameters on biocarbon properties. *Energies*, 16(19), Article 19. <https://doi.org/10.3390/en16196936>
- Pichtel, J. (2016). Oil and gas production wastewater: Soil contamination and pollution prevention. *Applied and Environmental Soil Science*, 2016, e2707989. <https://doi.org/10.1155/2016/2707989>
- Pidlisnyuk, V., Newton, R. A., & Mamirova, A. (2021). *Miscanthus* biochar value chain—A review. *Journal of Environmental Management*, 290, 112611. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112611>
- Pilon-Smits, E. (2005). Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*, 56(1), 15–39. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144214>
- Poria, V., Dębiec-Andrzejewska, K., Fiodor, A., Lyzohub, M., Ajjah, N., Singh, S., & Pranaw, K. (2022). Plant Growth-Promoting Bacteria (PGPB) integrated phytotechnology: A sustainable approach for remediation of marginal lands. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.999866>
- Prapagdee, S., & Tawinteung, N. (2017). Effects of biochar on enhanced nutrient use efficiency of green bean, *Vigna radiata* L. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(10), 9460–9467. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8633-1>
- Radziemska, M., Gusiatin, Z. M., Mazur, Z., Hammerschmidt, T., Bęś, A., Kintl, A., Galiova, M. V., Holatko, J., Blazejczyk, A., Kumar, V., & Brtnicky, M. (2022). Biochar-assisted phytostabilization for potentially toxic element immobilization. *Sustainability*, 14(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/su14010445>
- Rathnayake, D., Rego, F., Van Poucke, R., Bridgwater, A. V., Mašek, O., Meers, E., Wang, J., Yang, Y., & Ronsse, F. (2021). Chemical stabilization of Cd-contaminated soil using fresh and aged wheat straw biochar. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(8), 10155–10166. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11574-6>
- Rees, F., Simonnot, M. O., & Morel, J. L. (2014). Short-term effects of biochar on soil heavy metal mobility are controlled by intra-particle diffusion and soil pH increase. *European Journal of Soil Science*, 65(1), 149–161. <https://doi.org/10.1111/ejss.12107>
- Reyhaniatabar, A., Frahadi, E., Ramezanzadeh, H., & Oustan, S. (2020). Effect of pyrolysis temperature and feedstock sources on physicochemical characteristics of biochar. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 22(2), 547–561. <http://jast.modares.ac.ir/article-23-26722-en.html>
- Safirova, E. (2019). The mineral industry of Kazakhstan. In *2015 Minerals Yearbook [Advanced release]* (p. 24.1-24.16). US Department of the Interior & US Geological Survey.
- Schimmelpfennig, S., & Glaser, B. (2012). One step forward toward characterization: some important material properties to distinguish biochars. *Journal of Environmental Quality*, 41(4), 1001–1013. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0146>

