ISSN 1563-034X; eISSN 2617-7358

ӘЛ-ФАРАБИ атындағы ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ

ХАБАРШЫ

Экология сериясы

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени АЛЬ-ФАРАБИ

ВЕСТНИК

Серия экологическая

AL-FARABI KAZAKH NATIONAL UNIVERSITY

EURASIAN JOURNAL

of Ecology

№3 (88)

Алматы
«Қазақ университеті»
2026

ISSN 1563-034X; eISSN 2617-7358

KazNU Science · ҚазҰУ Хабаршы · Наука КазНУ

ХАБАРШЫ

ЭКОЛОГИЯ СЕРИЯСЫ №3 (88) қыркүйек



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

Куәлік № 16501-Ж

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

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

РЕДАКЦИЯ АЛҚАСЫ:
Заядан Б.К., б.ғ.д., профессор, ҚР ҰҒА академигі, (ғылыми редактор) (*Қазақстан*)
Колумбаева С.Ж., б.ғ.д., профессор (ғылыми редактордың орынбасары) (*Қазақстан*)
Курманбаева М.С., б.ғ.д., профессор (*Қазақстан*)
Жубанова А.А., б.ғ.д., профессор (*Қазақстан*)
Шалахметова Т.М., б.ғ.д., профессор (*Қазақстан*)
Кенжебаева С.С., б.ғ.д., профессор (*Қазақстан*)
Атабаева С.Дж., б.ғ.д., профессор (*Қазақстан*)
Садырова Г.А., б.ғ.д., профессор (*Қазақстан*)
Абилев С.К., б.ғ.д., профессор (*Қазақстан*)
Тажибаева Т.Л., б.ғ.к., профессор м.а. (*Қазақстан*)
Бияшева З.М., б.ғ.к., доцент (*Қазақстан*)
Мамилов Н.Ш., б.ғ.к., доцент (*Қазақстан*)
Инелова З.А., б.ғ.к., доцент (*Қазақстан*)
Кушнаренко С.В., б.ғ.к., доцент (*Қазақстан*)
Тастамбек Қ.Т., PhD, доцент (*Қазақстан*)
Дигель И., PhD докторы, профессор (*Германия*)
Маторин Д., б.ғ.д., профессор (*Ресей*)
Рахман Е., PhD, профессор (*Қытай*)
Liu Xiangrong, профессор (*Қытай*)
Тамо Тацуя, PhD, профессор (*Жапония*)
Аллахвердиев Сулейман, б.ғ.д., профессор (*Ресей*)
Каримов Б., б.ғ.д., профессор (*Өзбекстан*)

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

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

ҚАЗАҚ УНИВЕРСИТЕТІ
БАСПА ҮЙІ

Жоба менеджері
Гульмира Шаккозова
Телефон: +7 701 724 2911
e-mail: Gulmira.Shakkozova@kaznu.kz

ИБ № 18129

Пішімі 60x84/8. Көлемі 18,3 б.т. Тапсырыс № 4538.
Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің «Қазақ университеті» баспа үйі.
050040, Алматы қаласы, әл-Фараби даңғылы, 71.

Баспа журналдың ішкі мазмұнына жауап бермейді.

© Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, 2026

1-бөлім

ҚОРШАҒАН ОРТАНЫ ҚОРҒАУ ЖӘНЕ ҚОРШАҒАН ОРТАҒА АНТРОПОГЕНДІК ФАКТОРЛАРДЫҢ ӘСЕРІ

Section 1

ENVIRONMENTAL IMPACT OF ANTHROPOGENIC FACTORS AND ENVIRONMENTAL PROTECTIONY

Раздел 1

ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ И ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

ҒТАМР 87.53.91; 70.25.00 https://doi.org/10.26577/EJE208830126

Г.М. Адильбаева*, С.Х. Акназаров, О.С. Байракова, М.А. Бийсенбаев

«Жалын» ғылыми өндірістік-техникалық орталығы, Алматы, Қазақстан
*e-mail: adilbaevagulnaz@mail.ru

ҚҰРЫЛЫС КЕРАМИКАСЫ ТЕХНОЛОГИЯСЫНДА МЕХАНОАКТИВТЕНДІРІЛГЕН ҰШПА КҮЛДІ ҚОЛДАНУ

Жұмыста жылу электр станцияларының механоактивтендірілген ұшпа күлін қолдану кезінде құрылыс керамикасының құрылымы мен қасиеттерінің қалыптасу заңдылықтары зерттелді. Алдын ала механоактивтендіру бөлшектердің ұсақталуы және кристалдық құрылым ақауларының жинақталуы есебінен күлдің реакциялық қабілетін едәуір арттыратыны көрсетілді. Керамикалық масса құрамына механоактивтендірілген күлді енгізу жентектелу үдерістерін қарқындатып, күйдіру температурасын төмендетуге және материалдың тығыздау құрылымын қалыптастыруға ықпал ететіні анықталды. Күлдің оңтайлы мөлшері кезінде үлгілердің сығылу беріктігінің артуы және су сіңіргіштігінің төмендеуі тәжірибе жүзінде расталды. Алынған нәтижелер құрылыс керамикасын өндіруде техногендік шикізатты пайдаланудың жоғары тиімділігін көрсетеді және механоактивтендіруді құрылым түзілуін мақсатты түрде басқарудың перспективалы әдісі ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: ұшпа күл, механоактивтендіру, құрылыс керамикасы, жентектелу, құрылым, беріктік, техногендік шикізат.

G.M. Adilbayeva*, S.Kh. Aknazarov, O.S. Bayrakova, M.A. Biisenbayev

«Zhalyn» Scientific Production and Technical Center, Almaty, Kazakhstan
*e-mail: adilbaevagulnaz@mail.ru

Application of mechanically activated fly ash in construction ceramics technology

The study examines the patterns governing the formation of the structure and properties of construction ceramics when using mechanically activated fly ash from thermal power plants. It is shown that preliminary mechanical activation leads to a significant increase in the reactivity of the ash due to an increase in dispersion and the accumulation of defects in the crystal structure. It has been established that introducing mechanically activated ash into the ceramic mass intensifies sintering processes, helps reduce the firing temperature, and promotes the formation of a denser material structure. Experimental confirmation has been provided for the increase in compressive strength and the reduction in water absorption of the samples at an optimal ash content. The obtained results indicate the high efficiency of using technogenic raw materials in the production of construction ceramics and allow us to consider mechanical activation as a promising method for the targeted control of structure formation.

Keywords: fly ash, mechanical activation, construction ceramics, sintering, structure, strength, technogenic raw materials.

Г.М. Адильбаева*, С.Х. Акназаров, О.С. Байракова, М.А. Бийсенбаев

Научный производственно-технический центр «Жалын», Алматы, Казахстан
*e-mail: adilbaevagulnaz@mail.ru

Применение механоактивированной золы уноса в технологии строительной керамики

В работе исследованы закономерности формирования структуры и свойств строительной керамики при использовании механоактивированной золы-уноса тепловых электростанций. Показано, что предварительная механоактивация приводит к существенному повышению реакционной способности золы за счёт увеличения дисперсности и накопления дефектов кристаллической структуры. Установлено, что введение механоактивированной золы в состав керамической массы интенсифицирует процессы спекания, способствует снижению температуры обжига и формированию более плотной структуры материала. Экспериментально подтверждено повыше-

 © 2026 Al-Farabi Kazakh National University

ние прочности при сжатии и снижение водопоглощения образцов при оптимальном содержании золы. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности использования техногенного сырья в производстве строительной керамики и позволяют рассматривать механоактивацию как перспективный метод направленного управления структурообразованием.

Ключевые слова: зола-уноса, механоактивация, строительная керамика, спекание, структура, прочность, техногенное сырьё.

Кіріспе

Құрылыс индустриясының қазіргі даму жағдайында табиғи ресурстарды ұтымды пайдалану және техногендік қалдықтарды шаруашылық айналымға тарту мәселесі ерекше өзекті болып отыр. Жылу электр станцияларында көмір жағу кезінде түзілетін күл-қож қалдықтарының елеулі көлемі қоршаған ортаға теріс әсер етеді және оларды кәдеге жаратудың тиімді тәсілдерін қажет етеді [1, 2]. Перспективалы бағыттардың бірі – оларды құрылыс материалдарын, соның ішінде керамикалық бұйымдарды өндіруде қолдану.

Негізінен кремний, алюминий, темір және кальций оксидтерінен тұратын ұшпа күлдің химиялық құрамы құрылыс керамикасы технологиясында қолданылатын дәстүрлі сазды шикізаттың құрамына көп жағынан жақын [3, 4]. Бұл оны қалыптау массаларының функционалдық компоненті ретінде пайдалануға негіз болады. Алайда оның шыны тәрізді құрылымы мен ірі дисперсті күйіне байланысты реакциялық қабілетінің салыстырмалы түрде төмен болуы шектеуші фактор болып табылады.

Осыған байланысты материалдың физика-химиялық күйін едәуір өзгертуге мүмкіндік беретін механоактивтендіру әдістерін қолдану ерекше қызығушылық тудырады. Қарқынды механикалық әсер нәтижесінде агрегаттар бұзылып, бөлшектердің өлшемі кішірейеді, меншікті бет ауданы ұлғаяды және кристалдық торда ақаулар түзіледі. Соның нәтижесінде заттың химиялық белсенділігі артады [9].

Бұл салада жекелеген зерттеулер болғанымен, ұшпа күлді механоактивтендірудің құрылым түзілу үдерістеріне және құрылыс керамикасының пайдалану қасиеттерінің қалыптасуына кешенді әсері жеткілікті зерттелмеген. Осы жайт керамикалық материалдардың физика-механикалық сипаттамаларына механоактивтендірілген ұшпа күлдің әсер ету заңдылықтарын анықтауға бағытталған зерттеудің өзектілігін айқындайды.

Зерттеу әдістері

Тәжірибелік зерттеулер Алексеев кен орнының сазды шикізатын және Алматы ЖЭО-2 күл-қож қалдықтарын пайдалана отырып жүргізілді. Аталған материалдар Қазақстандағы құрылыс керамикасының шикізат базасына тән әрі қолжетімді болғандықтан таңдалды.

Шикізатты дайындау кептіруді, ұсақтауды және стандартты елеуіштер жиынтығынан өткізуді қамтыды. Үшпа күл планетарлық ортадан тепкіш диірменде қосымша механоактивтендірілді (1-сурет). Бұл материалдың қарқынды үнтақталуын және дисперстілігінің артуын қамтамасыз етті. Активтендіру уақыты өзгертіліп отырды, бұл механикалық әсер дәрежесінің соңғы өнім қасиеттеріне ықпалын бағалауға мүмкіндік берді.

1-сурет
Fritsch Pulverisette 6 Classic Line планетарлық монодиірмені



Қалыптау массалары үшпа күлдің әртүрлі мөлшерімен дайындалды, содан кейін олардан жартылай құрғақ престеу әдісімен үлгілер жасалды (2-сурет). Бұл әдіс керамикалық кірпіш өндірісінде кеңінен қолданылатындықтан және тығыздығы жоғары, шөгуі аз бұйымдарды алуға мүмкіндік беретіндіктен таңдалды [12].

2-сурет
Үлгілер



3-сурет
Муфель пеші



Қалыпталған үлгілер бақыланатын жағдайларда кептірілді, содан кейін муфель пешінде (3-сурет) 900–1100 °С температура аралығында күйдірілді. Мұндай температура аралығы күлдің және оның активтену дәрежесінің жентектелу үдерістеріне әсерін бақылауға мүмкіндік берді.

Алынған материалдардың қасиеттерін бағалау үшін тығыздығы, су сіңіргіштігі және сығылу беріктігі сынақтан өткізілді. Сонымен қатар гранулометриялық құрам талданып, бастапқы шикізаттың химиялық-минералогиялық сипаттамалары бағаланды.

Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау

Химиялық-минералогиялық талдау зерттелген үшпа күлдің құрамы сазды шикізатқа жақын екенін көрсетті. Сондықтан оны керамикалық массаларда қолдануға болады. Оксидтердің арақатынасы бойынша жарамдылықтың есептік критерийлері бұл материалдың қалыптау массасының иілімділігі мен шөгуін реттейтін иілімділікті төмендеткіш қоспа ретінде қызмет ете алатынын көрсетті.

Күлді механоактивтендіру бөлшектердің орташа өлшемін 80–100 мкм-ден 20–40 мкм-ге дейін азайтып, меншікті бет ауданын 1,8–2,3 есе арттырды. Физика-химиялық қасиеттердің мұндай өзгеруі күйдіру кезінде сұйық фазаның түзілуін жеделдетіп, жентектелу температурасын 50–100 °С-қа төмендетті.

Физика-механикалық сынақтар қалыптау массасындағы күлдің оңтайлы мөлшері шамамен 20 % екенін көрсетті. Бұл ретте үлгілердің тығыздығы 1,65–1,70 г/см³-тен (бақылау үлгілері) 1,75–1,80 г/см³-ке, сығылу беріктігі 15–18 МПа-дан 20–25 МПа-ға дейін артты, ал су сіңіргіштігі 12–14 %-дан 9–11 %-ға дейін төмендеді.

Тәжірибе нәтижелері үшпа күлді механоактивтендіру жентектелу үдерістерінің кинетикасын едәуір өзгертетінін көрсетеді. Бөлшектердің дисперстілігі мен кристалдық құрылым ақауларының артуы диффузиялық үдерістерді жеделдетіп, керамикалық дененің тығыздау құрылымын қалыптастырады. Жентектелу температурасының төмендеуі энергия шығынын азайтуға, ал беріктік сипаттамаларының жақсаруы материалдың дәстүрлі керамикамен бәсекеге қабілетті болуына мүмкіндік береді.

Зерттеудің ғылыми жаңалығы механоактивтендіру дәрежесінің керамикалық бұйымдардың физика-механикалық қасиеттеріне әсерін сан-

дық түрғыдан анықтауда және күлдің оңтайлы мөлшерін белгілеуде жатыр. Жұмыс бастапқы шикізатты өзгерту арқылы құрылым түзілуін мақсатты түрде басқару мүмкіндігін көрсетеді. Бұл құрылыс керамикасының ресурсты үнемдейтін технологиясындағы перспективалы бағыт болып табылады.

Осылайша, механоактивтендірілген үшпа күлді қолдану өнеркәсіп қалдықтарын кәдеге жаратуға әрі бұйымдардың пайдалану сипаттамаларын жақсартуға мүмкіндік береді. Бұл технологиялық және экологиялық міндеттерді кешенді шешуге жағдай жасайды.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеулер жылу электр станцияларының үшпа күлін құрылыс керамикасын өндіруге арналған шикізат қоспасының компоненті ретінде тиімді қолдануға болатынын көрсетті. Алдын ала механоактивтендіру күлдің реакциялық қабілетін арттырудың тиімді әдісі екені және жентектелу мен материал құрылымының қалыптасу үдерістеріне мақсатты түрде әсер етуге мүмкіндік беретіні анықталды.

Механоактивтендірілген күлді енгізу күйдіру температурасын төмендетуге, су сіңіргіштігін азайтуға және бұйымдардың беріктігін арттыруға ықпал ететіні анықталды. Күлдің шамамен 20 % мөлшері анағұрлым ұтымды болып табылады: осы мөлшерде технологиялық және пайдалану сипаттамаларының оңтайлы үйлесімі қамтамасыз етіледі.

Осылайша, механоактивтендірілген үшпа күлді пайдалану құрылыс керамикасының сапасын арттырумен қатар, өнеркәсіп қалдықтарын кәдеге жаратуға және қоршаған ортаға түсетін жүктемені азайтуға қатысты маңызды экологиялық міндеттерді шешуге мүмкіндік береді [1].

Авторлардың қосқан үлесі

Г.М. Адильбаева: тұжырымдама мен әдіснаманы әзірлеу, ғылыми жетекшілік, қолжазбаны редакциялау және пысықтау; С.Х. Акназаров: ғылыми жетекшілік, зерттеуді жүргізу, қолжазбаны редакциялау және пысықтау; О.С. Байракова: тұжырымдама мен әдіснаманы әзірлеу бойынша ғылыми кеңес беру, мәтінді рецензиялау және редакциялау; М.А.Бийсенбаев: зерттеуді жүргізу, деректерді жинау, өңдеу және валидациялау (растау).

Әдебиеттер

Guzman, I. Ya. (Ed.). (2012). *Khimicheskaya tekhnologiya keramiki* [Chemical technology of ceramics]. (In Russian)

Kondratenko, V. A. (2005). *Keramicheskie stenovye materialy* [Ceramic wall materials]. Kompozit. (In Russian)

Saybulatov, S. S. (2000). *Polusukhoe pressovanie* [Semi-dry pressing]. (In Russian)

Solodanina, N. V., & Kolosova, Yu. (2018). Tekhnogennye otkhody kak sostavnaya chast' stroitel'nykh materialov [Technogenic waste as a component of building materials]. *Alleya nauki*, (2)(18). https://alley-science.ru/ (In Russian)

Tselykovskiy, Yu. K. (2000). Napravleniya ispol'zovaniya zoloshlakovykh otkhodov TES [Directions for the use of ash and slag waste from thermal power plants]. *Elektricheskie stantsii*, (10), 25–30. (In Russian)

Vlasova, V. V., & Vlasov, A. I. (2009). Mekhanoaktivatsiya zoloshlakov [Mechanical activation of ash and slag]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. (In Russian)

Авторлар туралы мәлімет:

Адильбаева Гульназ Максутовна – «Жалын» ғылыми-өндірістік техникалық орталығының аға ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: adilbaevagulnaz@mail.ru).

Акназаров Сестагер Хусаинович – химия ғылымдарының докторы, «Жалын» ғылыми-өндірістік техникалық орталығының бас директоры (Алматы, Қазақстан, e-mail: sestager@mail.ru).

Байракова Ольга Степановна – инженер-химик, «Жалын» ғылыми-өндірістік техникалық орталығының аға ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: o.bayrakova@inbox.ru).

Бийсенбаев Махмуд Ахмеджанович – химия ғылымдарының кандидаты, «Жалын» ғылыми-өндірістік техникалық орталығының жетекші ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: bijsenbay@gmail.com).

Information about the authors:

Gulnaz M. Adilbayeva – Senior Researcher at the Scientific Production and Technical Center «Zhalyn» (Almaty, Kazakhstan, e-mail: adilbaevagulnaz@mail.ru).

Sestager Kh. Aknazarov – Doctor of Chemical Sciences, Director General of the Scientific Production and Technical Center "Zhalyn" (Almaty, Kazakhstan, e-mail: sestager@mail.ru).

Olga S. Bairakova – Chemical Engineer, Senior Researcher at the Scientific Production and Technical Center "Zhalyn" (Almaty, Kazakhstan, e-mail: o.bayrakova@inbox.ru).

Makhmud A. Biisenbayev – Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher at the Scientific Production and Technical Center "Zhalyn" (Almaty, Kazakhstan, e-mail: bijsenbay@gmail.com).