- Schommer, V. A., Nazari, M. T., Melara, F., Braun, J. C. A., Rempel, A., dos Santos, L. F., Ferrari, V., Colla, L. M., Dettmer, A., & Piccin, J. S. (2024). Techniques and mechanisms of bacteria immobilization on biochar for further environmental and agricultural applications. *Microbiological Research*, 278, 127534. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127534>
- Schommer, V. A., Vanin, A. P., Nazari, M. T., Ferrari, V., Dettmer, A., Colla, L. M., & Piccin, J. S. (2023). Biochar-immobilized *Bacillus* spp. for heavy metals bioremediation: A review on immobilization techniques, bioremediation mechanisms and effects on soil. *Science of The Total Environment*, 881, 163385. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163385>
- Sharma, K., Sharma, P., & Sangwan, P. (2023). Bioremediation of RDX and HMX contaminated soil employing a biochar-based bioformulation. *Carbon Research*, 2(1), 33. <https://doi.org/10.1007/s44246-023-00068-y>
- Sharma, R., Kumar, R., Hajam, Y. A., & Rani, R. (2022). Chapter 21—Role of biotechnology in phytoremediation. In R. A. Bhat, F. M. P. Tonelli, G. H. Dar, & K. Hakeem (Eds.), *Phytoremediation* (pp. 437–454). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89874-4.00021-2>
- Song, J.-S., Lim, S.-H., Lim, Y., Nah, G., Lee, D., & Kim, D.-S. (2016). Herbicide-based weed management in miscanthus sacchariflorus. *BioEnergy Research*, 9(1), 326–334. <https://doi.org/10.1007/s12155-015-9693-z>
- Tarla, D. N., Erickson, L. E., Hettiarachchi, G. M., Amadi, S. I., Galkaduwa, M., Davis, L. C., Nurzhanova, A., & Pidlisnyuk, V. (2020). Phytoremediation and bioremediation of pesticide-contaminated soil. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(4), Article 4. Scopus. <https://doi.org/10.3390/app10041217>
- Tomczyk, A., Sokółowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19(1), 191–215. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>
- Tsao, D. T. (2003). Overview of phytotechnologies. In D. T. Tsao (Ed.), *Phytoremediation* (Vol. 78, pp. 1–50). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/3-540-45991-X\\_1](https://doi.org/10.1007/3-540-45991-X_1)
- Upadhyayula, V. K. K., Deng, S., Smith, G. B., & Mitchell, M. C. (2009). Adsorption of *Bacillus subtilis* on single-walled carbon nanotube aggregates, activated carbon and NanoCeram™. *Water Research*, 43(1), 148–156. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.09.023>
- Wagner, A., & Kaupenjohann, M. (2015). Biochar addition enhanced growth of *Dactylis glomerata* L. and immobilized Zn and Cd but mobilized Cu and Pb on a former sewage field soil. *European Journal of Soil Science*, 66(3), 505–515. <https://doi.org/10.1111/ejss.12246>
- Waheed, A., Xu, H., Qiao, X., Aili, A., Yiremaikebayi, Y., Haitao, D., & Muhammad, M. (2025). Biochar in sustainable agriculture and climate mitigation: Mechanisms, challenges, and applications in the circular bioeconomy. *Biomass and Bioenergy*, 193, 107531. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107531>
- Wan, X., Lei, M., & Chen, T. (2016). Cost–benefit calculation of phytoremediation technology for heavy-metal-contaminated soil. *Science of The Total Environment*, 563–564, 796–802. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.080>
- Wu, B., Wang, Z., Zhao, Y., Gu, Y., Wang, Y., Yu, J., & Xu, H. (2019). The performance of biochar-microbe multiple biochemical material on bioremediation and soil micro-ecology in the cadmium aged soil. *Science of The Total Environment*, 686, 719–728. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.041>
- Wu, J., Fu, X., Zhao, L., Lv, J., Lv, S., Shang, J., Lv, J., Du, S., Guo, H., & Ma, F. (2024). Biochar as a partner of plants and beneficial microorganisms to assist in-situ bioremediation of heavy metal contaminated soil. *Science of The Total Environment*, 923, 171442. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171442>
- Wu, P., Wang, Z., Bhatnagar, A., Jeyakumar, P., Wang, H., Wang, Y., & Li, X. (2021). Microorganisms-carbonaceous materials immobilized complexes: Synthesis, adaptability and environmental applications. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 125915. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125915>
- Xiang, L., Harindintwali, J. D., Wang, F., Redmile-Gordon, M., Chang, S. X., Fu, Y., He, C., Muhoza, B., Brahushi, F., Bolan, N., Jiang, X., Ok, Y. S., Rinklebe, J., Schaeffer, A., Zhu, Y., Tiedje, J. M., & Xing, B. (2022). Integrating biochar, bacteria, and plants for sustainable remediation of soils contaminated with organic pollutants. *Environmental Science & Technology*, 56(23), 16546–16566. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c02976>
- Yan, A., Wang, Y., Tan, S. N., Mohd Yusof, M. L., Ghosh, S., & Chen, Z. (2020). Phytoremediation: A promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00359>
- Yan, P., Zou, Z., Li, X., Zhang, L., Zhang, L., Fu, J., & Wenyan, H. (2022). Biochar changed the distribution of imidacloprid in a plant–soil–groundwater system. *Chemosphere*, 307, 136213. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136213>
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12), 1781–1788. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>
- Yu, K., Wang, Z., Yang, W., Li, S., Wu, D., Zheng, H., Ye, Z., Yang, S., & Liu, D. (2025). Application of biochar-immobilized *Bacillus megaterium* for enhancing phosphorus uptake and growth in rice. *Plants*, 14(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/plants14020214>
- Zhang, M., Muhammad, R., Zhang, L., Xia, H., Cong, M., & Jiang, C. (2019). Investigating the effect of biochar and fertilizer on the composition and function of bacteria in red soil. *Applied Soil Ecology*, 139, 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.03.021>
- Zhang, Y., Chen, P., Liu, S., Peng, P., Min, M., Cheng, Y., Anderson, E., Zhou, N., Fan, L., Liu, C., Chen, G., Liu, Y., Lei, H., Li, B., & Ruan, R. (2017). Effects of feedstock characteristics on microwave-assisted pyrolysis – A review. *Bioresource Technology*, 230, 143–151. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.046>
- Zhu, X., Chen, B., Zhu, L., & Xing, B. (2017). Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: A review. *Environmental Pollution*, 227, 98–115. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.04.032>

Zhu, X., Li, C., Li, J., Xie, B., Lü, J., & Li, Y. (2018). Thermal treatment of biochar in the air/nitrogen atmosphere for developed mesoporosity and enhanced adsorption to tetracycline. *Bioresource Technology*, 263, 475–482. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.041>

Литвинович, А. В., Хаммам, А. А. М., Лаврищев А. В., & Павлова, О. Ю. (2016). Мелиоративные свойства и удобрительная ценность различных по размеру фракций биоугля (по данным лабораторных экспериментов). *Агрохимия*, 2016, 9, 39-46.

**Сведения об авторах:**

Асиль Нуржанова – доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории физиологии и биохимии растений Института биологии и биотехнологии растений (Алматы, Казахстан, e-mail: gen\_asil@mail.ru).

Асия Нурмагамбетова – старший научный сотрудник лаборатории физиологии и биохимии растений Института биологии и биотехнологии растений, (Алматы, Казахстан, e-mail: asiyanurm@mail.ru).

Анна Муратова – доктор биологических наук, заведующая лабораторией экологической биотехнологии Института биохимии и физиологии растений и микроорганизмов ФИЦ Саратовский научный центр РАН (Саратов, Российская Федерация, email: muratova\_a@ibppm.ru).

Жадыра Жумашева – научный сотрудник лаборатории физиологии и биохимии растений Института биологии и биотехнологии растений (Алматы, Казахстан, e-mail: zhoomash.zh@mail.ru).

Айгерим Мамирова (автор корреспонденции) – Ph.D., ассоциированный профессор кафедры биотехнология факультета биологии и биотехнологии Казахского Национального Университета им. Аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: aigerim.mamirova@mail.com).

**Information about the authors:**

Asil Nurzhanova – Doctor of Biological Sciences, Chief Researcher of the Laboratory of Plant Physiology and Biochemistry of the Institute of Plant Biology and Biotechnology (Almaty, Kazakhstan, e-mail: gen\_asil@mail.ru).

Assiya Nurmagambetova – Senior Researcher of the Laboratory of Plant Physiology and Biochemistry of the Institute of Plant Biology and Biotechnology (Almaty, Kazakhstan, e-mail: asiyanurm@mail.ru).

Anna Muratova – Doctor of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Environmental Biotechnology, Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms, Federal Research Center “Saratov Scientific Center” of the Russian Academy of Sciences (Saratov, Russian Federation, e-mail: muratova\_a@ibppm.ru).

Zhadyra Zhumasheva – Researcher of the Laboratory of Plant Physiology and Biochemistry of the Institute of Plant Biology and Biotechnology (Almaty, Kazakhstan, e-mail: zhoomash.zh@mail.ru).

Aigerim Mamirova (corresponding author) – Ph.D., Associate Professor at the Department of Biotechnology, Faculty of Biology and Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University, (Almaty, Kazakhstan, e-mail: aigerim.mamirova@mail.com).

**Авторлар туралы мәлімет:**

Асиль Нуржанова – биология ғылымдарының докторы, Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институтының Өсімдіктер физиологиясы және биохимиясы зертханасының бас ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: gen\_asil@mail.ru).

Асия Нурмагамбетова – Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институтының Өсімдіктер физиологиясы және биохимиясы зертханасының аға ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: asiyanurm@mail.ru).

Анна Муратова – биология ғылымдарының докторы, РФЗИ «Саратов ғылыми орталығы» РАН-ның Өсімдіктер мен микроағзалардың биохимиясы және физиологиясы институтының экологиялық биотехнология лабораториясының меңгерушісі (Саратов, Ресей Федерациясы, e-mail: muratova\_a@ibppm.ru).

Жадыра Жумашева – Өсімдіктер физиологиясы және биохимиясы зертханасының ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: zhoomash.zh@mail.ru).