Сведения об авторах:

Адильбаева Гульназ Максутовна – старший научный сотрудник Научно-производственного технического центра «Жалын» (Алматы, Казахстан, e-mail: adilbaevagulnaz@mail.ru).

Акназаров Сестагер Хусаинович – доктор химических наук, генеральный директор Научно-производственного технического центра «Жалын» (Алматы, Казахстан, e-mail: sestager@mail.ru).

Байракова Ольга Степановна – инженер-химик, старший научный сотрудник Научно-производственного технического центра «Жалын» (Алматы, Казахстан, e-mail: o.bayrakova@inbox.ru).

Бийсенбаев Махмуд Ахмеджанович – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник Научно-производственного технического центра «Жалын» (Алматы, Казахстан, e-mail: bijsenbay@gmail.com).

Поступила 14 мая 2026 года
Принята 25 сентября 2026 года

МРНТИ 87.53.91; 70.25.00 https://doi.org/10.26577/EJE208830226

Н.К. Булатов*, А.Б. Ахметжанова, К.С. Касымжанова, С.З. Елюбаев, О.Ш. Оразов

Кокшетауский университет им. А. Мырзахметова, Кокшетау, Казахстан
*e-mail: nurzhanbulatov@gmail.com

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМИ РЕЖИМАМИ В ПРОЦЕССЕ БИОГАЗОВОГО ТОПЛИВА

Данная статья представляет исследование по выявлению эффективной переработки органических отходов со сточных вод и получения качественного биогазового топлива, путем оптимального математического моделирования и выстраивания алгоритма автоматического управления переходами температурных режимов между мезофильным (35–40°C) и термофильном (50–55°C), при анаэробном сбраживании (АС) из сточных вод производительным объемом 10 м^3/сутки на малой биогазовой установке с выходом метана. Для анаэробного сбраживания применяется субстрат со смесью первичного и вторичного осадков от очистного сооружения (ОСВ), размещенного к строению в городе Кокшетау (Казахстан) с подсоединением к городской канализационной сети. Данный субстрат имеет показатели ХПК 2500 ÷ 3000 мг/л и содержит органические вещества 60–80% от сухого вещества. Кинетическая модель построена с включением четырех независимых ингибиторных функций, таких как, температурная (Моно-Аррениус), pH, свободного аммиака (NH_3) и летучих жирных кислот (ЛЖК). Алгоритм управления реализуется пятью уровнями приоритета с защитным периодом охлаждения 15 суток, с темпом изменения температуры 5 суток. Полученные результаты верифицированы по 34 критериям с показаниями 100%-го соответствия нормам. Биогазовая установка при данной производительности обеспечила выработку электрической мощности при мезофильном режиме 1,5–2 кВт и при термофильном режиме доходит до 2,4 кВт с приростом на 33%. Осадки субстрата с повышенным содержанием белкового азота при работе по данному алгоритму обеспечивает своевременное предотвращение ингибирование аммиаком и тем самым, обеспечивает бесперебойную и равномерную работу биогазовых установок с выходом качественного метана.

Ключевые слова: анаэробное сбраживание, осадки сточных вод, термофильный режим, мезофильный режим, качественный биогаз, математическое моделирование, автоматическое управление, летучие жирные кислоты, аммиак, биогазовая установка.

N.K. Bulatov*, A.B. Akhmetzhanova,
K.S. Kasymzhanova, S.Z. Yelyubaev, O.S. Orazov

A. Myrzakhmetov Kokshetau University, Kokshetau, Kazakhstan
*e-mail: nurzhanbulatov@gmail.com

Mathematical modeling and algorithm of temperature control in the biogas fuel process

This article is a study on the identification of effective processing of organic waste from wastewater and the production of high–quality biogas fuel, through optimal mathematical modeling and expression of an algorithm for automatic control of temperature transitions between mesophilic (35-40 ° C) and thermophilic (50-55 °C), during anaerobic digestion (AC) from wastewater. with a productive volume of 10 m3/day in a small biogas plant with methane output. For anaerobic digestion, a substrate with a mixture of primary and secondary precipitation from a sewage treatment plant located for construction in the city of Kokshetau (Kazakhstan) with connection to the urban sewerage network is used. This substrate has cod values of 2500 - 3000 mg/l and contains organic substances of 60-80% of the dry matter. The kinetic model is constructed with the inclusion of four independent inhibitory functions, such as temperature (Mono-Arrhenius), pH, free ammonia (NH_3) and volatile fatty acids (VFA). The control algorithm is implemented by five priority levels with a protective cooling period of 15 days, with a temperature change rate of 5 days. The results were verified according to 34 criteria with indicators of 100% compliance with (Verein Deutscher Ingen, 2016; IEA Bioenergy, 2023; Metcalf et al., 2014; Mao et al., 2015). At this capacity, the biogas plant provided electrical power generation in the mesophilic mode

 © 2026 Al-Farabi Kazakh National University

of 1.5 – 2 kW and in the thermophilic mode it reached 2.4 kW with an increase of 33%. Precipitation of a substrate with a high content of protein nitrogen when working according to this algorithm ensures timely prevention of ammonia inhibition and thereby ensures uninterrupted and uniform operation of biogas plants with high-quality methane output.

Keywords: anaerobic digestion, sewage sludge, thermophilic regime, mesophilic regime, high-quality biogas, mathematical modeling, automatic control, volatile fatty acids, ammonia, biogas plant.

Н.Қ. Болатов*, А.Б. Ахметжанова,
Қ.С. Касымжанова, С.З. Елюбаев, О.Ш. Оразов
А. Мырзахметов атындағы Көкшетау университеті, Көкшетау, Қазақстан
*e-mail: nurzhanbulatov@gmail.com

Биогаз отыны процесінде температуралық режимдерді басқарудың математикалық модельдеуі және алгоритмі

Бұл мақала ағынды сулардан органикалық қалдықтарды тиімді өңдеуді анықтау және оңтайлы математикалық модельдеу және мезофильді (35 – 40°C) және термофильді (50 – 55°C) арасындағы температуралық режимдердің ауысуын автоматты басқару алгоритмін білдіру арқылы сапалы биогаз отынын алу, ағынды сулардан анаэробты ашыту (ас) кезінде зерттеу болып табылады. Метан шығатын шағын биогаз қондырғысының өнімділігі тәулігіне 10 м^3. Анаэробты ашыту үшін қалалық кәріз желісіне қосыла отырып, Көкшетау қаласында (Қазақстан) құрылысқа орналастырылған тазарту құрылысынан (ОСВ) бастапқы және қайталама қалдықтар қоспасы бар субстрат қолданылады. Бұл субстрат 2500 ÷ 3000 мг/л HDL көрсеткіштеріне ие және құрамында құрғақ заттың 60-80% органикалық заттар бар. Кинетикалық модель температура (Моно-Аррениус), pH, бос аммиак (NH_3) және ұшпа май қышқылдары (LFK) сияқты төрт тәуелсіз ингибиторлық функцияларды қосумен құрылған. Басқару алгоритмі басымдықтың бес деңгейімен, салқындату кезеңі 15 тәулікпен, температураның өзгеру қарқыны 5 тәулікпен жүзеге асырылады. Алынған нәтижелер осы (нормаларға 100% сәйкестік көрсеткіштерімен 34 критерий бойынша тексерілді. Биогаз қондырғысы осы өнімділікпен 1,5 – 2 кВт мезофильді режимде электр қуатын өндіруді қамтамасыз етті және термофильді режимде 33% өсіммен 2,4 кВт-қа жетті. Осы алгоритм бойынша жұмыс істеу кезінде ақуыз азотының мөлшері жоғары субстраттың тұндырылуы аммиакпен тежелудің уақтылы алдын алуды қамтамасыз етеді және сол арқылы сапалы метанның шығуымен биогаз қондырғыларының үздіксіз және біркелкі жұмысын қамтамасыз етеді.

Түйін сөздер: анаэробты ашыту, ағынды сулардың жауын-шашыны, термофильді режим, мезофильді режим, сапалы биогаз, математикалық модельдеу, автоматты басқару, ұшпа май қышқылдары, аммиак, биогаз қондырғысы.

Введение

Выбор температурных режимов анаэробного сбраживания достаточно изучен и как у мезофильного, так и у термофильного режимов по температуре имеются свои преимущества и недостатки. Правильное совмещение данных температурных режимов с переключением в необходимый момент является малоизученным и имеет потенциал по усовершенствованию прохождения анаэробного процесса с эффективными выходами данных, что придает актуальность данному исследованию. Целью данного исследования является определение математической модели и алгоритма управления температурными режимами в процессе анаэробного сбраживания с выходом качественного биогазового топлива и бесперебойной работы биогазовой установки. Ключевой элемент очистки городских сточных вод с выведением осадков для образования субстрата проходящий анаэробное сбраживание представлен биогазовым установкам. Объем образуемых осадков городских станций аэрации по Республике Казахстан, в совокупности превышает 2,5 млн тонн в год относительно сухого вещества. Из них не более 15% только проходят утилизацию с извлечением энергии (Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan, 2023). В стране к 2030 году до 15% предусмотрено увеличить долю возобновляемых источников энергии согласно государственной программе «Жасыл Қазақстан», а проекты анаэробного сбраживания осадков сточных вод биогазовыми установками представляются наиболее экономически доступными и перспективными в достижении данных показателей с попутным достижением значительного снижения органических отходов, углеродного следа и повысить качество пользования воды.

Осадок сточных вод от городских очистных сооружений является гетерогенным субстратом с широким диапазоном вариабельности состава. В составе первичного осадка преобладают легкодоступные углеводы и жиры, а во вторичном, так называемом активном иле преобладает белковый азот, который влияет на риски образования аммиачного ингибирования при термофильном режиме. Предприятия легкой и пищевой промышленности, связанные с переработкой и выбросом осадков в сточные воды городской канализации создают дополнительные условия по увеличению органической нагрузки и концентрации летучих жирных кислот. Данные динамические условия приводят к нестабильности процесса при фиксированных температурных режимах анаэробного сбраживания (Kwon et al., 2019; Government of the Republic of Kazakhstan, 2021).

Разработка алгоритмов автоматического переключения температурных режимов в процессе анаэробного сбраживания и производства биогаза является актуальной задачей, так как большинство оперативного персонала очистных станций не только Казахстана, но и в мире, не располагают как реагировать по формализованным протоколам на резкие отклонения параметров анаэробного сбраживания и регулирование влияния их на выход качественного биогаза. Системы SCADA, которые используются в контроле данных процессов, в основном ограничиваются мониторингом температуры в определенном одном режиме и общего объема выделяемого биогаза, который не учитывает совокупное ингибирующее воздействие летучих жирных кислот и NH_3. Данные не учеты и являются часто причиной аварийной остановки и сбоя работы биогазовых установок, образуя закисление реактора (Angelidaki et al., 2009).

Данная работа направлена на достижение цели по разработке и верификации математической модели кинетики развития метаногенеза в органических отходах осадков сточных вод с учетом многофакторных функций ингибирования, а также выстроить правильный алгоритм автоматического управления температурными режимами с своевременным переключением на нужный диапазон. Научной новизной работы являются:

- при любых концентрациях субстрата обеспечивается строгая монотонность через применяемости экспоненциальной модели ингибирования летучих жирных кислот;

- интеграция в единую иерархическую логику управления пятью независимыми ингибиторными функциями;

- адаптация к специфике осадка сточных вод параметров модели, как субстрат, имеющий переменное содержание белкового азота.

Материалы и методы

Параметры субстрата и эксплуатационные характеристики установки

Исходными данными для моделирования объекта являются следующие:

- биогазовая установка одноступенчатая с подачей субстрата непрерывном виде (CSTR), которая получает рабочую смесь первичным осадком 40% по массе и вторичным осадком в виде избыточного активного ила 60% по массе от очистного сооружения сточных вод производительностью 10 $м^3$/сутки подсоединенная к городским системам водоотведения. Данный комплексный объект по очистке сточных вод, биогазовой установкой и электрическим генератором номинальной мощности 2 кВт и максимальной мощности 2,5 кВт, размещен на территории Кокшетауского университета имени А. Мырзахметова. Данный класс установок типичны для малых локальных хозяйств и предприятий с собственной системой водоотведения (Angelidaki et al., 2009);

- субстрат с основными характеристиками при указанной производительности ХПК – 2500 ÷ 3000 мг/л с содержанием осадков сточных вод 65 ÷ 75% от СВ, общим азотом 40 ÷ 80 гН/кгСВ (30 ÷ 50% из которых – насыщен органическим азотом белкового происхождения), жирами 15 ÷ 25% от ОВС. При этом, в базовом сценарии органической нагрузкой Q_C = 2,5 кгХПК/$м^3$•сутки, с суточным объемом подачи субстрата определяемый по условиям поддержания заданного ГВУ = 20 сутки при мезофильном и 15 суток при термофильном режиме (гидравлическое время удержания). Это соответствует $V_P \approx 150 \div 200$ $м^3$ – рабочий объем реактора. Данные по операционным параметрам для мезофильного и термофильного режимов приведены в таблице 1.

Таблица 1
Данные по операционным параметрам температурных режимов анаэробного сбраживания осадков сточных вод

Параметр	Единица измерения	Мезофильный режим	Термофильный режим	Источник
Температурный диапазон	°C	35 ÷ 40	50 ÷ 55	(Verein Deutscher Ingen, 2016)
Температура оптимального значения	°C	37	53	(Verein Deutscher Ingen, 2016)
pH диапазоны	-	6,8 ÷ 7,5	7,0 ÷ 7,8	(Metcalf & Eddy, et al. 2014)
CH_4 выход эталонный	$м^3$/кгХПК	0,45	0,6	(IEA Bioenergy, 2023)
Уровень летучих жирных кислот (ЛЖК) предельный	мг/л	2000	3000	(Mao et al., 2015)
Уровень NH_3 предельный	мг/л	1500	800	Sprott & Patel, (1986)
Время удержания гидравлическое	сут	20	15	(Verein Deutscher Ingen, 2016)
Органическая нагрузка максимальная	кгХПК/ $м^3$•сутки	3,5	6,0	(Metcalf & Eddy, et al. 2014)
Длительность перехода	сут	5	5	(Batstone D.J., et al. 2002)
Осадок сточных вод ХПК	мг/л	2500 ÷ 3000	2500 ÷ 3000	(Metcalf & Eddy, et al. 2014)
Содержание ОВС осадка	% от СВ	60 ÷ 80	60 ÷ 80	(WEF, 2012)
Примечание: составлено автором на основе данных приведенных в источниках				

Математическая модель кинетики развития метаногенеза в органических отходах из осадков сточных вод

Суммарной биологической активностью консорциума процесса метаногенеза $\varepsilon(t)$ дается описание состоящая из произведения четырех независимых функция ингибирования:

$$\varepsilon(t) = f_T \cdot f_{pH} \cdot f_{ЛЖК} \cdot f_{NH_3}, \quad (1)$$

Базой функции температуры f_T является модифицированное уравнение Моно-Аррениуса, в которой отражена гауссовая нормировка по отношению к оптимальной температуре T_{opt}:

$$f_T = exp\left[-0{,}5 \cdot \left(\left(T - T_{opt}\right)/\sigma_T\right)^2\right],$$
$$\sigma_T = (T_{max} - T_{min})/2, \quad (2)$$

Моделирование pH-ингибирования осуществляет линейная функция насыщения, в которой большая чувствительность метаногенов к закислению отражена несимметричностью, с наличием крутизны 3,0 ниже и 2,0 выше оптимума:

$$f_{pH} = max\{0 * \ 1 - 3 \cdot (pH_{min} - pH)\},$$
$$\text{при } pH < pH_{min}, \quad (3)$$

С учетом всего диапазона концентрации осадков сточных вод обеспечивающая строгую монотонность экспоненциальная функция убывания описывает ингибирование летучих жирных кислот (полиномиальные модели насыщаются при $c < c_{max}$, что отличают от данной функции):

$$f_{ЛЖК} = exp\left[-2{,}5 \cdot (c_{ЛЖК}/c_{max} - 0{,}5)\right],$$
$$\text{при } c_{ЛЖК} > 0{,}5 \cdot c_{max}, \quad (4)$$

Взаимосвязь мгновенного выхода биогаза $Y(t)$ и потока (CH_4) метана – $Q_{CH4}(t)$ выражается следующими соотношениями:

$$Y(t) = Y_{ref} \cdot \varepsilon(t) \cdot \xi(t);$$
$$Q_{CH4}(t) = \left(Q_s \cdot V_p \cdot Y(t)\right)/24, \quad (5)$$

где Y_{ref} – удельный (эталонный) выход метана CH_4 ($м^3$/кгХПК); V_p – объем рабочего реактора (параметр модели масштабирования), $м^3$; $\xi(t)$ – случайный компонент Гаусса $\sigma = 4\%$, который имитирует флуктуацию состава осадка сточных вод.

Алгоритм автоматического управления переходами температурных режимов

Реализация алгоритма построена на иерархической системе с 5-ю уровнями приоритета.

Оценка условий последовательном порядке производится на каждом шаге $\Delta t = 1$ сутка:

1. Критический: баланс уровня pH < 6,5 или при летучих жирных кислотах $c_{ЛЖК} > 1{,}5 \cdot c_{max} \rightarrow$ необходимо выполнение принудительного возврата в мезофильный режим. Определение данного порога исходит из необратимости подавления метаногенов ацетокластического характера при уровне pH когда ниже 6,5 в условиях осадков сточных вод (Batstone et al., 2002);

2. Срочный: $c_{NH3} > 0{,}8NH_3 max$ при режиме термофильной температуры → принудительное возвращение в мезофильный режим. 0,8 – это 80% порог в соответствии начала ингибирования при уровне $f_{NH3} = 0{,}36$. Это приводит к эмпирическому коррелированию со снижением выхода метана CH_4 в диапазоне 20 – 35% (Hansen et al., 1998);

3. Эффективность: $\eta_{КПД} < 0{,}65$ (то есть 65%) → происходит оценивание целесообразности необходимости смены режима учитывая текущую стабильность $t_{стаб} \geq 7$ суток;

4. Оптимизация: $\eta_{КПД} < 0{,}92$ при мезофильном режиме, а $t_{стаб} < 7$ суток и $c_{NH3} < 0{,}7NH_3 max_termo \rightarrow$ необходимо осуществление перехода на термофильный режим, что максимизирует выработку биогаза (метана);

5. Защитный период: защитный период охлаждения 15 суток между разными переключениями, градиент темпа изменения температуры ≤ 3 °C/сутки (целевое T достигает за 5 суток).

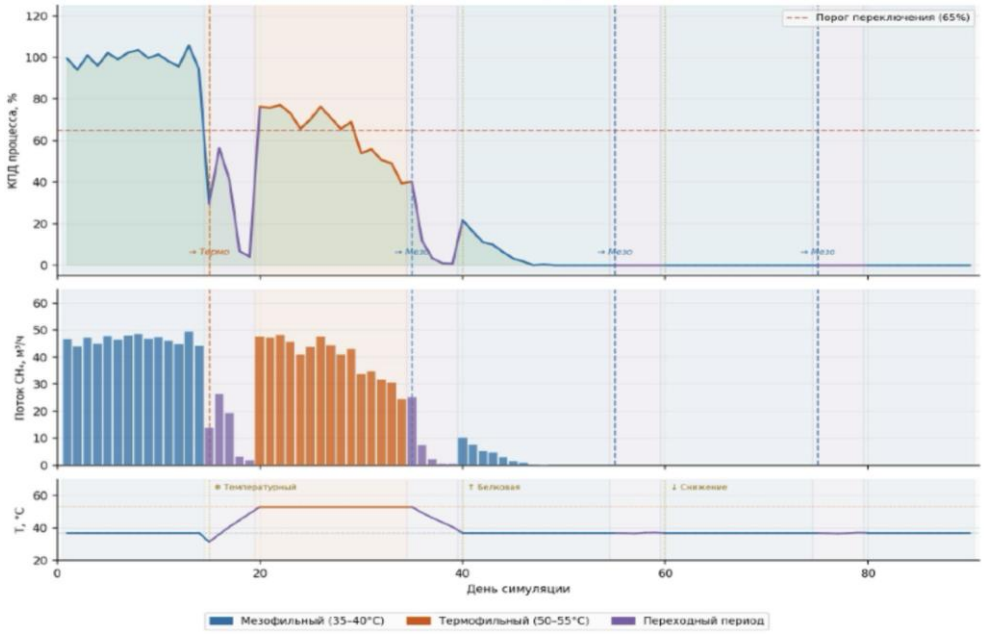
Результаты и их обсуждение

Динамика построения основных параметров и порядок переключения режимов

Сводную динамику КПД процесса в %-ах, объемный поток CH_4 в $м^3/ч$ и за период симуляции 90 суток изменение температуры реактора приведены на рисунке 1. Типично для очистных сооружений в реальности воспроизводится сценарий основанный на 3-х характерных возмущениях: реактор внезапно приводится к охлаждению (на 15-ый день имитирование аварию теплообменника), идет сброс в сток от пищевых предприятий с поступлением высококонцентрированного белка (на 40-ой день) и при условиях профилактической работы идет снижаемость подачи осадка (что продемонстрировано на 60-ый день).

Рисунок 1

Динамика изменения $\eta_{КПД}$, объемный поток CH_4 и температуры реактора в процессе анаэробного сбраживания осадков сточных вод



Сценарии: день 15 – авария теплообменника; день 40 – поступление насыщенного белкового стока; 60 день – снижаемость подачи.

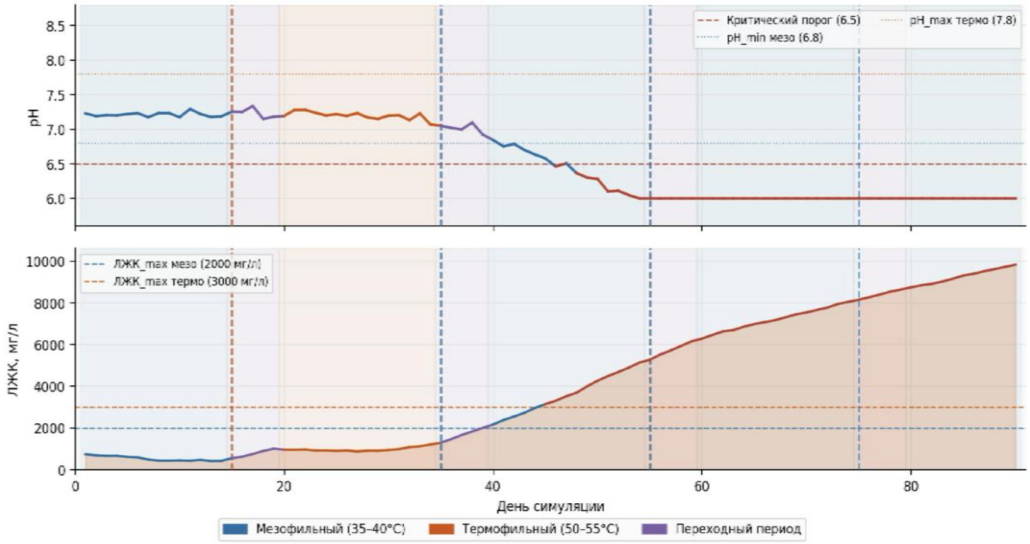
Синие линия и столбы – мезофильный режим, оранжевые линия и столбы – термофильный режим, фиолетовые линия и столбы – периоды перехода.

В промежутке дней 1 -14 (начальный период) биогазовый реактор функционирует начиная с мезофильного режима с $\eta_{КПД} = 0{,}97 \div 1{,}07$ и потоком метана CH_4 $Q_{CH4}(t) = 0{,}49 \div 0{,}53$ м^3/ч в соответствии электрической мощности когенерационного генератора 1,7 ÷ 1,9 кВт. Нормативное значение летучих жирных кислот и уровень pH в данной ситуации выдерживается. На 15-ый день происходит аварийная ситуация с теплообменником, что приводит к снижению температуры реактора ниже оптимума на 5 – 8 °C, что приводит к уменьшению температурного фактора f_T до значения 0,21, что в свою очередь влечет к падению КПД на значение ниже 65%, в последствии инициируется переключение на термофильный режим. В промежутке дней 15 – 19 идет снижение до $\eta_{КПД} = 0{,}04 \div 0{,}57$, что является следствием нахожденности микробиоты в промежуточном диапазоне нефизиологического характера 40 – 50 °C.

На день 20 происходит стабилизация при T = 53°C, что соответствует термофильному режиму с $\eta_{КПД} = 0{,}51 \div 0{,}69$. При переходе с мезофильного режима занимающее 15 – 20 суток идет значение по показателям ниже теоретического оптимума которое имеет объяснение незавершенностью адаптации ацетокластических архей – процессом. На день 35 нарастание аммиака NH_3 до значения 680 мг/л (то есть от порога 800 мг/л 80%) приводит к активизации срочного возврата на мезофильный режим.

Рисунок 2

Динамика изменения pH уровня (верхний график) и содержание летучих жирных кислот (нижний график) при анаэробном сбраживании осадков сточных вод



Пунктирные красные линии – критические пороги для переключения

Динамика изменения летучих жирных кислот и уровня pH во взаимосвязи при анаэробном сбраживании осадков сточных вод продемонстрировано на рисунке 2. В начальном периоде летучих жирных кислотах происходит снижение со значения 737 до 372-ух мг/л, чему воздействовало высокая метаногенная активность. Поступление на 40-ой день белкового стока приводит аммиак NH_3 к росту до резких значений 1194 мг/л. Это дестабилизирует метаногенный консорциум и приводит к ослаблению утилизации летучих жирных кислот запускающее каскадное накопление. Далее на 55-ый день летучие жирные кислоты уже в значениях превышения 5000 мг/л. В свою очередь, уровень pH снижается до значений 6,0, что критично.

Эта динамика четко описывает воспроизведение реального механизма нестабильной работы биореактора осадка сточных вод, что описано у Couder et al. (2019): высококонцентрированный белковый субстрат с одновременным притоком осуществляет поставку ингибитора NH_3 вместе с питательной средой для ацидогенных бактерий. В последствии происходит превышение

скорости прироста гидролиза и ацидогенеза, который временно опережает скорость развития метаногенеза сопутствующая положительной обратной связи по закислению. По алгоритму инициируются переключения на дни 55 и 75 для стабилизации процесса, но необходимо снижение органической нагрузки для восстановления эффективного сохранения процесса анаэробного сбраживания для прививания для следующих потоков осадков сточных вод.

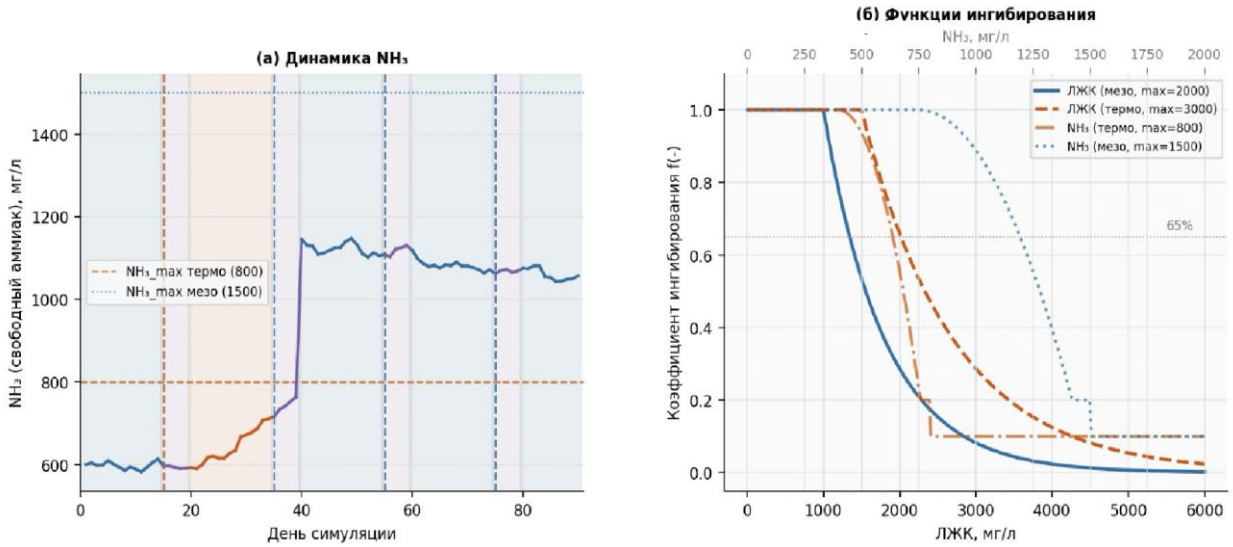
Процесс аммиачного ингибирования при анаэробном сбраживании в осадках сточных вод белковых фракций

На рисунке 3, а показано, что в промежутке дней 20 – 39 при термофильном режиме идет сопровождение непрерывного роста аммиака NH_3 в диапазоне 652 ÷ 691 мг/л. Данную тенденцию обуславливают два фактора: первое – ускоренный гидролиз белков осадков сточных вод при термофильном режиме T = 53 °C по сравнению с мезофильным режимом T = 37 °C; второе – сдвиг равновесия NH_4^+ / NH_3 в зависимости от повышения температуры в сторону свободной формы токсичности. Уравнение Хансена (Hansen et al., 1998) дает основание, что в аммонийном азоте общего содержания доля свободного аммиака NH_3 3 – 5 раз превысит при параметрах T = 53 °C и уровня pH = 7,3 относительно температуры 37 °C.

На рисунке 3, б количественно демонстрируется ассиметрия чувствительности ингибирования на температурный режим: при $c_{NH_3} = 900$ мг/л аммиака по консорциуму коэффициента активности термофильного режима составляет $f = 0{,}1$ при полном ингибировании, а при мезофильном режиме $f = 0{,}96$. Это различие фундаментального характера дает определение по ключевому ограничению термофильного сбраживания осадков сточных вод с содержанием высокого концентрата органического азота: для достижения более высокой продуктивности по получению качественного биогаза на потенциальном уровне, необходим строгий контроль азотного баланса в субстрате.

Рисунок 3

Аммиачное ингибирование при анаэробном сбраживании с функцией подавления микробиоты



а) динамика изменения свободного аммиака (NH_3) при анаэробном сбраживании осадков сточных вод;
б) функции подавления микробиоты (ингибирования) летучими жирными кислотами и аммиаком (NH_3) при мезофильном и термофильном режимах

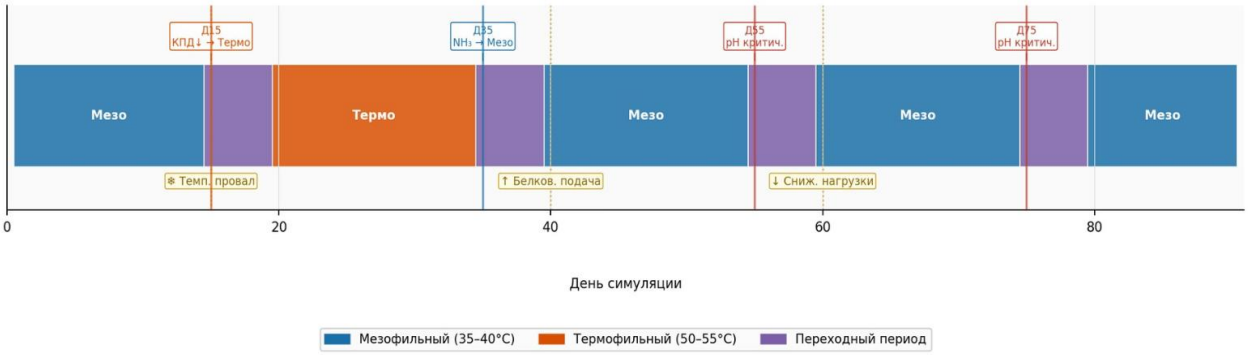
Шкала по времени и порядок событий по управлению

Вырабатываемые от очистки сточных вод производительностью 10 $м^3$/сутки осадки сточных вод на биогазовом реакторе начинает проходить процесс анаэробного сбраживания с мезофильного режима по температуре в течение первых 15 суток, для сбалансированного прохождения метаногенеза с наибольшим ростом анаэробных бактерий и планомерного разгона выхода метана CH_4. Далее в течение 5 дней происходит плавный переход к термофильному режиму по температуре, в период действия которого происходит наибольший выход метана CH_4 высокого качества. После термофильного режима в течение следующих 5 дней необходимо осуществление перехода к обратно к мезофильному режиму для сохранения баланса в составе субстрата от закисания.

Весь порядок событий управления по времени в течение 90 суток анаэробного сбраживания в биореакторе систематизирован и представлен на рисунке 4 и в таблице 2.

Рисунок 4

Шкала по времени переключения режимов при анаэробном сбраживании в течение 90 суток



Линии по вертикали – события по переключению на временном отрезке; пунктирные линии желтого цвета – технологические возмущения.

Таблица 2

Порядок событий по переключению температурных режимов за период симуляции в течение 90 суток

День	Событие	Переход с режима	Переход на режим	Причина перехода	Приоритеты
15	Переключение	Мезофильный, 37 °C	Термофильный, 53 °C	Падение температуры → КПД<65%	Нормальный
20	Завершение	-	Термофильный, 53 °C	Достижение T = 53 °C	-
35	Переключение	Термофильный, 53 °C	Мезофильный, 37 °C	NH_3 > 640 мг/л	Срочный
40	Перегрузка ХПК	-	Мезофильный, 37 °C	Концентрация осадка ↑NH_3	Сценарий
55	Автоматическое стабилизирование	Мезофильный	Мезофильный	pH<6,5 (критический)	Критичный
60	Снижение подачи	-	-	Оператором снижена органическая нагрузка активного ила	Сценарий
75	Автоматическое стабилизирование	Мезофильный	Мезофильный	pH<6,5 (критический повторно)	Критичный

Примечание: составлено автором на основе данных приведенных в источниках

По результатам видно, что по алгоритму идет корректная реакция на все 3 типа нарушений: по температурному режиму на 15-ый день с реакцией нормального приоритета, по аммиачному скачку на 35-ый день срочного приоритета и критического приоритета на 55-ый и 75-ый дни по pH-закислению. Выстроенность последовательности событий анаэробного сбраживания дает подтверждение, что процесс ухудшается в каскадном виде не от недостатка в построении алгоритма, а из-за отсутствия должной коррекции по составу субстрата – что вполне приемлемо по сценарию для реальных очистных сооружений.

По полученным результатам выявляются противоречия на фундаментальном уровне связанное с содержанием белка на высоком уровне при анаэробном сбраживании осадков сточных вод: субстраты с высоким содержанием жиров и белков обладают высоким потенциалом выхода метана CH_4 при первичном утверждении, но при этом выясняется, что такой субстрат подвержен к нестабильности и чувствительности к ингибированию аммиака при термофильном режиме. Это состояние нестабильности и сложности контроля при термофильном режиме объясняет частую применяемость биогазовых установок работающих при мезофильном режиме на действующих объектах по очистке сточных вод в Казахстане и мире, с наличием изредка применения установок на термофильном режиме имеющие возможность быстрого сброса обратно в стоки нестабильного субстрата для нового забора осадков сточных вод или игнорирование не эффективной работы биогазовой установки с декларированием скачковых преимущественных показателей термофильного режима.

Сравнивая с результатами (Metcalf & Eddy, 2014), а также (Jenkins et al., 1991) получаем подтверждаемость, того, что по предложенными математической модели и алгоритму адекватно воспроизводится следующее: 1) снижение КПД субстрата из осадков сточных вод КПД до 4 – 12% с темпом изменения температуры 5 суток в переходной период; 2) реалистичная динамика накопления летучих жирных кислот после осуществления перегрузки на 10 – 15 суток характерного времени; 3) асимметрия ингибирования аммиака NH_3 между режимами. Настоящая работа обладает ключевым вкладом по применению экспоненциальной формулы ингибирования летучих жирных кислот (уравнение (4)) взамен лишенной монотонности при данных $c > c_{max}$ полиноминальной широкого применения.

Малые очистные сооружения, имеющие производительность порядка 10 м^3/сутки в ходе практической реализации должны следовать следующему оперативному регламенту: обеспечивающий на выходе 2 – 2,4 кВт электроэнергии термофильный режим необходимо применять при доле избыточного активного ила в субстрате, когда составляет до 50% по органическому веществу субстрата (ожидаемо $c_{NH3} < 600$ мг/л); при возникновения ситуации по превышению доли избыточного активного ила или поступления пищевых стоков с высоким содержанием органического белкового азота необходимым приоритетом обладает мезофильный режим с выходом метана на 1,5 – 2 кВт, при этом контролировать уровень аммиака NH_3 необходимо каждые 48 часов. Предлагаемый алгоритм допускает необходимость интеграции системы SCADA через применение стандартного протокола Modbus TCP/IP.

Ограничения по данному исследованию: 1) модель не учитывает разделение гидролиза, ацидогенеза и ацитогенеза самостоятельными кинетическими шагами типа упрощением ADM1 (Anaerobic Digestation Model №1); 2) коэффициент $\xi(t)$ не берет в учет наличия вариабельности состава осадка сточных вод по сезону на данном этапе исследования (так как исследования по сезону года продолжаются); 3) упрощенной форме моделируются теплопотери реактора. Данные аспекты обуславливаются продолжающимися исследованиями с применением модели ADM1 в полном виде с включением 26 динамических переменных состояний.

Верификация полученной модели (алгоритма)

Верификация осуществлена по сгруппированным на 7 блоков 34 независимым критериям, результаты которых приведены в таблице 3 с содержанием ключевых количественных показателей имеющие адаптацию к субстрату осадков сточных вод и сопоставленные с литературными данными.