Айгерим Мамирова (корреспонденттік автор) – Ph.D., әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің биология және биотехнология факультетінің Биотехнология кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Алматы, Қазақстан, e-mail: aigerim.mamirova@mail.com).

Поступило 22 мая 2025 года

Принято 15 июня 2026 года

---

## АВТОРЛАРҒА АРНАЛҒАН АҚПАРАТ ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ INFORMATION FOR AUTHORS

### Требования к научной статье для опубликования в журнале «Вестник КазНУ. Серия биологическая»:

✓ Редакционная коллегия принимает ранее неопубликованные экспериментальные статьи по научным направлениям журнала. Статья представляется в электронном формате (в форматах .doc, .docx, .rtf) ТОЛЬКО посредством ее загрузки через функционал сайта журнала (Open Journal System или Editorial Manager).

✓ Кегль шрифта – 12 (аннотация, ключевые слова, литература – 10, текст таблиц – 9–11), шрифт – Times New Roman, выравнивание – по ширине текста, интервал – одинарный, абзацный отступ – 0,8 см, поля: верхнее и нижнее – 2 см, левое и правое – 2 см.

✓ Объем статьи (без учета названия, сведений об авторах, аннотации, ключевых слов, библиографического списка) должен составлять не менее 1 500–7 000 слов для естественнонаучных и технических направлений.

✓ При подаче статьи авторы должны отправить заполненную заявку, сопроводительное письмо и рукопись статьи, оформленную по нижеуказанным правилам.

✓ Авторы в ОБЯЗАТЕЛЬНОМ порядке должны указать в сопроводительном письме в системе Open Journal System или Editorial Manager о том, что направляемая статья/рукопись нигде ранее не публиковалась, и что в статье отсутствуют заимствованные фрагменты текста из других работ без ссылок на них.

✓ Порядок оплаты и стоимость за публикацию статьи устанавливается издательским домом «Казак университеті» и производится автором после одобрения внешними рецензентами и научным редактором.

### Структура статьи:

Работы, оформленные без соблюдения этих правил, возвращаются без рассмотрения.

#### *Первая страница:*

**Первая строка – номер МРНТИ**

**Название статьи (Заголовок)**

**Автор(ы) статьи**

**Орси́д ID но́мера авторов**

**Сокращения и обозначения**


**Аннотация**

**Ключевые слова/словосочетания**

**Первая строка – номер МРНТИ** (в исключительных случаях УДК), выравнивание – по левому краю, шрифт – полужирный. Номер МРНТИ необходимо найти на сайте <http://grnti.ru/>.

**Название статьи (Заголовок)** должно отражать суть и содержание статьи и привлекать внимание читателя. Название должно быть кратким, информативным и не содержать жаргонизмов или аббревиатур. Оптимальная длина заголовка – 5–7 слов (в некоторых случаях 10–12 слов). Название статьи должно быть представлено на русском, казахском и английском языках. Название статьи представляется полужирным шрифтом строчными буквами, выравнивание – по центру.

✓ **Автор(ы) статьи** – количество авторов не ограничено. В список должны входить данные авторов, которые имеют прямое отношение к написанию статьи, те, кто выполнял эксперименты и получил данные и результаты, отраженные в статье, те, кто является автором основной идеи публикации.

Сведения об авторах представляются обычным шрифтом строчными буквами, выравнивание – по центру. Принадлежность авторов к определенному месту работы указывается в виде надстрочных индексов до фамилии<sup>1,2,3</sup>. Авторы из одной и той же организации указываются под одинаковой надстрочной цифрой. Для авторов КазНУ обязательное указание ID номеров ORCID с использованием гиперссылки в значке , для авторов сторонних организаций по желанию. Корреспондентный автор отмечается надстрочным знаком\*.

<sup>1</sup>Инициалы и фамилия, <sup>2</sup>Инициалы и фамилия\*

<sup>1</sup>место работы (аффилиация), город, страна

<sup>2</sup>место работы (аффилиация), город, страна

\*Корреспондентный автор – e-mail

Корреспондентным автором является тот автор, который ведет переписку с редакцией до и после печати и отвечает на все замечания и исправления по статье. Важно указать действующий электронный адрес и контактные данные при подачи статьи.