Таблица 3
Сравнение результатов по верификации модели и алгоритма анаэробного сбраживания

Параметр	Значение модели	Диапазон по литературе	Соответствие по верификации	Источник
Выход метана CH_4 в мезофильном режиме	0,45 м^3/кгХПК	0,35 – 0,5 м^3/кгХПК	верно	(Verein Deutscher Ingen, 2016)
Выход метана CH_4 в термофильном режиме	0,6 м^3/кгХПК	0, 5 – 0,65 м^3/кгХПК	верно	(IEA Bioenergy, 2023)
КПД при нормальном режиме	97 – 107%	90 – 110%	верно	Seed = 42
Мощность по нетто выходу в мезофильном режиме	~ 1,8 кВт	1,5 – 2 кВт	верно	(Batstone D.J., et al. 2002)
Мощность по нетто выходу в термофильном режиме	~ 2,4 кВт	2 – 2,4 кВт	верно	(Metcalf & Eddy, et al. 2014)
Функция VFA (монотонно)	$exp(-2{,}5(r-0{,}5))$	Убывание монотонное	верно	(Mao et al., 2015)
Воспроизводимость	КПД$_1$=99,42% $Q_1 = 0{,}51$м^3/ч	Seed = 42, детерменирован	верно	Python 3.x

Примечание: составлено автором на основе данных приведенных в источниках

Заключение

В работе представлена разработанная и верифицированная математическая модель и алгоритм управления осуществления переходов (переключений)температурных режимов при анаэробном сбраживании органических отходов сточных вод. Основными результатами которой являются:

1. По анаэробному сбраживанию осадков сточных вод получена кинетическая модель на многофакторном уровне, с включением ингибирующих функций по температуре согласно Моно-Аррениусу, pH, летучим жирным кислотам экспоненциального выхода и квадратичного насыщения аммиаком NH_3. Верификация осуществлена по сгруппированным на 7 блоков 34 независимым критериям, которые 100% соответствуют нормам приведенным в известных источниках.

2. Согласно выстроенному алгоритму автоматического переключения с 5-и уровневой иерархией приведенных приоритетов обеспечивается: защита от закисления с порогом pH = 6,5, предотвращается аммиачное ингибирование с порогом аммиака NH_3 на 80%, определен защитный период охлаждения 15 суток между разными переключениями, при этом градиент темпа изменения температуры ≤ 3 °C/сутки.

3. При термофильном режиме обеспечивается прирост на 33% по выходу метана CH_4 (с учетом данных термофильного режима 0,6 м^3/кгХПК против мезофильного 0,45 м^3/кгХПК) и увеличения на выходе электрической мощности от 1,5 кВт (при мезофильном) до 2,4 кВт (при термофильном). Однако при превышении 50% доли избыточного активного ила или резкое поступление пищевых стоков необходимо планомерное переключение к мезофильному режиму ввиду наличия риска ингибирования аммиака NH_3.

4. Симулирование процесса анаэробного сбраживания осадков сточных вод на период 90 суток с 3-мя возмущениями (в виде аварии теплообменника, белкового стока и снижения органической нагрузки на активный ил) подтверждает работоспособность представленного алгоритма и выявляет критичность в мониторинге синхронном виде летучих жирных кислот и аммиака NH_3 для устранения закисления реактора осадков сточных вод в каскадном порядке.

Результаты рекомендуются к применению для проектирования и модернизации биогазовых установок (или биореакторов) работающих с осадками сточных вод, получаемых от малых очистных сооружений, производительность которых не превышает 10 м^3/сутки и полученные закономерности требуют дополнительных исследований на более высоких производительностях. Полученные результаты по анаэробному сбраживанию и установки по реализации данного процесса могут быть применены на предприятиях по очистке сточных вод городских сетей или в частных локализованных зданиях, а также на производствах связанных переработкой пищевых и органических отходов, в том числе и

на объектах агропромышленности и сельского хозяйства.

Декларации и заявления по применимости

«При подготовке данной работы авторы использовали Claude AI (Opus 4.7) для того, чтобы построить графики рисунков 1 – 4 выведенные на Phyton code также полученный на инструменте Claude AI (Opus 4.7) с вложением имеющихся технических данных, которые приведены в работе. После использования этого инструмента/сервиса авторы просмотрели и отредактировали содержимое по мере необходимости и несут полную ответственность за содержание публикации».

Благодарности

Исследование выполнено в рамках проекта грантового финансирования КН МНВО РК 2025-2027 годы по ИРН AP26194475 «Инновационный подход получения биогаза путем фильтрации и утилизации сточных вод города Кокшетау» и конфликт интересов отсутствует.

Вклад авторов

Булатов Н.К.: разработка концепции и методологии, научное руководство, редактирование и доработка рукописи; Ахметжанова А.Б.: проведение исследования, сбор, обработка и валидация данных, набор текста рукописи; Касымжанова К.С.: научное руководство проектом, проведение исследования, редактирование и доработка рукописи; Елюбаев С.З.: научная консультация по разработке концепции и методологии, рецензирование и редактирование текста; Оразов О.Ш.: сбор данных и формальный анализ данных, валидация данных.

Литература

Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., Kalyuzhnyi, S., Jenicek, P., & van Lier, J. B. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology, 59*(5), 927–934. https://doi.org/10.2166/wst.2009.040

Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Sanders, W. T. M., Siegrist, H., & Vavilin, V. A. (2002). The IWA anaerobic digestion model No. 1 (ADM1). *Water Science and Technology, 45*(10), 65–73. https://doi.org/10.2166/wst.2002.0292

Kwon, Y., Park, J., Kim, G. B., Jo, Y., Park, S., & Kim, S. H. (2023). Anaerobic digestion of sewage sludge using anaerobic dynamic membrane bioreactor under various sludge composition and organic loading rates. *Bioresource Technology, 384*, Article 129275. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129275

Government of the Republic of Kazakhstan. (2021). *Gosudarstvennaya programma «Zhasyl Qazaqstan» na 2021–2030 gg.* [State program "Zhasyl Qazaqstan" for 2021–2030].

Hansen, K. H., Angelidaki, I., & Ahring, B. K. (1998). Anaerobic digestion of swine manure: Inhibition by ammonia. *Water Research, 32*(1), 5–12. https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00201-7

IEA Bioenergy. (2023). *Country reports on biogas and biomethane* (Task 37).

Jenkins, S. R., Morgan, J. M., & Zhang, X. (1991). Measuring the usable carbonate alkalinity of operating anaerobic digesters. *Research Journal of the Water Pollution Control Federation, 63*(1), 28–34.

Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 45*, 540–555. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032

Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan. (2023). *Otchet o sostoyanii vodopolzovaniya i vodootvedeniya v Respublike Kazakhstan* [Report on the state of water use and wastewater disposal in the Republic of Kazakhstan].

Verein Deutscher Ingenieure. (2016). *Fermentation of organic materials: Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests* (VDI 4630).

Water Environment Federation. (2012). *Biosolids engineering and management* (WEF Manual of Practice No. 8).

Сведения об авторах:

Булатов Нуржан Кажмуратович – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, профессор кафедры организации перевозок, движения, эксплуатации транспорта и профессионального обучения, Кокшетауский университет имени А. Мырзахметова (Кокшетау, Казахстан, e-mail: nurzhanbulatov@gmail.com).

Ахметжанова Аида Бахтияровна – докторант кафедры управления и инжиниринга в сфере охраны окружающей среды Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева (Астана, Казахстан, e-mail: jnkt@mail.ru).

Касымжанова Куралай Советовна – кандидат технических наук, доцент кафедры организации перевозок, движения, эксплуатации транспорта и профессионального обучения, Кокшетауский университет имени А. Мырзахметова (Кокшетау, Казахстан, e-mail: kasymzanovakuralaj2@gmail.com).

Елюбаев Сагинтай Зекенович – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ректор Кокшетауского университета имени А. Мырзахметова (Кокшетау, Казахстан, e-mail: kuam-kokchetau@mail.ru).

Оразов Ондасын Шортанбаевич – магистр наук, старший преподаватель, старший преподаватель кафедры организации перевозок, движения, эксплуатации транспорта и профессионального обучения, Кокшетауский университет имени А. Мырзахметова (Кокшетау, Казахстан, e-mail: orazovondasin@gmail.com).

Information about the authors:

Bulatov Nurzhan Kazhmuratovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department "Organization of Transportation, Traffic, Operation of Transport and Vocational Training", Kokshetau University named after A. Myrzakhmetov (Kokshetau, Kazakhstan, e-mail: nurzhanbulatov@gmail.com).

Akhmetzhanova Aida Bakhtiyarovna – Doctoral student of the Department "Management and Engineering in the field of Environmental Protection" of the L.N. Gumilyov Eurasian National University (Astana, Kazakhstan, e-mail: jnkt@mail.ru).

Kasymzhanova Kuralai Sovetovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Organization of Transportation, Traffic, Operation of Transport and Vocational Training", Kokshetau University named after A. Myrzakhmetov (Kokshetau, Kazakhstan, e-mail: kasymzanovakuralaj2@gmail.com).

Yelyubaev Sagintay Zekenovich – Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Rector of Kokshetau University named after A. Myrzakhmetov (Kokshetau, Kazakhstan, e-mail: kuam-kokchetau@mail.ru).

"Ondasyn Shortanbaevich Orazov – Master of Science, Senior Lecturer, Senior Lecturer of the Department "Organization of Transportation, Traffic, Operation of Transport and Vocational Training", Kokshetau University named after A. Myrzakhmetov (Kokshetau, Kazakhstan, e-mail: orazovondasin@gmail.com).

Авторлар туралы мәлімет:

Болатов Нұржан Қажымұратұлы – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, "Көлікті пайдалану, жүк тасымалдау мен қозғалысты ұйымдастыру, және кәсіптік білім беру" кафедрасының профессоры, А. Мырзахметов атындағы Көкшетау университеті (Көкшетау, Қазақстан, e-mail: nurzhanbulatov@gmail.com).

Ахметжанова Аида Бахтияровна – Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің "Қоршаған ортаны қорғау саласындағы басқару және инжиниринг" кафедрасының докторанты (Астана, Қазақстан, e-mail: jnkt@mail.ru).

Қасымжанова Құралай Советқызы-техника ғылымдарының кандидаты, "Көлікті пайдалану, жүк тасымалдау мен қозғалысты ұйымдастыру, және кәсіптік білім беру" кафедрасының доценті, А. Мырзахметов атындағы Көкшетау университеті (Көкшетау, Қазақстан, e-mail: kasymzanovakuralaj2@gmail.com).

Елюбаев Сағынтай Зекенұлы – ауыл шаруашылығы ғылымдарының докторы, профессор, А. Мырзахметов атындағы Көкшетау университетінің ректоры (Көкшетау, Қазақстан, e-mail: kuam-kokchetau@mail.ru).

Оразов Оңдасын Шортанбайұлы – ғылым магистрі, аға оқытушы, "Көлікті пайдалану, жүк тасымалдау мен қозғалысты ұйымдастыру, және кәсіптік білім беру" кафедрасының аға оқытушысы, А. Мырзахметов атындағы Көкшетау университеті (Көкшетау, Қазақстан, e-mail: orazovondasin@gmail.com).

Поступила 10 мая 2026 года
Принята 25 сентября 2026 года

МРНТИ 87.53.91 https://doi.org/10.26577/EJE208830326

Г.С. Кенжибаева[1], С.Д. Балыбек[1*], А.А. Абдуова[1], Ж.Д. Пернебаев[2], А.М. Есимова[1], Е.К. Есимов[1]

[1]Южно-Казахстанский исследовательский университет имени Мухтара Ауэзова, Шымкент, Казахстан
[2]ТОО «Центр научных исследований и экологической экспертизы "KazEcoHolding"», Шымкент, Казахстан
*e-mail: ecology_uko@mail.ru

КОМПЛЕКСНАЯ ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ (на примере г. Шымкента)

В статье представлена комплексная экологическая оценка техногенных отходов промышленных предприятий г. Шымкента с учетом их классификации и воздействия их на окружающую среду. Актуальность исследования обусловлена ростом промышленного производства, сопровождающимся увеличением объемов отходов и усилением антропогенной нагрузки на атмосферный воздух, почвы и водные ресурсы.

Проведен анализ распределения промышленных предприятий по категориям экологической опасности в соответствии с Экологическим кодексом РК, а также выявлены основные источники образования отходов, включая металлургические, нефтеперерабатывающие и химические предприятия. Рассмотрены особенности накопления как текущих, так и исторически сформированных отходов.

На основе полевых и лабораторных исследований установлены превышения загрязняющих веществ, подтверждающие наличие экологических рисков. Дополнительно использованы данные космического мониторинга для выявления несанкционированных свалок.

Результаты исследования подчеркивают необходимость совершенствования системы управления отходами и внедрения современных методов экологического контроля для обеспечения устойчивого развития региона.

Ключевые слова: техногенные отходы, экологическая оценка, промышленность, загрязнение.

G.S. Kenzhibayeva[1], S.D. Balybek[1*], A.A. Abduova[1], Z.Pernebayev[2], A. M. Esimova[1], E.K. Yessimov[1]

[1]Mukhtar Auezov South Kazakhstan Research University, Shymkent, Kazakhstan
[2] LLP «Centre for Scientific Research and Ecological Expertise «KazEcoHolding», Shymkent, Kazakhstan
*e-mail: ecology_uko@mail.ru

Comprehensive environmental assessment of industrial technogenic waste and its impact on the environment (case study of Shymkent city)

This article presents an environmental assessment of technogenic waste generated by industrial enterprises in the city of Shymkent, considering its classification and environmental impact. The relevance of the study is driven by industrial growth and increasing waste volumes, which intensify pressure on air, soil, and water resources.

An analysis of industrial enterprises by environmental hazard categories in accordance with the Environmental Code of the Republic of Kazakhstan was conducted. In addition, the main sources of waste generation, including metallurgical, oil refining, and chemical enterprises, were identified. The characteristics of current and historically accumulated waste were also examined.

Based on field and laboratory investigations, exceedances of pollutant concentrations were identified, confirming environmental risks. In addition, remote sensing data were used to detect unauthorized waste disposal sites.

The findings highlight the need to improve the waste management system and implement environmental monitoring methods to ensure the sustainable development of the region.

Keywords: technogenic waste, environmental assessment, industry, pollution.

 © 2026 Al-Farabi Kazakh National University

Г.С. Кенжибаева[1], С.Д. Балыбек[1*], А.А. Абдуова[1],
Ж.Д. Пернебаев[2], А.М. Есимова[1], Е.К. Есимов[1]
[1]Мұхтар Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті, Шымкент, Қазақстан
[2]«KazEcoHolding» ғылыми зерттеулер және экологиялық сараптама орталығы» ЖШС, Шымкент, Қазақстан
*e-mail: ecology_uko@mail.ru

Өнеркәсіптік кәсіпорындардың техногендік қалдықтарын кешенді экологиялық бағалау және олардың қоршаған ортаға әсері (Шымкент қаласы мысалында)

Мақалада Шымкент қаласындағы өнеркәсіптік кәсіпорындардың техногендік қалдықтарына кешенді экологиялық бағалау жүргізілді. Зерттеудің өзектілігі өнеркәсіп өндірісінің қарқынды дамуы мен қалдықтар көлемінің ұлғаюына байланысты қоршаған ортаға түсетін антропогендік жүктеменің күшеюімен түсіндіріледі. Техногендік қалдықтардың атмосфералық ауаға, топырақ-қа және су ресурстарына әсері қарастырылған. Экологиялық кодекс талаптарына сәйкес кәсіпорындар экологиялық қауіптілік деңгейлері бойынша жіктеліп, негізгі қалдық көздері анықталған.

Сонымен қатар қазіргі және тарихи қалдықтардың жинақталу ерекшеліктері мен олардың қоршаған ортаға ұзақ мерзімді әсері талданды. Далалық зерттеулер мен зертханалық талдаулар нәтижесінде бірқатар ластаушы заттардың шекті рұқсат етілген мөлшерден асу фактілері анық-талды. Зерттеу нәтижелері қалдықтарды басқару жүйесін жетілдіру және экологиялық қауіпсіз-дікті арттыру қажеттігін көрсетеді.

Далалық және зертханалық зерттеулердің нәтижелері бойынша ластаушы заттардың рұқсат етілген шекті мөлшерден асуы анықталып, олардың экологиялық тәуекелдер тудыратыны рас-талды. Бұдан басқа, рұқсатсыз қалдықтар орналасқан орындарды анықтау мақсатында ғарыш-тық мониторинг деректері пайдаланылды.

Зерттеудің нәтижелері өңірдің тұрақты дамуын қамтамасыз ету үшін қалдықтарды басқару жүйесін жетілдіру және экологиялық бақылаудың заманауи әдістерін енгізу қажеттігін көрсетеді.

Түйін сөздер: техногендік қалдықтар, экологиялық бағалау, өнеркәсіп, ластану.

Введение

В современных условиях индустриального развития проблема образования и накопления техногенных отходов приобретает особую актуальность и рассматривается как одна из ключевых экологических угроз. Интенсивные рост промышленного производства сопровождается увеличением объемов отходов, оказывающих негативное воздействие на атмосферный воздух, почвенный покров и водные ресурсы, а также создающих риски здоровья населения. Наиболее остро данная проблема проявляется в крупных промышленных центрах с высокой концентрацией предприятий различных отраслей, одним из которых является г. Шымкент, где сосредоточены предприятия металлургической, химической, нефтеперерабатывающей и строительной промышленности. В процессе их деятельности образуется разнообразные виды техногенных отходов, включая шламы, шлаки, твердые отходы и пылевые выбросы. Значительные объемы текущих и исторически накопленных отходов формируют устойчивое антропогенное воздействие на окружающую среду, способствуя загрязнению природных компонентов и усилению экологических рисков. Несмотря на наличие нормативно-правовой базы, система управления отходами в ряде случаев остается недостаточно эффективной, что требуется совершенствования механизмов экологического контроля и мониторинга, а также внедрения современных методов моделирование систем управления промышленными отходами (Campana et al., 2025; Wang et al., 2023).

В этой связи возникает необходимость комплексной экологической оценки техногенных отходов с учетом их источников, объемов, состава и условий размещения, а также анализа их воздействия на окружающую среду.

Целью настоящего исследования является проведение комплексной экологической оценки техногенных отходов промышленных предприятий г. Шымкента, определение основных источников их образования, особенности накопления и размещение, и оценка их воздействия на окружающую среду. анализ связанных с ними экологических рисков для окружающей среды.

Вопросы образования, накопления и экологического воздействия техногенных отходов промышленных предприятий являются одним из приоритетных направлений современных экологических исследований. В научной литературе отмечается, что рост промышленного производства приводит к увеличению объемов отходов, что усиливает нагрузку на атмосферный воздух,

почвенный покров и водные ресурсы, а также создает долгосрочные экологические риски для здоровья населения (Pernebayev et al., 2026; United Nations Environment Programme, 2019; World Bank, 2018).

Значительное внимание уделяется проблеме обращения с промышленными отходами в индустриально развитых регионах, где наблюдается высокая концентрация металлургических, химических и нефтеперерабатывающих предприятий. Согласно исследованиям отечественных авторов (Иванов и др., 2020; Ахметов, 2021), наиболее опасными являются отходы металлургического производства, содержащие тяжелые металлы и токсичные соединения, которые способны накапливаться в окружающей среды и мигрировать по трофическим цепям.

В работах по управлению отходами подчеркивается необходимость перехода от линейной модели «производство-потребление-захоронение» к циркулярной экономике, предполагающей повторное использование и переработку отходов как вторичных ресурсов (Иванов и др., 2020; Ellen MacArthur Foundation, 2015). Также отмечается эффективность внедрения технологий переработки шламов, шлаков и нефтесодержащих отходов для снижения экологической нагрузки (Świnder et al., 2024; Zhang et al., 2020).

Мировой опыт показывает, что переработка техногенных отходов рассматривается как ключевое направление «зеленой экономики» и циркулярного производства (circular economy). В странах ЕС, США, Японии активно развиваются технологии извлечения металлов из шлаков и хвостов (Kumar & Singh, 2020; Lee et al., 2021), синтеза строительных материалов из золошлаковых смесей (Li et al., 2022), извлечение редкоземельных элементов (REE) и цинка из шлаков полиминеральной свинцово-цинковой металлургии; показано, что можно извлечь до ~99,6 % REE и ~67 % Zn с концентрированием (Świnder et al., 2024).

В статье Хамида и соавт. (2025) рассмотрена роль промышленных отходов в развитии зелёных технологий: переработка, извлечение ценностей, преобразование в материалы и энергию. Авторы Wang и соавт. (2023) рассматривали техногенные отходы, содержащие ценные компоненты, которые могут стать сырьём для индустрии, а также цифровые модели управления техногенными потоками. Однако большинство существующих решений ориентированы на конкретные виды отходов и не учитывают региональные особенности их состава, климата и инфраструктуры.

Авторы Wang и Wang (2019) в работе анализируют применение ИИ и цифровых двойников (digital twins) в управлении отходами: оптимизация потоков, прогнозирование, интеграция больших данных.

В работе Campana и соавт. (2025) проведен библиометрический и тематический анализ применения искусственного интеллекта и цифровых двойников в управлении отходами: выявлены ключевые направления, тенденции и взаимосвязи между цифровизацией, экономикой замкнутого цикла и управлением потоками, что подчёркивает переход к цифровым и предиктивным системам управления отходами – мировая тенденция.

Отдельное направление исследований связано с применением дистанционного зондирования и геоинформационных систем для мониторинга мест размещения отходов. Данные методы позволяют оперативно выявлять несанкционированные свалки и оценивать динамику изменения загрязненных территорий (Li et al., 2019).

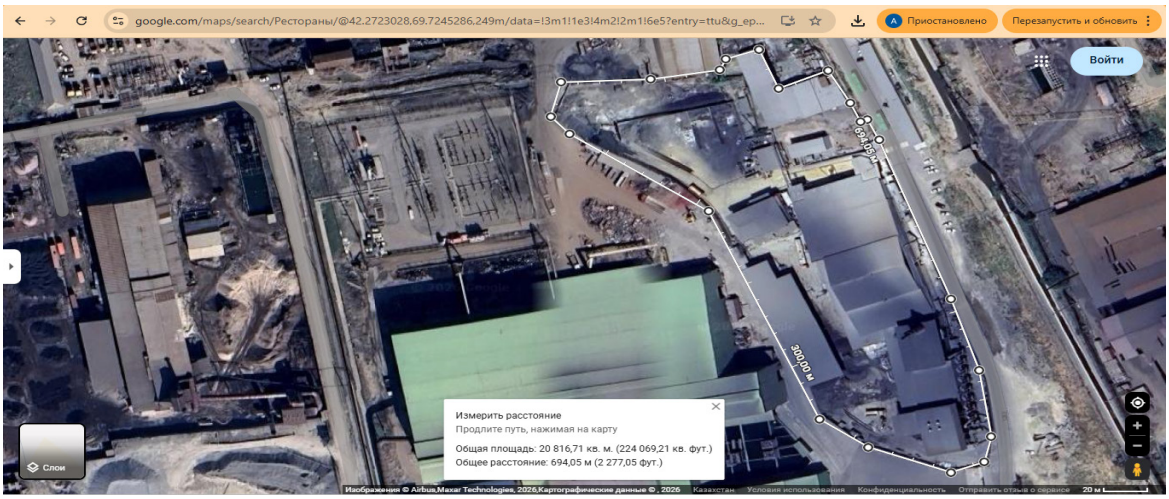
В Казахстане исследования техногенных отходов промышленности, включая работы по регионам Южного Казахстана, указывают на высокую концентрацию исторически накопленных отходов фосфорного и металлургического производства, представляющих значительную экологическую опасность (Сейдуллаев, 2022; Нуртаев, 2023). Техногенных отходы промышленных регионов оказывают существенное влияние на состояние почвенного покрова, атмосферного воздуха и водных ресурсов, вызывая их деградацию и снижение экологической устойчивости территорий (Колесников и др., 2022). В работах также подчеркивается необходимость системного подхода к оценке воздействия отходов, включающего анализ их физико-химических характеристик и путей распространения в окружающей среде.

Кроме того, важное значение имеют методы экологической оценки и мониторинга техногенных отходов, позволяющие своевременного выявлять источники загрязнения и прогнозировать их дальнейшее воздействие. Как отмечается в исследованиях, применение современных методов мониторинга способствует повышению эффективности природоохранных мероприятий и снижению экологической нагрузки на окружающую среду (Колесников & Смагулова, 2021).

Рассмотрим предприятия, относящие к объектам I категории: ТОО «Polymettech», ТОО «Glometech», ТОО «Гермес-Б.Е.», ТОО «Китайско-Казахстанская Марганцевая Индустриальная Группа», ТОО «KazFerro», ТОО «High Industrial Lubricants&Liquids Corporation (HILL)», ТОО «ПетроКазахстанОйлПродактс», ТОО «ЮгСтройСервисЛТД».

Особое место среди объектов I категории занимают предприятия по производству цветных металлов ТОО «Polymettech», расположенный в восточной части г. Шымкента (рисунок 1).

Рисунок 1
Карта накопления отходов ТОО «Polymettech»



Сырьем для получения готового продукта является – кек, пыль, шлам и другие свинецсодержащие материалы и промпродукты свинцовых, медных и цинковых заводов. В результате технологических процессов ежегодно образуются мышьяксодержащий кек в среднем 19440 т/год и гранулированный шлак 16636 т/год, который направляется на полигон ТОО «Glometech» для дальнейшего захоронения.

В ходе обследования (март 2026 г.) прилегающей территории производственной площадки ТОО «Polymettech» были выявлены участки несанкционированного размещения отходов, расположенной между индустриальными зонами «Оңтүстік» и «Ордабасы» (рисунок 2).

Рисунок 2
Карта несанкционированного размещения отходов вблизи ТОО «Polymettech»



Важным элементом инфраструктуры обращения с отходами является единственный полигон промышленных отходов ТОО «Glometech» для долговременного хранения и захоронения токсичных отходов, расположенный в юго-западной части города. В районе полигона отсутствуют водные объекты. Река Бадам протекает с севера на расстоянии 12 км. Участок полигона со всех сторон окружен земельными участками из состава земель сельскохозяйственного назначение (рисунок 3).

Предприятие ТОО «Гермес-Б.Е.» осуществляет переработку вторичного металлического сырья с получением заготовок, которые в дальнейшем подвергаются прокатке с выпуском готовой продукции в виде арматуры, уголка и катанки (рисунок 4). В процессе производственной деятельности образуются отходы, включая зольные остатки, котельные шлаки и зольную пыль 2,89 т/год, доменные шлаки 42 т/год, а также огнеупорные материалы и футеровку 30 т/год. Все образующиеся отходы своевременно вывозятся специализированным автотранспортом и передаются лицензированным организациям для последующей переработки или утилизации.

Рисунок 3
Карта полигона промышленных отходов ТОО «Glometech»



Рисунок 4
Карта накопления отходов по производству металлопроката ТОО «Гермес-Б.Е.»



В ходе обследования прилегающей территории производственной площадки ТОО «Гермес-Б.Е.» были выявлены участки несанкционированного размещения отходов, расположенные напротив индустриальной зоны «Ордабасы», вдоль реки Сайрамсу (рисунок 5).

Рисунок 5
Карта несанкционированного размещения отходов вблизи ТОО «Гермес-Б.Е.»



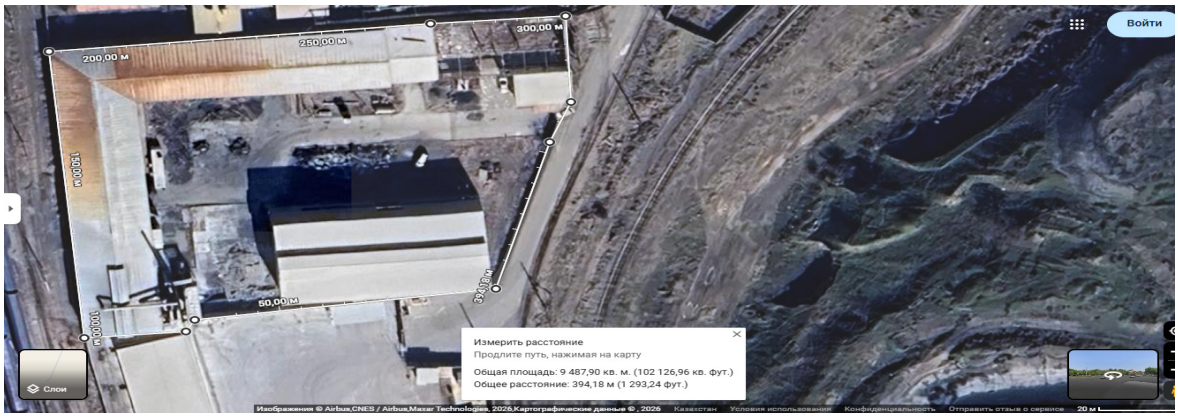
Основной деятельностью предприятия ТОО «Китайско-Казахстанская Марганцевая Индустриальная Группа» является производство ферросплавов с использованием технологических процессов плавки, в процессе эксплуатации образуются промышленные отходы, в том числе шлак (4200 т/год), шлам от промывки руды 350 т/год и пыль, улавливаемая фильтрами 440 т/год (рисунок 6).

Предприятие ТОО «KazFerro», предназначено для получения медного штейна свинца, в процессе изготовления продукции образуется шлак в объёме 720,72 т/год (рисунок 7).

Рисунок 6
Карта накопления отходов ТОО «Китайско-Казахстанская Марганцевая Индустриальная Группа»



Рисунок 7
Карта накопления отходов ТОО «KazFerro»



Предприятие по регенерации отработанных масел и производству смазочных материалов ТОО «High Industrial Lubricants&Liquids Corporation (HILL)» занимается регенерацией отработанных масел и производством пластичных смазок. В процессе деятельности предприятия образуются нефтешламы, замазученные грунты и другие опасные отходы, часть которых подлежит термической утилизации (рисунок 8).

Рисунок 8
Карта накопления отходов ТОО «High Industrial Lubricants&Liquids Corporation (HILL)»



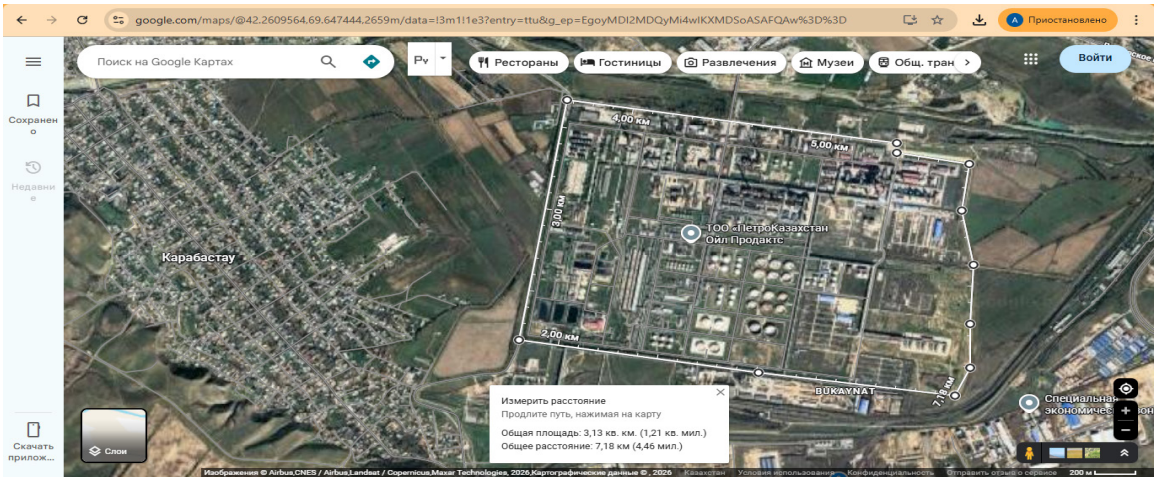
В ходе обследования прилегающей территории производственной площадки ТОО «High Industrial Lubricants&Liquids Corporation (HILL)» были выявлены участки несанкционированного размещения отходов (рисунок 9).

К числу крупнейших источников образования промышленных отходов в г. Шымкент относится нефтеперерабатывающий завод ТОО «ПетроКазахстанОйлПродактс», перерабатывающий до 6 млн тонн нефти в год. В процессе технологических операций формируются нефтесодержащие отходы, включая нефтешламы до 8093 т/год и твёрдая фракция (кек) около 500 т/год (рисунок 10).

Рисунок 9
Карта несанкционированного размещения отходов вблизи ТОО «High Industrial Lubricants&Liquids Corporation (HILL)»



Рисунок 10
Карта накопления отходов ТОО «ПетроКазахстанОйлПродактс»



Производственные отходы ТОО «ЮгСтройСервисЛТД» представлены гранулированным электротермофосфорным шлаком в объеме около 2 500 000 т. Это отходы бывшего фосфорного производства (рисунок 11).

Кроме того, на территории города функционирует предприятие ТОО «Эко Шина», которое занимается переработкой изношенных автомобильных шин. В результате технологического процесса образуются отходы, включая технический углерод в объёме 1320 т/год и смешанные металлы в объеме 500 т/год (рисунок 12) (Кенжибаева и др., 2026).

В целом анализ показывает, что структура промышленных отходов в г. Шымкент характеризуется доминированием минеральных отходов металлургического и химического производства (шлаки, шламы, золошлаковые материалы), значительными объемами нефтесодержащих отходов, а также наличием исторически накопленных токсичных отходов, содержащих мышьяк, свинец и фосфор. Концентрация крупных объемов отходов на ограниченном числе предприятий и специализированных полигонов свидетельствует о необходимости совершенствования системы обращения с промышленными отходами, внедрения технологий их переработки и вовлечения во вторичное использование, что позволит снизить нагрузку на окружающую среду и сократить площади, занятые объектами их хранения.

Рисунок 11
Карта расположения отходов бывшего фосфорного производства



Рисунок 12
Карта накопления отходов ТОО «Эко Шина»



В Казахстане исследования в данном направлении осуществлялись преимущественно в рамках отдельных проектов, посвященных переработке металлургических шлаков или хвостов обогащения (Айдарханова и др., 2019; Кенжебеков и др., 2021; Батырханова и др., 2024). Несмотря на наличие определенных научных и практических результатов, комплексный подход к оценке потенциала использования различных видов промышленных отходов региона и формированию единой цифровой модели управления их переработкой в настоящее время недостаточно развит.

Материалы и методы исследования

Объект исследования: техногенные отходы промышленных предприятий г. Шымкента.

Проведен анализ промышленных предприятий и характеристика образуемых отходов (таблица 2).

Таблица 2
Характеристика отходов промышленных предприятий

№	Наименование предприятия	Вид деятельности	Вид отходов	Объем, т/год
1	2	3	4	5
1	ТОО «Polymettech»	Производство цветных металлов	Гранулированный шлак	16636
			Арсенат кальции, мышьяксодержащий кек	19440
2	ТОО «Гермес-Б.Е.»	Производство металлопроката	Котельные шлаки и зольную пыль	2,89
			Доменные шлаки	42
			Огнеупорные материалы и футеровку	30
3	ТОО «KazFerro»	Производство свинцовых сплавов	Шлак	720,72
4	ТОО «Китайско-Казахстанская Марганцевая Индустриальная Группа»	Производство ферросиликомарганцевого сплава	Шлак	4200
			Шлам от промывки руды	350
			Пыль, улавливаемая фильтрами	440
5	ТОО «AluTech»	Производство алюминиевого прута	Шлак от первичного и вторичного производства свинца	240
6	ТОО «ЦветЛит»	Производство алюминиевого прута	Шлак	240
7	ТОО «Element 5 KZ»	Производство сплавов вторичного алюминия, латуни и меди от вторичного сырья в виде лома цветных металлов	Черные шлаки (окалина) вторичной плавки (алюминия)	429,3
8	ТОО «Sin Yuan Steel (Син Юань Стил)»	Металлургический завод	Шлак от плавильных печей	250
			Пыль дымовых газов	530
9	ТОО «VEGAsmelting»	Производство свинцовых сплавов	Шлаки от первичного и вторичного производства свинца	2525
10	АО «Химфарм»	Фармацевтическое предприятие	Специализированный шротоотвал	400000
11	ТОО «Rich smelting»	Производство свинцовых сплавов	Шлаки от первичного и вторичного производства свинца	25,25
12	ТОО «HYP-KZ»	Цех переплавки лома цветных металлов	Непереработанный шлак	1440,14
			Отработанные материалы	3,616
			Твердые отходы от газоочистки	8,022
13	ТОО «Shymkent Temir»	Сталелитейное производство	Пыли, уловленные в фильтрах, пыль дымовых газов	1662
			Непереработанный шлак	2150
14	ТОО «KazFerroGroup»	Производство ферросиликомарганцевых сплавов	Пыль дымовых газов	40
			Шламы и осадки на фильтрах от газоочистки	1710
15	ТОО «Standard Steel KZ»	Переработка свинцовых отходов с получением концентрата цветных металлов	Шлак бывшего Шымкентского свинцового завода	1 800 000
16	ТОО «High Industrial Lubricants & Liquids Corporation (HILL)»	Производство моторных масел	Промасленной глины (бентонита), предназначенной для сжигания в инсинераторной печи	732,5
17	ТОО «ЭКО Шина»	Переработка изношенных автомобильных шин	Технический углерод	1 320
18	ТОО «Афинаж»	Цех по удалению и восстановлению отходов	Золошлаковые отходы (включая отходы газоочистки)	272,641