- 
1. **Сокращения и обозначения** – если имеются.
  - ✓ **Аннотация** объемом **не менее 150 слов, не более 300 слов** на русском, казахском и английском языках.
  - Структура аннотации включает в себя следующие **ОБЯЗАТЕЛЬНЫЕ пункты**:
    1. Вступительное слово о теме исследования.
    2. Цель, основные направления и идеи научного исследования.
    3. Краткое описание научной и практической значимости работы.
    4. Краткое описание методологии исследования.
    5. Основные результаты и анализ, выводы исследовательской работы.
    6. Ценность проведенного исследования (внесенный вклад данной работы в соответствующую область знаний).
    7. Практическое значение итогов работы.
  - ✓ **Ключевые слова/словосочетания** – количеством 3–5 на русском, казахском и английском языках.

**Последующая страница (новая):**

**Введение**

**Материалы и Методы**

**Результаты и Обсуждение**

**Заключение, выводы**

**Благодарности**

**Источник финансирования**

**Конфликт интересов**

**Литература**

**Введение** состоит из следующих основных элементов:

✓ Обоснование выбора темы; актуальность темы или проблемы. В обосновании выбора темы на основе описания опыта предшественников сообщается о наличии проблемной ситуации (отсутствие каких-либо исследований, появление нового объекта и т.д.). Актуальность темы определяется общим интересом к изученности данного объекта, но отсутствием исчерпывающих ответов на имеющиеся вопросы, она доказывается теоретической или практической значимостью темы.

✓ В секции должны быть охвачены фундаментальные и новые труды по исследуемой тематике зарубежных авторов на английском языке (не менее 15 трудов), анализ данных трудов с точки зрения их научного вклада, а также пробелы в исследовании, которые Вы дополняете в своей статье.

✓ Определение объекта, предмета, целей, задач, методов, подходов, гипотезы и значения вашей работы. Цель исследования связана с доказательством тезиса, то есть представлением предмета исследования в избранном автором аспекте.

**Материалы и Методы** – должны состоять из описания материалов и хода работы, а также полного описания использованных методов.

✓ Характеристика или описание материала исследования включает его представление в качественном и количественном отношении. Характеристика материала – один из факторов, определяющий достоверность выводов и методов исследования.

✓ В этом разделе описывается, как проблема была изучена: подробная информация без повторения ранее опубликованных установленных процедур; используется идентификация оборудования (программного обеспечения) и описание материалов, с обязательным внесением новизны при использовании материалов и методов.

✓ Научная методология должна включать в себя:

✓ - исследовательский вопрос(-ы);

✓ - выдвигаемую гипотезу (тезис);

✓ - этапы исследования;

✓ - методы исследования;

✓ - результаты исследования.

✓ НЕДОПУСТИМО наличие множества ссылок, не имеющих отношения к работе, или неуместные суждения о ваших собственных достижениях, ссылки на Ваши предыдущие работы.

**Результаты и Обсуждение** – приводится анализ и обсуждение полученных вами результатов исследования. Приводятся выводы по полученным в ходе исследования результатам, раскрывается основная суть. И это один из самых важных разделов статьи. В нем необходимо провести анализ результатов своей работы и обсуждение соответствующих результатов в сравнении с предыдущими работами иностранных и отечественных авторов, анализами и выводами.

**Заключение, выводы**

Обобщение и подведение итогов работы на данном этапе; подтверждение истинности выдвигаемого утверждения, высказанного автором, и заключение автора об изменении научного знания с учетом полученных результатов. Выводы не должны быть абстрактными, они должны быть использованы для обобщения результатов исследования в той или иной научной области, с описанием предложений или возможностей дальнейшей работы.

Структура заключения должна содержать следующие вопросы: Каковы цели и методы исследования? Какие результаты получены? Каковы выводы? Каковы перспективы и возможности внедрения, применения разработки?

**Конфликт интересов** – желательно указать имеющиеся конфликты интересов со стороны авторов и соавторов касательно материалов статьи. Если нет никаких конфликтов к опубликованию материалов в статье, указать, что авторы не имеют конфликта интересов.

**Благодарности** – Перечислите людей, которые оказали помощь во время исследования (например, предоставили помощь в переводе, письменную помощь или предоставили материал/оборудование для работы и т.д.)

**Источник финансирования** – Следует указать в рамках какого проекта или программы была выполнена работа, указать год и номер договора по проекту/программе.

### Литература

Список используемой литературы, или Библиографический список состоит из не менее 25 наименований литературы для естественнонаучных и технических направлений и из общего числа наименований на английском языке должно быть не менее 50%.