Продолжение таблицы

№	Наименование предприятия	Вид деятельности	Вид отходов	Объем, т/год
1	2	3	4	5
19	ТОО «ПетроКазахстан Ойл Продактс»	Переработка нефти	Обезвоженный кек из нефтешлама	500
			Нефтешламы	8093
			Отработанные катализаторы	2342,95
			Донные осадки из буферного пруда и грунт после биологической очистки с аварийного амбара	5200
			Иловый шлам	360
			Абсорбенты, фильтровальные материалы, ткани для вытирания, защитная одежда, активированный уголь, керамические шары, регенеративный патрон	1030,7
			Синтетические моторные, трансмиссионные и смазочные масла	200,07
			Отработанные катализаторы, загрязненные опасными веществами	6000
			Тара из-под химреагентов	400,005
			Пирофорные сульфиды железа	200
20	ИП Абдуманап М.А.	Переработка нефтешламов	Донные шламы	200
			Нефтешламы	0,1
			Зольный остаток, котельные шлаки и зольная пыль от процессов совместного сжигания, содержащие опасные вещества	40
21	ТОО «Кайнар»	Утилизация фосфоросодержащих шламов	Фосфоритных и кварцитовых фракций отходы бывшего фосфорного завода	1 914 415
22	ТОО «Юг Строй Сервис ЛТД»	Погрузка гранулированного электротермофосфорного шлака для дальнейшей передачи в другое предприятие	Электротермофосфорный шлак бывшего фосфорного завода г. Шымкент	2 500 000
23	ТОО «Шымкентцемент»	Производство цемента	Отходы отработанной футеровки	500
24	ТОО «Стандарт Цемент»	Производство цемента	Отходы отработанной футеровки	400
25	ТОО «DIP TRANS LOGISTICS»	Полигон ТБО	Смешанные коммунальные отходы (ТБО)	401 031
26	ТОО «Водные ресурсы-Маркетинг»	Водоснабжение и очистка бытовых сточных вод	Отходы от удаления песка	3120,75
			Отходы очистки сточных вод	2929,94
			Отходы очистки сточных вод (Мусор (отбросы) с защитных решеток)	1384
27	ТОО «Glometech»	Полигон захоронение промышленных отходов	Законсервированная карта № 1 с арсенатом кальция	21400*
			Законсервированная карта № 2 с арсенатом кальция, закисленным грунтом и мышьяксодержащим кеком	16071
			Заполненная карта №3 в виде прямоугольного углубления	40000
			Действующая карта №4	130 000

* *м^3 – Объем карт №1, №2, №3 и №4.*

Проведены исследования наиболее опасных производственных отходов промышленных предприятий (рисунок 13-19): ТОО «ЮгСтройСервисЛТД» (образец №1), ТОО «ЭкоШина» (образец №2), ТОО «High Industrial Lubricants&Liquids Corporation (HILL)» (образец №3), ТОО «Гермес-Б.Е.» (образец №4), ТОО «Китайско-Казахстанская Марганцевая Индустриальная Группа» (образец №5), ТОО «Polymettech» (образец №6), ТОО «KazFerro» (образец №7) с выявлением элементного анализа с применением растровой электронной микроскопии (РЭМ).

Рисунок 13

Результаты анализа химического состава производственных отходов ТОО «ЮгСтройСервисЛТД»

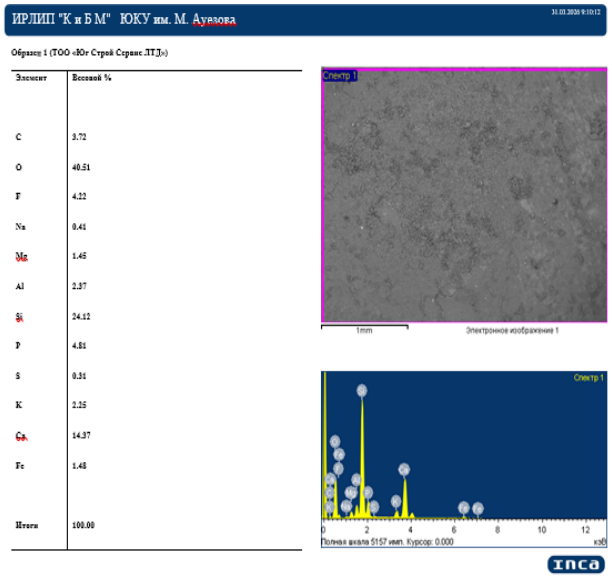


Рисунок 14

Результаты анализа химического состава производственных отходов ТОО «ЭкоШина»

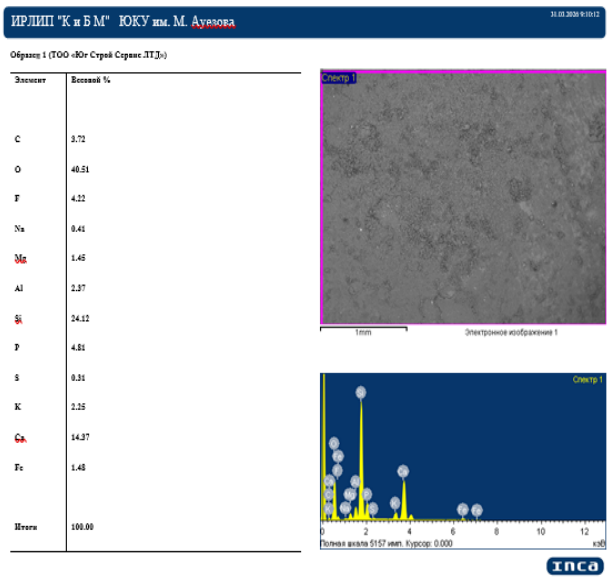


Рисунок 15

Результаты анализа химического состава производственных отходов ТОО «High Industrial Lubricants&Liquids Corporation (HILL)»

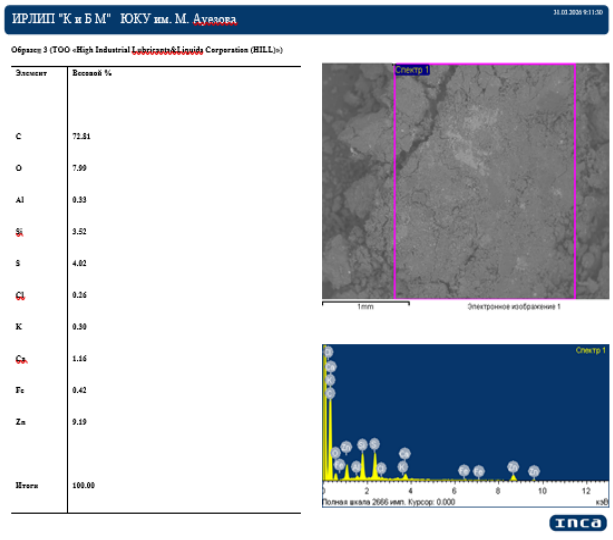


Рисунок 16

Результаты анализа химического состава производственных отходов ТОО «Гермес-Б.Е.»

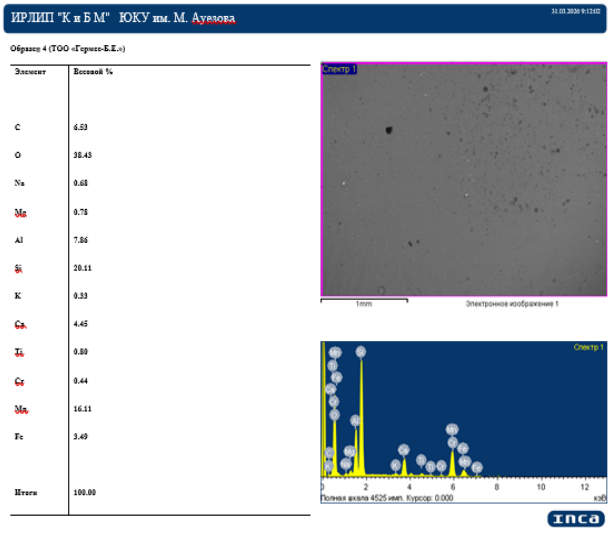
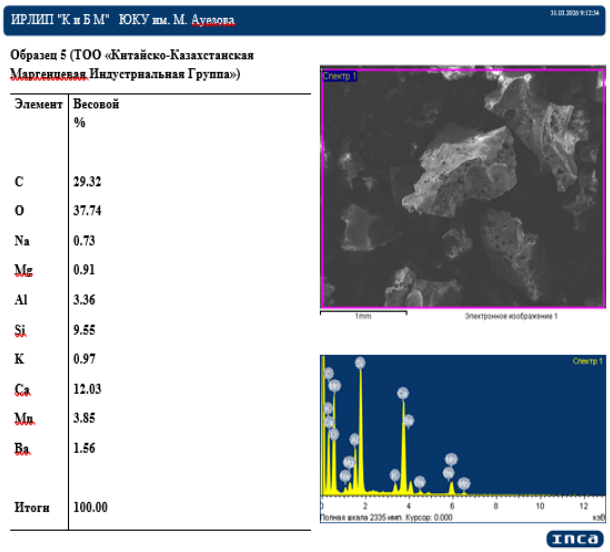


Рисунок 17

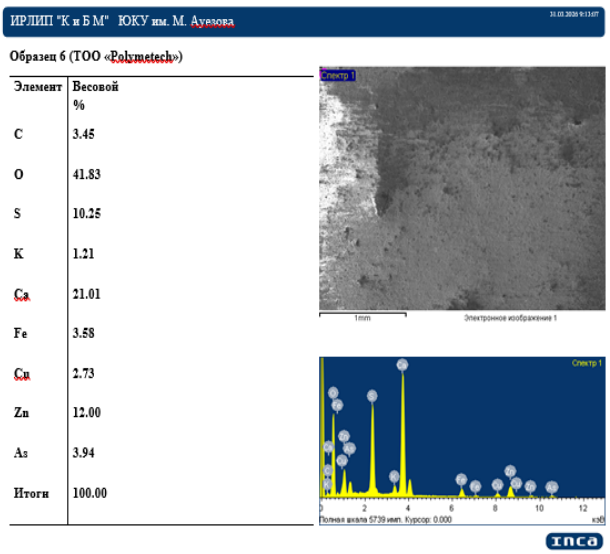
Результаты анализа химического состава производственных отходов ТОО «Китайско-Казахстанская Марганцевая Индустриальная Группа»



Элемент	Весовой %
C	29.32
O	37.74
Na	0.73
Mg	0.91
Al	3.36
Si	9.55
K	0.97
Ca	12.03
Mn	3.85
Ba	1.56
Итоги	100.00

Рисунок 18

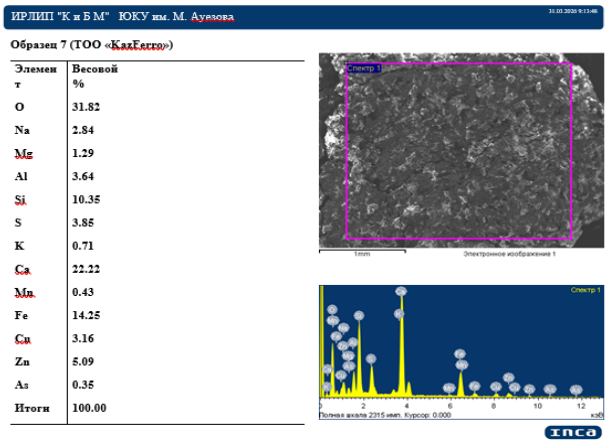
Результаты анализа химического состава производственных отходов ТОО «Polymettech»



Элемент	Весовой %
C	3.45
O	41.83
S	10.25
K	1.21
Ca	21.01
Fe	3.58
Cu	2.73
Zn	12.00
As	3.94
Итоги	100.00

Рисунок 19

Результаты анализа химического состава производственных отходов ТОО «KazFerro»

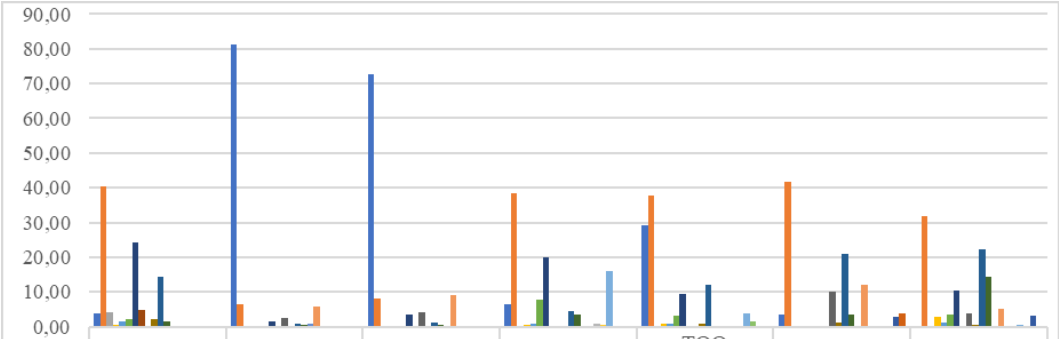


Элемент	Весовой %
O	31.82
Na	2.84
Mg	1.29
Al	3.64
Si	10.35
S	3.85
K	0.71
Ca	22.22
Mn	0.43
Fe	14.25
Cu	3.16
Zn	5.09
As	0.35
Итоги	100.00

Результаты элементного анализа отходов исследуемых предприятий свидетельствуют о значительных различиях их химическом составе, обусловленных спецификой технологических процессов и используемого сырья (рисунок 20).

Рисунок 20

Химический состав производственных отходов



	ТОО «Юг Строй Сервис ЛТД»)	ТОО «ЭкоШина»	ТОО «High Industrial Lubricants&Liquids Corporation (HILL)»	ТОО «Гермес-Б.Е.»	ТОО «Китайско-Казахстанская Маргенцевая Индустриальная Группа»	ТОО «Polymetech»	ТОО «KazFerro»
C	3,72	81,23	72,81	6,53	29,32	3,45	
O	40,51	6,65	7,99	38,43	37,74	41,83	31,82
F	4,22						
Na	0,41			0,68	0,73		2,84
Mg	1,45			0,78	0,91		1,29
Al	2,37	0,31	0,33	7,86	3,36		3,64
Si	24,12	1,54	3,52	20,11	9,55		10,35
P	4,81						
S	0,31	2,44	4,02			10,25	3,85
K	2,25		0,3	0,33	0,97	1,21	0,71
Ca	14,37	0,85	1,16	4,45	12,03	21,01	22,22
Fe	1,48	0,41	0,42	3,49		3,58	14,25
Cl		0,81	0,26				
Zn		5,74	9,19			12	5,09
Ti				0,8			
Cr				0,44			
Mn				16,11	3,85		0,43
Ba					1,56		
Cu						2,73	3,16
As						3,94	0,35

В целом результаты исследования показывают, что отходы предприятий содержат как природные минеральные компоненты, так и элементы, обладающие потенциальной экологической опасностью. Наличие тяжелых металлов и токсичных элементов, включая мышьяк, хром, медь, цинк и марганец, указывает на необходимость обеспечения надлежащего контроля за условиями хранения, транспортировки и утилизации отходов с целью минимизации риска загрязнения окружающей среды.

В 2024 году нами совместно с Департаментом экологии по городу Шымкент были проведены исследования почвы в санитарно-защитной зоне (далее-СЗЗ) и производственного полигона ТОО «Glometech» (таблица 3,4). Этот полигон принимает отходы ТОО «Polymettech». В ходе визуального осмотра было выявлено, что территория СЗЗ полигона способствует распространению загрязнения почв.

Результаты химического анализа почвенных образцов, отобранных на территории полигона в 2024 году, свидетельствуют о наличии устойчивого техногенного воздействия на почвенный покров. Установлены значительные превышения фоновых концентраций по ряду показателей, включая плотный остаток, хлориды, сульфаты, бикарбонаты, кальций, магний, подвижный фосфор, нефтепродукты, а также тяжелые металлы (мышьяк и свинец).

Таблица 3

Результаты химического анализа почвенных образцов СЗЗ (Протокол испытания почвы № 17 от 25.05.2024 г.)

№	Наименование загрязняющего вещества	Нормативный документ на метод испытания	Концентрация		Превышение
			фактическая	ПДК (фоновая)	
1	Плотный остаток, %	ГОСТ 26423-85 – «Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки»	1,094	0,116	в 9,04 раза
2	Хлорид (Cl^-), %	ГОСТ 26425 – «Почвы. Методы определения иона хлорида в водной вытяжке»	0,0026	0,0018	в 1,4 раза
3	Сульфат (SO_4^{2-}), %	ГОСТ 26426-85 – «Почвы. Методы определения иона сульфата в водной вытяжке»	0,48	0,06	в 8,0 раза
4	Бикарбонат (HCO_3^-), %	ГОСТ 26424-85 – «Почвы. Методы определения ионов карбоната и бикарбоната в водной вытяжке»	0,0031	0,0015	в 2,1 раза
5	Кальций (Ca), %	ГОСТ 26428-85 – «Почвы. Методы определения кальция и магния в водной вытяжке»	0,035	0,02	в 1,75 раза
6	Магний (Mg), %		0,153	0,0046	в 33,3 раза
7	Фосфор подвижный (P_2O_5), мг/кг	ГОСТ 26205-91 – «Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Мачигина в модификации ЦИНАО»	33,5	3,5	в 10,2 раза

Таблица 4

Результаты химического анализа почвенных образцов производственного полигона ТОО «Glometech» (Протокол испытания почвы № 28 от 27.12.2024 г., № 99 от 30.12.2024 г.).

№	Наименование загрязняющего вещества	Нормативный документ на метод испытания	Концентрация		Превышение
			фактическая	ПДК (фоновая)	
1	Плотный остаток, %	ГОСТ 26423-85 – «Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки»	1,09	0,062	в 17,5 раза
2	Хлорид (Cl^-), %	ГОСТ 26425 – «Почвы. Методы определения иона хлорида в водной вытяжке»	0,0044	0,0018	в 2,4 раза
3	Сульфат (SO_4^{2-}), %	ГОСТ 26426-85 – «Почвы. Методы определения иона сульфата в водной вытяжке»	0,72	0,012	в 60 раз
4	Бикарбонат (HCO_3^-), %	ГОСТ 26424-85 – «Почвы. Методы определения ионов карбоната и бикарбоната в водной вытяжке»	0,0061	0,0046	в 1,3 раза
5	Кальций (Ca), %	ГОСТ 26428-85 – «Почвы. Методы определения кальция и магния в водной вытяжке»	0,25	0,00125	в 20 раз
6	Магний (Mg), %		0,027	0,0046	в 5,8 раза
7	Фосфор подвижный (P_2O_5), мг/кг	ГОСТ 26205-91 – «Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Мачигина в модификации ЦИНАО»	34,6	3,5	в 9,8 раза
8	Нефтепродукт, мг/кг	СТ РК 2.378-2015 – «Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в пробах почв и грунтов флуориметрическим методом на анализаторе жидкости»	3,5	2,25	в 1,5 раза
9	Мышьяк (As), мг/кг	М 049-П/10 – «Методика выполнения измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах почв рентгенофлуоресцентным методом»	219,4	2,0	в 109,7 раза
10	Свинец (Pb), мг/кг		193,1	32,0	в 6,0 раза

В 2024 году нами совместного с Департаментом экологии по городу Шымкент были проведены исследования атмосферного воздуха, почвы и сброс сточных вод в близи производственного объекта ТОО «High Industrial Lubricants&Liquids Corporation (HILL)» (таблица 5).

В 2024 году совместно с Департаментом экологии по городу Шымкент были проведены исследования атмосферного воздуха в санитарно-защитной зоне и на производственном объекте ТОО «Гермес-Б.Е.» (таблица 6).

Также в 2023 году совместно с Департаментом экологии по городу Шымкент были проведены исследования атмосферного воздуха в санитарно-защитной зоне и на производственном объекте ТОО «Китайско-Казахстанская Марганцевая Индустриальная Группа» (таблица 7).

А в 2026 году были проведены исследования атмосферного воздуха на производственном объекте ТОО «Polymettech» (таблица 8).

В 2024 году нами совместно с Департаментом экологии по городу Шымкент были проведены исследования атмосферного воздуха на производственном объекте ТОО «ЭкоШина» (таблица 9).

Таблица 5

Результаты исследования химического анализа промышленных отходов ТОО «High Industrial Lubricants&Liquids Corporation (HILL)»

Наименование загрязняющего вещества	Нормативный документ на метод испытания	Концентрация, мг/кг		Превышение
		Фактическая	ПДК (фоновая)	
Результаты исследования химического анализа почвенных образцов (Протокол испытания почвы № 5 от 11.04.2024 г.)				
Нефтепродукты	СТ РК 2.378-2015 – «Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в пробах почв»	12240,0	64,0	в 191,2 раза
Результаты исследования проб атмосферного воздуха на источниках производственного объекта (Протокол № 17 от 11.04.2024 г.)				
Оксид углерода (CO)	СТ РК 1877-2009 – «Охрана природы. Атмосфера. Методы определения выброса оксида углерода из стационарных источников загрязнения»	0,2803	0,1832	в 1,53 раза
Результаты исследования проб ливневых стоков с лотка возле старого отстойника (Протокол испытания воды № 15 от 19.04.2024 г.)				
Нефтепродукты	СТ РК 2328-2013 – «Вода. Определение содержания нефтепродуктов флуориметрическим методом»	40,60	-	-

Таблица 6

Результаты исследования атмосферного воздуха в санитарно-защитной зоне и на производственном объекте ТОО «Гермес-Б.Е.»

№	Наименование загрязняющего вещества	Нормативный документ на метод испытания	Концентрация, мг/м^3		Превышение
			фактическая	ПДК	
Результаты исследования проб атмосферного воздуха СЗЗ (Протокол № 68 от 05.08.2024 г.)					
1	Оксид углерода (CO)	СТ РК 2.302-2021 – «Государственная система обеспечения единства измерений РК. Методика выполнения измерений. Определение массовой концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе, в воздухе рабочей зоны, в промышленных выбросов газоанализатором»	5,51	5,0	в 1,702 раза
2	Диоксид серы (SO_2)		0,64	0,5	в 1,28 раза
Результаты исследования проб на источнике загрязнения №0004 на производственного объекта ТОО «Гермес-Б.Е.» (Протокол № 100 от 10.09.2024 г.)					

Продолжение таблицы

№	Наименование загрязняющего вещества	Нормативный документ на метод испытания	Концентрация, мг/м³		Превышение
			фактическая	ПДК	
3	Оксид углерода (CO)	СТ РК 1877-2009 – «Охрана природы. Атмосфера. Методы определения выброса оксида углерода из стационарных источников загрязнения»	0,3785	0,052	в 0,3265 раза
4	Оксид азота (NO)	ПЭП-МВИ-004-22 (№kz.06.01.00571-2023) – «Методические указания (методика выполнения измерений) по организации и порядку проведения аналитического контроля источников загрязнения атмосферы»	0,00129	0,0005	в 0,00079 раза
5	Диоксид азота (NO_2)		0,00793	0,0031	в 0,00483 раз
6	Сероводород (H_2S)		0,00083	---	в 0,00083 раз

Таблица 7

Результаты исследования проб на источнике загрязнения производственного объекта ТОО «Китайско-Казахстанская Марганцевая Индустриальная Группа»

Наименование загрязняющего вещества	Нормативный документ на метод испытания	Концентрация, мг/м³		Превышение
		фактическая	ПДК	
Результаты исследования проб атмосферного воздуха СЗЗ (Протокол № 57 от 26.06.2023 г.)				
Пыль	СТ РК 2.302-2021 – «Государственная система обеспечения единства измерений РК. Методика выполнения измерений. Определение массовой концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе, в воздухе рабочей зоны, в промышленных выбросов газоанализатором»	1,2	0,5	в 2,4 раза

Таблица 8

Результаты исследования проб на источнике загрязнения на производственном объекте ТОО «Polymettech»

№	Наименование загрязняющих веществ	Нормативный документ на метод	Концентрация, г/с		Превышение
			Фактическая	ПДВ	
1	2	3	4	5	6
Результаты исследования проб на источнике загрязнения №0001 – большой шахтовой печи (Протокол № 26 от 01.04.2026 г.).					
1	Оксид углерода (CO)	СТ РК 1877-2009 – «Охрана природы. Атмосфера. Методы определения выброса оксида углерода из стационарных источников загрязнения»	49,4952	0,2747	в 180,1 раза
2	Диоксид серы (SO_2)	СТ РК ГОСТ Р ИСО 7935-2010 – «Выбросы стационарных источников. Определение массовой концентрации диоксид серы. Характеристики автоматических методов измерений в условиях применения»	56,4506	0,0083	в 79090,0 раза
Результаты исследования проб на источнике загрязнения №0002 – сушильный барабан (Протокол № 13 от 18.03.2026 г.).					
3	Оксид углерода (CO)	СТ РК 1877-2009 – «Охрана природы. Атмосфера. Методы определения выброса оксида углерода из стационарных источников загрязнения»	0,208	0,0029	в 71,7 раза

Продолжение таблицы

№	Наименование загрязняющих веществ	Нормативный документ на метод	Концентрация, г/с		Превышение
			Фактическая	ПДВ	
1	2	3	4	5	6
4	Диоксид серы (SO_2)	СТ РК ГОСТ Р ИСО 7935-2010 – «Выбросы стационарных источников. Определение массовой концентрации диоксид серы. Характеристики автоматических методов измерений в условиях применения»	0,06285	0,000055	в 1142,72 раза
5	Оксид азота (NO)	ПЭП-МВИ-004-22 (№kz.06.01.00571-2023) – «Методические указания (методика выполнения измерений) по организации и порядку проведения аналитического контроля источников загрязнения атмосферы»	0,00036	0,0001186	в 30,35 раза
6	Диоксид азота (NO_2)		0,00223	0,00073	в 3,05 раза
7	Взвешенные вещества	СТ РК ГОСТ Р 50820-2005 – «Оборудование газоочистное и пылеулавливающее. Методы определения запыленности газопылевых потоков»	0,5398	0,00339	в 159,2 раза
Результаты исследования проб на источнике загрязнения №0001 – маленькой шахтовой печи (Протокол № 23 от 31.03.2026 г.)					
8	Оксид углерода (CO)	СТ РК 1877-2009 – «Охрана природы. Атмосфера. Методы определения выброса оксида углерода из стационарных источников загрязнения»	36,18	0,2747	в 131,7 раза
9	Диоксид серы (SO_2)	СТ РК ГОСТ Р ИСО 7935-2010 – «Выбросы стационарных источников. Определение массовой концентрации диоксида серы. Характеристики автоматических методов измерений в условиях применения»	12,19	0,0083	в 1468,67 раза
10	Сероводород (H_2S)	СТ РК 2.297-2014 – «Государственная система обеспечения единства измерений РК. Методика выполнения измерений массовой концентрации и определения массового выброса загрязняющих веществ в отходящих газах топливо сжигающих установок с применением газоанализатор различных типов»	0,329	-	-
11	Взвешенные вещества	СТ РК ГОСТ Р 50820-2005 – «Оборудование газоочистное и пылеулавливающее. Методы определения запыленности газопылевых потоков»	0,802	0,00377	в 212,7 раза
Результаты исследования проб на источнике загрязнения б/н сушильная камера (Протокол № 27 от 02.04.2026 г.).					
12	Сероводород (H_2S)	СТ РК 2.297-2014 – «Государственная система обеспечения единства измерений РК. Методика выполнения измерений массовой концентрации и определения массового выброса загрязняющих веществ в отходящих газах топливо сжигающих установок с применением газоанализатор различных типов»	0,0022	-	-
13	Диоксид серы (SO_2)	СТ РК ГОСТ Р ИСО 7935-2010 – «Выбросы стационарных источников. Определение массовой концентрации диоксид серы. Характеристики автоматических методов измерений в условиях применения»	0,1159	-	*
14	Взвешенные вещества	СТ РК ГОСТ Р 50820-2005 – «Оборудование газоочистное и пылеулавливающее. Методы определения запыленности газопылевых потоков»	0,0484	-	-

Таблица 9

Результаты исследования проб на источнике загрязнения на производственном объекте ТОО «ЭкоШина»

№	Наименование загрязняющих веществ	Нормативный документ на метод	Концентрация, г/с		Превышение
			Фактическая	ПДВ	
Результаты исследования проб на источнике загрязнения №0002 – пиролизный печь (Протокол № 99 от 14.08.2025 г.).					
1	Сероводород (H_2S)	СТ РК 2.297-2014 – «Государственная система обеспечения единства измерений РК. Методика выполнения измерений массовой концентрации и определения массового выброса загрязняющих веществ в отходящих газах топливо сжигающих установок с применением газоанализатор различных типов»	0,003	-	-
2	Взвешенные вещества	СТ РК ГОСТ Р 50820-2005 – «Оборудование газоочистное и пылеулавливающее. Методы определения запыленности газопылевых потоков»	0,0657	-	-
Результаты исследования проб на источнике загрязнения – изготовление модульных покрытий и линия по брикетированию технического углерода (Протокол № 101 от 14.08.2025 г.).					
3	Оксид углерода (CO)	СТ РК 1877-2009 – «Охрана природы. Атмосфера. Методы определения выброса оксида углерода из стационарных источников загрязнения»	0,00612	-	-
4	Взвешенные вещества	СТ РК ГОСТ Р 50820-2005 – «Оборудование газоочистное и пылеулавливающее. Методы определения запыленности газопылевых потоков»	0,00076	-	-

Оксид углерода является одним из основных продуктов неполного сгорания топлива и отходов. Превышение нормативных концентраций данного вещества свидетельствует о недостаточной эффективности процесса сжигания и повышенной антропогенной нагрузке на атмосферный воздух. Накопление оксида углерода ухудшает качество атмосферного воздуха в зоне воздействия предприятия и способствует формированию неблагоприятной экологической обстановки. Кроме того, результаты исследования атмосферного воздуха в санитарно-защитных зонах предприятий показали превышение нормативных значений предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ (Министерство здравоохранения Республики Казахстан & Министерство охраны окружающей среды Республики Казахстан, 2004).

Количественная оценка антропогенного воздействия промышленных предприятий г. Шымкента на окружающую среду выполнена с применением расчетного метода. Расчет осуществлялся по следующей формуле (Республика Казахстан, 2014):

$$\textit{Сумма штрафа} = \textit{Объем превышения загрязняющих веществ} * \textit{* Ставка платы за 1 тонну х МРП} * \textit{*10000\%,} \quad (1)$$

где: МРП – месячный расчетный показатель, установленный на соответствующий период, тенге, ставка платы за 1 тонну – определяется в размере, кратном месячному расчетному показателю, действующему на первое число налогового периода (Министерство экологии, геологии и природных ресурсов Республики Казахстан, 2022).

Общее суммарное антропогенное воздействие промышленных предприятий на окружающую среду г. Шымкента за период 2023–2026 гг. представлено в таблице 10.

Таблица 10

Общее суммарное антропогенное воздействие промышленных предприятий на окружающую среду за период 2023–2026 гг.

№	Наименование предприятий	Размер антропогенного воздействия, тенге
1	ТОО «High Industrial Lubricants & Liquids Corporation (HILL)»	282 483,0
2	ТОО «Гермес-Б.Е.»	99 579 561,0
3	ТОО «Китайско-Казахстанская Марганцевая Индустриальная Группа»	13 512 316,0
4	ТОО «Polymettech»	63 960 372,0
5	ТОО «ЭкоШина»	306 402,0
	Общая сумма	177 641 134,0

В целом результаты проведенных исследований подтверждают, что применение расчетных методов экономической оценки антропогенного воздействия на окружающую среду позволит объективно определить масштабы негативного воздействия хозяйственной деятельности на окружающую среду и обеспечить реализацию принципа экономической ответственности природопользователей. Общий размер экономической оценки антропогенного воздействия для обследованных промышленных предприятий составил 177 641 134,0 тенге, что свидетельствует о необходимости дальнейшего совершенствования систем экологического менеджмента, внедрения эффективных технологий очистки выбросов и усиления государственного экологического контроля за соблюдением требований природоохранного законодательства.

Результаты и их обсуждение

Проведенная комплексная экологическая оценка позволила установить, что структура техногенных отходов промышленных предприятий г. Шымкента характеризуется высокой неоднородностью как по объёмам образования, так и по химическому составу. Наибольший вклад в образование отходов вносят предприятия металлургической, нефтеперерабатывающей и химической промышленности, а также объекты хранения исторически накопленных отходов фосфорного производства.

Анализ количественных характеристик показал, что основная масса накопленных отходов представлена металлургическими шлаками, шламами, нефтесодержащими отходами и фосфорсодержащими материалами. При этом значительная часть отходов сосредоточена на ограниченном количестве промышленных объектов, что формирует локальные зоны повышенной экологической нагрузки. Подобная пространственная концентрация загрязнителей повышает вероятность миграции токсичных компонентов в почвенный покров, поверхностные и подземные воды, а также увеличивает риск вторичного загрязнения атмосферного воздуха.

Результаты элементного анализа подтвердили, что химический состав отходов определяется особенностями технологических процессов каждого предприятия. Наряду с преобладающими минеральными компонентами установлено присутствие потенциально опасных элементов – мышьяк, свинца, хрома, меди, цинка и марганца. Наличие данных компонентов свидетельствует о высокой экологической опасности отдельных видов отходов и необходимости их длительного хранения исключительно в инженерно-защищенных объектах либо последующей переработки с извлечением ценных компонентов.

Особое внимание заслуживают результаты исследований почвенного покрова в районе полигона промышленных отходов ТОО «Glometech». Существенное фоновых концентраций по мышьяку, свинцу, сульфатам, нефтепродуктам и другим показателям свидетельствует о формировании устойчивого техногенного геохимического ореола. Полученные данные подтверждают, что длительное размещение токсичных отходов оказывает влияние не только на территорию полигона, но и на прилегающую санитарно-защитную зону.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что экологическая опасность промышленных предприятий определяется не только объемом образующихся отходов, но и их физико-химическими свойствами, условиями хранения и эффективностью природоохранных мероприятий. Даже сравнительно небольшие объемы

токсичных отходов могут представлять большую экологическую угрозу, чем значительные массы инертных минеральных материалов.

Выполненная экономическая оценка антропогенного воздействия показала существенную дифференциацию предприятий по уровню экологического ущерба. Наибольшие значения установлены для металлургических предприятий, что подтверждает их приоритетное значение при разработке мероприятий по снижению техногенной нагрузки. Результаты исследования свидетельствуют о необходимости перехода от преимущественного накопительной модели обращения с промышленными отходами к их комплексной переработке и повторному использованию в качестве вторичных материальных ресурсов. Перспективным направлением является применение металлургических шлаков и золошлаковых материалов в производстве строительных материалов, что позволит одновременно сократить объемы захоронения отходов и снизить потребление природного сырья.

Заключение

Выполненное исследование позволило разработать комплексную экологическую оценку техногенных отходов промышленных предприятий г. Шымкента и выявить основные факторы формирования экологических рисков в промышленно развитой городской среде.

Показано, что определяющее влияние на состояние окружающей среды оказывают предприятия металлургического, нефтеперерабатывающего и химического профиля, а также объекты хранения исторически накопленных промышленных отходов. Наиболее значимыми экологическими факторами являются наличие токсичных компонентов в составе отходов, высокая концентрация накопителей отходов и превышение нормативных показателей загрязнения отдельных компонентов окружающей среды.

Полученные результаты подтверждают необходимость совершенствования действующей системы управления промышленными отходами на основе риск-ориентированного подхода, предусматривающего постоянный экологический мониторинг, цифровой учет образования, накопления и движения отходов, модернизацию газоочистного оборудования и развитие технологий глубокой переработки техногенных материалов.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных данных при экологическом нормировании деятельности промышленных предприятий, разработке региональных программ обращения с отходами, совершенствовании производственного экологического контроля и принятии управленческих решений, направленных на снижение антропогенной нагрузки и повышение экологической безопасности г. Шымкента.

Конфликт интересов

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

Финансирование

Работа выполнена в рамках ГБНИР №26-32-04 «Оценка экологического состояния Туркестанского региона и обеспечение его устойчивого развития посредством внедрения зелёных технологий.» на 01.07.2026 г.–31.12.2026 г. раздел 2 «Исследование экологически безопасных технологий извлечения тяжёлых металлов из минерального сырья и техногенных отходов.» при поддержке Комитета науки Министерства образования и науки РК.».

Вклад авторов

Г.С. Кенжибаева: разработка концепции исследования, сбор и обработка исходных данных, проведение экологической оценки и подготовка первоначального варианта рукописи; С.Д. Балыбек: разработка методологии исследования, проведение полевых и аналитических исследований, обработка и интерпретация результатов, подготовка и редактирование рукописи, автор для переписки; А.А. Абдуова: проведение полевых исследований, отбор проб, подготовка экспериментальных данных и графических материалов; Ж.Д. Пернебаев: участие в экологическом мониторинге, проведение инструментальных исследований и предоставление материалов по промышленным объектам; А.М. Есимова: анализ научной литературы, статистическая обработка результатов исследования, подготовка таблиц и оформление рукописи; Е.К. Есимов – анализ результатов исследования, проверка корректности расчетов, редактирование текста и оформление списка литературы.

Литература

Campana, P., Censi, R., Tarola, A. M., & Ruggieri, R. (2025). Artificial intelligence and digital twins for sustainable waste management: A bibliometric and thematic review. *Applied Sciences, 15*(11), 6337. https://doi.org/10.3390/app15116337

Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition*. https://www.ellenmacarthurfoundation.org/towards-a-circular-economy-business-rationale-for-an-accelerated-transition

Hamid, H., Ahmad, N., & Shaarani, S. (2025). The role of industrial waste in green and sustainable technology: A review. *International Journal of Research and Innovation in Social Science*. https://doi.org/10.47772/IJRISS.2025.90300398

Kumar, R., & Singh, P. (2020). Technological advancements in industrial waste recycling: A review on circular economy approaches. *Resources, Conservation and Recycling, 162*, 105036.