Для естественнонаучных статей ссылки оформляются в квадратных скобках с указанием нумерации по мере появления цитируемых работ в тексте. Стиль оформления списка литературы согласно ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления» (требование к изданиям, входящих в перечень ККСОН).

Далее следует второй список литературы (**References**, который должен быть предоставлен в другой форме, то есть – романизированным алфавитом (транслитерация). **References** ТОЛЬКО те работы, которые цитируются в тексте. Reference оформляется в алфавитном порядке!

Романизированный список литературы должен выглядеть в следующем виде для источников на кириллице: автор(-ы) (транслитерация) → (год в круглых скобках) → название статьи в транслитерированном варианте [перевод названия статьи на английский язык в квадратных скобках], название русскоязычного источника (транслитерация, либо английское название – если есть), выходные данные с обозначениями на английском языке.

**Например:** Gokhberg L., Kuznetsova T. (2011) Strategiya-2020: novye kontury rossiiskoi innovatsionnoi politiki [Strategy 2020: New Outlines of Innovation Policy]. *Foresight-Russia*, vol. 5, no 4, pp. 8–30.

Стиль оформления Романизированного списка литературы из источников на английском (другом иностранном) языке для естественнонаучных и технических направлений – Chicago Style ([www.chicagomanualofstyle.org](http://www.chicagomanualofstyle.org)).

Cramer W., Bondeau A., Woodward F.I., Prentice I.C., Betts R.A., Brovkin V., Cox P.M., Fisher V., Foley J.A., Friend A.D., Kucharik C., Lomas M.R., Ramankutty N., Sitch S., Smith B., White A., Young-Molling C. (2001) Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO<sub>2</sub> and climate change: Results from six dynamic global vegetation models. *Glob. Change Biol.*, vol. 7, pp. 357–373.

#### В данном разделе необходимо учесть:

- Цитируются основные научные публикации, передовые методы исследования, которые применяются в данной области науки и на которых основана работа автора.
- Избегайте чрезмерных самоцитирований.
- Избегайте чрезмерных ссылок на публикации авторов СНГ/СССР, используйте мировой опыт (Pubmed, Web of Science). Не следует ссылаться на энциклопедии, монографии, диссертации и материалы, на которые нет общего доступа.
- Библиографический список должен содержать фундаментальные и наиболее актуальные труды, опубликованные известными зарубежными авторами и исследователями по теме статьи.

**Стоимость публикации** – 60 000 тенге/страница

#### 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 KZ19998СТВ0000567141 – тенге

ИИК KZ40998СТВ0000567151 – USD

БИК TSESKZKA

## МАЗМҰНЫ – CONTENTS – СОДЕРЖАНИЕ

<b>1-бөлім</b> <b>Ботаника</b>	<b>Section 1</b> <b>Botany</b>	<b>Раздел 1</b> <b>Ботаника</b>
<p>Т.Б. Рысқали, А.А. Аметов, С.С. Мауленова, С.Т. Назарбекова, А.Ж. Чилдибаева, Ч.Ж. Алдасугурова                      Особенности флористического состава первой популяции эндемичного вида <i>Rosa dsharkenti</i> Chrshan. в нижнем                      течении реки Усек ..... 4</p>		
<p>G.A. Sadyrova, M.M. Dautbayeva, A.A. Shormanova, K.K. Khamitova, G.A. Sadyrov, S.A. Userbayeva,                      T.M. Zhaparkulov, M.O. Aitzhanova, Z.M. Yeraliyeva, Z.A. Orynbayeva                      Assessment of the ecological state of the population of the species <i>Schmalhausenia nidulans</i> (Regel) petr. of the flora of the                      Northern Tien Shan ..... 18</p>		
<p>Zh.E. Aimenova, F.A. Ubaev, Sh.E. Duisseybayev, G.E. Islamova, A.M. Esimova, S.D. Dzhumanov                      Seed mass and hydration characteristics of <i>Mediasia macrophylla</i> (regel et schmalh.) pimenov ..... 30</p>		
<p>А.Б. Мылтыкбаева, А.С. Нурмаханова, С.Д. Атабаева, Ш.Ж. Алдасугурова, М.А. Дюсебаева, М.К. Нармуратова,                      А.С. Муратбаева, Ш. Турайлова, Ү.К. Ошақбай                      Бақанас каналы жайылмасындағы <i>Calligonum alatum</i> Litw. өсімдігінің ценопопуляцияларының қазіргі                      жағдайын бағалау ..... 41</p>		
<p>R.M. Ualiyeva, A.V. Osipova, N.A. Diyanchuk, M.M. Kaverina, S.B. Zhangazin, A.U. Tuyakbayeva                      Identification of Barley Phytopathologies Based on Spectral Signatures Obtained via Hyperspectral Imaging ..... 54</p>		
<b>2-бөлім</b> <b>Зоология</b>	<b>Section 2</b> <b>Zoology</b>	<b>Раздел 2</b> <b>Зоология</b>
<p>С.Е. Шарахметов, Ж.М. Баққожа, Н.С. Сапарғалиева А.Т. Сатбек                      Қапшағай су қоймасындағы қаракөз <i>Rutilus caspicus</i> (Yakovlev 1870) популяциясының құрылымдық және                      кеністіктегі таралу ерекшеліктері ..... 82</p>		
<b>3-бөлім</b> <b>Молекулалық биология</b> <b>және генетика</b>	<b>Section 3</b> <b>Molecular biology</b> <b>and genetics</b>	<b>Раздел 3</b> <b>Молекулярная биология</b> <b>и генетика</b>
<p>Б.О. Бекманов, Т.Н. Карымсаков, П.Ж. Сайлаубек, К.Ж. Досыбаев, Қ. Ерғали, М.А. Тореханов, Т. Қапасұлы,                      А. Қожахмет, А. Тапелов, З. Бектасов                      Әуликөл тұқымының генетикалық әртүрлілігін snp-маркерлерді қолдана отырып бағалау ..... 94</p>		
<b>4-бөлім</b> <b>Биотехнология</b>	<b>Section 4</b> <b>Biotechnology</b>	<b>Раздел 4</b> <b>Биотехнология</b>
<p>А.Т. Бигараева, Н. Алибаев, О. Бекетауов, Т.С. Биғара, А.Т. Еремекбаева                      Индукция суперовуляции каракульских овец бежевой окраски для трансплантации эмбрионов ..... 104</p>		
<p>M.A. Khusnitdinova, A.S. Pozharskiy, A.S. Mendybayeva, G.A. Suleimanova, G.N. Kairova, A.O. Sagitov                      Mapping of weed distribution in Southern Kazakhstan ..... 113</p>		
<p>Ә.Н. Махамбетов, Р.Т. Кенжебекова, Б. Дулат, З.К. Даирбекова, Д.А. Гриценко                      Энтмопатогенді саңырауқұлақ <i>Beauveria bassiana</i>-ның <i>Halyomorpha halys</i>-қа әсері ..... 123</p>		
<p>С.Д. Жантлесова, Ж.Т. Мусабеков, Ж. Хамитқызы, А.Б. Талипова, А.С. Кистаубаева                      Жаркенттің геотермалдық көздерінен бөлінген термофильді бактериялардың пластикті ыдырату әлеуеті ..... 137</p>		

<b>5-бөлім</b> <b>Экология</b>	<b>Section 5</b> <b>Ecology</b>	<b>Раздел 5</b> <b>Экология</b>
<p>Е.Х. Мендыбаев, С.У. Зуфаров, Г.А. Гатаулина, М.Ж. Шарипова  Оценка углеродного баланса на основе определения продуктивности растительных сообществ степных экосистем  Акмолинской области ..... 148</p>		
<b>6-бөлім</b> <b>Адам мен жануарлар</b> <b>физиологиясы</b>	<b>Section 6</b> <b>Humans and animals</b> <b>physiology</b>	<b>Раздел 6</b> <b>Физиология человека</b> <b>и животных</b>
<p>А.Қ. Ахатжанова, Ф.Б. Амутова, М.А. Нурсейтова, Н.Н. Ахметсадыков, Г.С. Конуспаева, С. Юрьянц  Оценка биодоступности хлорорганических пестицидов с использованием модели желудочно-кишечного тракта кур ... 160</p>		
<b>Шолу мақалалар</b>	<b>Review articles</b>	<b>Обзорные статьи</b>
<p>Z.T. Syeda Bukhari  Innovative technologies for the monitoring and protection of plants: from molecular diagnostics to artificial intelligence ..... 174</p>		
<p>А.А. Нуржанова, А.Ю. Муратова, А.С. Нурмагамбетова, Ж.Е. Жумашева, А. Мамирова  Биочар – инструмент экологической биотехнологии ..... 193</p>		
<p>Авторларға арналған ақпарат ..... 208</p>		