Lee, S., Park, J., & Kim, H. (2021). Recovery of valuable metals from metallurgical slags using innovative hydrometallurgical processes. *Journal of Cleaner Production, 286*, 125451.

Li, Y., Zhao, X., & Chen, L. (2022). Utilization of fly ash and slag in eco-friendly building materials: Advances and challenges. *Construction and Building Materials, 330*, 127207.

Li, X., Gong, P., & Liang, L. (2019). Remote sensing of urban environments and applications in waste monitoring. *Remote Sensing of Environment, 233*, 111379.

Pernebayev, Z., Kenzhibayeva, G., Issayeva, A., Tileuberdi, A., Balybek, S., & Nurseiit, K. (2026). An environmental assessment of the heavy metal impact on the soil cover: The case study of Shymkent. *Engineering, Technology & Applied Science Research, 16*(3), 36790–36795. https://doi.org/10.48084/etasr.19108

United Nations Environment Programme. (2019). *Waste management outlook for West Asia 2019: Waste to wealth*. https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/31205

Wang, Q., Zhang, T., & Liu, J. (2023). Digital twin and intelligent modeling of industrial waste management systems. *Environmental Science & Technology, 57*(4), 1812–1825.

Wang, X. V., & Wang, L. (2019). Digital twin-based WEEE recycling, recovery and remanufacturing in the background of Industry 4.0. *International Journal of Production Research, 57*(12), 3892–3902. https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1497819

World Bank. (2018). *What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0

Zhang, L., Xu, Z., & Zhao, Y. (2020). Industrial waste management and resource recovery: Current status and future directions. *Journal of Cleaner Production, 267*, 122106.

Świnder, H., Lejwoda, P., Krawczyk, P., Cempa, M., & Bauerek, A. (2024). Potential for the recovery of selected metals and critical raw materials from slags from polymineral Zn–Pb ore metallurgy–Part II. *Minerals, 14*(11), 1091. https://doi.org/10.3390/min14111091

Aydarkhanova, G. Zh., Seidullaeva, A. M., & Kuanyshbaeva, D. K. (2019). Issledovanie vozmozhnosti pererabotki zoloshlakovykh otkhodov teploenergetiki Kazakhstana [Study of the possibility of processing ash and slag waste from Kazakhstan's thermal power industry]. *Vestnik Kazakhskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta imeni K. I. Satpaeva*, (5), 74–80. (In Russian)

Akhmetov, K. B. (2021). Problemy utilizatsii i pererabotki promyshlennykh otkhodov v Kazakhstane [Problems of industrial waste disposal and processing in Kazakhstan]. *Vestnik Kazakhskogo natsional'nogo universiteta. Seriya ekologicheskaya, 67*(2), 78–84. (In Russian)

Batyrkhanova, A., Isaeva, R., Sarsenbaev, B., Sauganova, G., & Abduova, A. (2024). Tekhnogennye otkhody promyshlennosti – tsennoe syr'e dlya proizvodstva stroitel'nykh materialov [Industrial technogenic waste as valuable raw material for the production of construction materials]. *Eurasian Journal of Ecology, 80*(3), 35–42. https://doi.org/10.26577/EJE.2024.v80.i3-03 (In Russian)

Ivanov, I. I., Petrov, P. P., & Sidorov, A. A. (2020). Ekologicheskie aspekty obrashcheniya s otkhodami metallurgicheskogo proizvodstva [Environmental aspects of metallurgical waste management]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii, 24*(5), 45–52. (In Russian)

Kenzhebekov, B. A., Myrzakulov, K. A., & Nurgalieva, A. T. (2021). Perspektivy utilizatsii metallurgicheskikh shlakov v stroitel'noi industrii Kazakhstana [Prospects for the utilization of metallurgical slag in Kazakhstan's construction industry]. *Izvestiya Natsional'noi inzhenernoi akademii Respubliki Kazakhstan*, (2(80)), 112–118. (In Russian)

Kenzhibaeva, G. S., Balybek, S. D., & Bekebaev, A. P. (2026). [Nazvanie doklada ne ukazano v iskhodnom spiske] [Title of the presentation not provided in the original list]. In *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Auezovskie chteniya-24: Kazakhstan v epokhu iskusstvennogo intellekta: aktual'nye zadachi i ikh resheniya cherez tsifrovuyu transformatsiyu"* [Proceedings of the international scientific and practical conference "Auezov Readings-24: Kazakhstan in the era of artificial intelligence: Current challenges and their solutions through digital transformation"] (Vol. 8, pp. 124–134). (In Russian)

Kolesnikov, A. S., Zholdasbekova, A. A., & Sadykov, N. S. (2022). Otsenka vozdeistviya tekhnogennykh otkhodov na komponenty okruzhayushchei sredy v promyshlennykh regionakh [Assessment of the impact of technogenic waste on environmental components in industrial regions]. *Ekologiya i promyshlennost' Kazakhstana, 76*(4), 34–41. (In Russian)

Kolesnikov, A. S., & Smagulova, G. T. (2021). Metody ekologicheskoi otsenki i monitoringa tekhnogennykh otkhodov [Methods for environmental assessment and monitoring of technogenic waste]. *Vestnik Kazakhskogo natsional'nogo universiteta. Seriya ekologicheskaya, 68*(3), 52–59. (In Russian)

Ministerstvo zdravookhraneniya Respubliki Kazakhstan, & Ministerstvo okhrany okruzhayushchei sredy Respubliki Kazakhstan. (2004). *Ob utverzhdenii normativov predel'no dopustimykh kontsentratsii vrednykh veshchestv, vrednykh mikroorganizmov i drugikh*

veshchestv, zagryaznyayushchikh pochvu [On approval of maximum permissible concentrations of harmful substances, harmful microorganisms, and other soil pollutants] (Joint Order No. 99 of January 30, 2004, and No. 21-P of January 27, 2004). (In Russian)

Ministerstvo ekologii, geologii i prirodnykh resursov Respubliki Kazakhstan. (2022). *Ob utverzhdenii formy otcheta po inventarizatsii otkhodov i instruktsii po ee zapolneniyu* [On approval of the waste inventory report form and instructions for completing it] (Order No. 14 of January 18, 2022). https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2200026577 (In Russian)

Nyptaev, M. K. (2023). Otsenka vozdeistviya promyshlennykh otkhodov na okruzhayushchuyu sredu i zdorov'e naseleniya [Assessment of the impact of industrial waste on the environment and public health]. *Ekologiya i promyshlennost' Kazakhstana, 79*(3), 22–29. (In Russian)

Respublika Kazakhstan. (2014). *Kodeks Respubliki Kazakhstan ob administrativnykh pravonarushениях* [Code of the Republic of Kazakhstan on Administrative Offenses] (No. 235-V ZRK of July 5, 2014). https://adilet.zan.kz/rus/docs/K1400000235 (In Russian)

Seidullaev, A. T. (2022). Ekologicheskie problemy nakoplennykh tekhnogennykh otkhodov v yuzhnykh regionakh Kazakhstana [Environmental problems associated with accumulated technogenic waste in the southern regions of Kazakhstan]. *Vestnik Kazakhskogo natsional'nogo universiteta. Seriya ekologicheskaya, 70*(1), 56–64. (In Russian)

Сведения об авторах:

Кенжибаева Гульмира Советовна – кандидат технических наук, профессор Южно-Казахстанского исследовательского университета имени Мухтара Ауэзова (Шымкент, Казахстан, e-mail: Sovetovna.g7272@gmail.com).

С.Д. Балыбек (автор-корреспондент) – докторант Южно-Казахстанского исследовательского университета имени Мухтара Ауэзова (Шымкент, Казахстан, e-mail: ecology_uko@mail.ru).

А.А. Абдуова – кандидат технических наук, доцент Южно-Казахстанского исследовательского университета имени Мухтара Ауэзова (Шымкент, Казахстан, e-mail: aisulu.abduova@mail.ru).

Ж.Д. Пернебаев – сотрудник ТОО «Центр научных исследований и экологической экспертизы "KazEcoHolding"» (Шымкент, Казахстан, e-mail: zhaksylykpernebaev@gmail.com).

А.М. Есимова – кандидат технических наук, доцент Южно-Казахстанского исследовательского университета имени Мухтара Ауэзова (Шымкент, Казахстан, e-mail: anar_esimova@mail.ru).

Е.К. Есимов – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, доцент Южно-Казахстанского исследовательского университета имени Мухтара Ауэзова (Шымкент, Казахстан, e-mail: esimov58@mail.ru).

Information about the authors:

G.S. Kenzhibayeva – candidate of technical sciences, professor, Mukhtar Auezov South Kazakhstan Research University (Shymkent, Kazakhstan, e-mail: Sovetovna.g7272@gmail.com).

S.D. Balybek (corresponding author) – PhD student, Mukhtar Auezov South Kazakhstan Research University (Shymkent, Kazakhstan, e-mail: ecology_uko@mail.ru).

A.A. Abduova – candidate of technical sciences, associate professor, Mukhtar Auezov South Kazakhstan Research University (Shymkent, Kazakhstan, e-mail: aisulu.abduova@mail.ru).

Z. Pernebayev – employee, LLP «Centre for Scientific Research and Ecological Expertise «KazEcoHolding» (Shymkent, Kazakhstan, e-mail: zhaksylykpernebaev@gmail.com).

A. M. Esimova – candidate of technical sciences, associate professor, Mukhtar Auezov South Kazakhstan Research University (Shymkent, Kazakhstan, e-mail: anar_esimova@mail.ru).

E.K. Yessimov – candidate of technical sciences, associate professor at Mukhtar Auezov South Kazakhstan Research University (Shymkent, Kazakhstan, e-mail: esimov58@mail.ru).

Авторлар туралы мәлімет:

Г.С. Кенжибаева – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Мұхтар Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті (Шымкент, Қазақстан, e-mail: Sovetovna.g7272@gmail.com).

С.Д. Балыбек (корреспонденттік автор) – докторант, Мұхтар Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті (Шымкент, Қазақстан, e-mail: ecology_uko@mail.ru).

А.А. Абдуова – техника ғылымдардың кандидаты, доцент, Мұхтар Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті, (Шымкент, Қазақстан, e-mail: aisulu.abduova@mail.ru).

Ж.Д. Пернебаев – қызметкер, «KazEcoHolding» ғылыми зерттеулер және экологиялық сараптама орталығы» ЖШС (Шымкент, Қазақстан, e-mail: zhaksylykpernebaev@gmail.com).

А.М. Есимова – техника ғылымдардың кандидаты, доцент, Мұхтар Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті (Шымкент, Қазақстан, e-mail: anar_esimova@mail.ru).

Е.К. Есимов – техника ғылымдардың кандидаты, қауымдастырылған профессор, доцент, Мұхтар Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті (Шымкент, Қазақстан, e-mail: esimov58@mail.ru).

Поступила 25 апреля 2026 года
Принята 23 сентября 2026 года

IRSTI 62.13.99; 34.27.17 https://doi.org/10.26577/EJE208830426

A.M. Belkozhayev[1*], P. Neumyvakin [1], R.N. Tuleyeva [1,2],
M. Mussalimova[1,2] G. Yelemessova[1,2], G. Nargiz[1,2],
G. Toleutay[1,3]

[1]Geology and Oil-Gas Business Institute Named After K. Turyssov, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan
[2]Research institute of advanced materials, Almaty, Kazakhstan
[3]Department of Chemistry, University of Tennessee, USA
*e-mail: a.belkozhayev@satbayev.university

EFFECTS OF CULTIVATION PARAMETERS ON BACTERIAL NANOCELLULOSE PRODUCTION BY *KOMAGATAEIBACTER XYLINUS* DSM 2325

Bacterial nanocellulose (BNC) is a high-value biopolymer with promising applications in biomedical engineering, food technology, packaging, and advanced materials. However, industrial implementation remains constrained by relatively low production yields and the sensitivity of cellulose biosynthesis to cultivation conditions. In the present study, the combined effects of temperature, initial pH, ethanol concentration, and sodium lactate concentration on BNC production by *Komagataeibacter xylinus* (*K. xylinus*) DSM 2325 under agitated cultivation conditions were investigated using a four-factor Box–Behnken design coupled with Response Surface Methodology (RSM). Twenty-nine experimental runs were conducted, and BNC yield was evaluated as dry cellulose production. The highest experimental yield (0.446 g/L) was obtained at 30 °C, pH 6, 2% (v/v) ethanol, and without sodium lactate supplementation. Analysis of variance demonstrated that temperature, pH, and sodium lactate significantly affected BNC production, whereas ethanol showed no statistically significant linear effect. The developed quadratic model was significant ($p = 0.0001$) with an R^2 value of 0.7752. Numerical optimization predicted optimal cultivation conditions of 24.4 °C, pH 4.57, 2% ethanol, and 0.04% sodium lactate, corresponding to a predicted yield of 0.767 g/L. However, experimental validation revealed lower cellulose production under optimized conditions than under the standard medium. Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) and X-ray diffraction (XRD) analyses confirmed the successful synthesis of chemically pure BNC with a characteristic cellulose I crystalline structure. Scanning electron microscopy (SEM) was used to evaluate the surface morphology and fibrillar network structure of the bacterial nanocellulose samples. These findings demonstrate the importance of experimental validation when applying statistical optimization approaches to BNC production systems.

Keywords: bacterial nanocellulose, *Komagataeibacter xylinus*, response surface methodology, Box–Behnken design, ethanol, sodium lactate, optimization.

А.М. Белкожаев[1*], П. Неумывакин[1], Р.Н. Тулеева[1,2],
М. Мусалимова[1,2], Г. Елемесова[1,2], Г. Наргиз[1,2], Г. Толеутай[1,3]

[1]Сәтбаев университеті, Геология және мұнай-газ ісі институты, Алматы, Қазақстан
[2]Жетілдірілген материалдар ғылыми-зерттеу институты, Алматы, Қазақстан
[3]Теннесси университеті, АҚШ
*e-mail: a.belkozhayev@satbayev.university

Komagataeibacter xylinus DSM 2325 штамының бактериялық наноцеллюлоза өндіруіне өсіру параметрлерінің әсері

Бактериялық наноцеллюлоза (БН) – биомедициналық инженерияда, тағам технологиясында, қаптама өндірісінде және заманауи материалдар жасауда кең қолдану әлеуетіне ие жоғары құнды биополимер. Алайда оның өнеркәсіптік деңгейде өндірілуі салыстырмалы түрде төмен өнімділікпен және целлюлоза биосинтезінің өсіру жағдайларына жоғары тәуелділігімен шектеледі. Осы зерттеуде араластырып өсіру жағдайында *Komagataeibacter xylinus* DSM 2325 штамының бактериялық наноцеллюлоза өндіруіне температураның, бастапқы pH мәнінің, этанол концентрациясының және натрий лактаты концентрациясының бірлескен әсері төрт факторлы Бокс–Бенкен жоспары мен жауап беті әдіснамасын (Response Surface Methodology, RSM) қолдану арқылы зерттелді. Барлығы 29 тәжірибе жүргізіліп, БН шығымы құрғақ целлюлоза мөлшері

 © 2026 Al-Farabi Kazakh National University

бағаланды. Ең жоғары тәжірибелік өнімділік (0,446 г/л) 30 °C температурада, pH 6 мәнінде, 2% (көлем/көлем) этанол қатысында және натрий лактатын қоспай өсірілген жағдайда алынды. Дисперсиялық талдау нәтижелері температураның, pH мәнінің және натрий лактатының BNC өндірілуіне елеулі әсер ететінін көрсетті, ал этанолдың сызықтық әсері статистикалық тұрғыдан маңызды болмады. Құрылған квадратиктік модель статистикалық маңызды болды ($p = 0,0001$), ал детерминация коэффициенті $R^2 = 0,7752$ құрады. Сандық оңтайландыру нәтижесінде 24,4 °C температура, pH 4,57, 2% этанол және 0,04% натрий лактаты жағдайлары оңтайлы деп болжанып, BNC шығымы 0,767 г/л болады деп есептелді. Алайда тәжірибелік тексеру барысында оңтайландырылған жағдайларда алынған целлюлоза мөлшері стандартты қоректік ортаға қарағанда төмен болды. Фурье түрлендірулі инфрақызыл спектроскопия (FTIR) және рентгендік дифракциялық талдау (XRD) нәтижелері химиялық тұрғыдан таза және целлюлоза I типіне тән кристалдық құрылымы бар BNC синтезделгенін растады. Сонымен қатар сканерлеуші электрондық микроскопия (SEM) әдісі арқылы бактериялық наноцеллюлоза үлгілерінің беткі морфологиясы мен фибриллярлық тор құрылымы зерттелді. Алынған нәтижелер бактериялық наноцеллюлоза өндіру жүйелерін оңтайландыру кезінде статистикалық модельдерді міндетті түрде тәжірибелік тексерумен растаудың маңыздылығын көрсетеді.

Түйін сөздер: бактериялық наноцеллюлоза, *Komagataeibacter xylinus*, жауап беті әдіснамасы, Бокс–Бенкен жоспары, этанол, натрий лактаты, оңтайландыру.

А.М. Белкожаев[1*], П. Неумывакин[1], Р.Н. Тулеева[1, 2],
М. Мусалимова[1, 2], Г. Елемесова[1,2], Г. Наргиз[1, 2], Г.Толеутай[1, 3]

[1]Институт геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова, Сатпаев университет, Алматы, Казахстан
Университет имени К. Сатпаева, Алматы, Казахстан
[2]Научно-исследовательский институт передовых материалов, Алматы, Казахстан
[3]Кафедра химии, Университет Теннесси, США
[*]e-mail: a.belkozhayev@satbayev.university

Влияние параметров культивирования на продукцию бактериальной наноцеллюлозы штаммом *Komagataeibacter xylinus* DSM 2325

Бактериальная наноцеллюлоза (БН) представляет собой высокоценный биополимер с широкими перспективами применения в биомедицинской инженерии, пищевых технологиях, упаковочных материалах и современных функциональных материалах. Однако её промышленное производство по-прежнему ограничено сравнительно низкими выходами продукта и высокой чувствительностью биосинтеза целлюлозы к условиям культивирования. В настоящем исследовании с использованием четырёхфакторного плана Бокса–Бенкена и методологии поверхности отклика (Response Surface Methodology, RSM) изучено совместное влияние температуры, начального значения pH, концентрации этанола и концентрации лактата натрия на продукцию бактериальной наноцеллюлозы штаммом *Komagataeibacter xylinus* DSM 2325 в условиях культивирования с перемешиванием. Было проведено 29 экспериментальных серий, а выход BNC оценивали по количеству сухой целлюлозы. Максимальный экспериментальный выход (0,446 г/л) был получен при температуре 30 °C, pH 6, содержании этанола 2% (об. /об.) и отсутствии добавления лактата натрия. Дисперсионный анализ показал, что температура, pH и лактат натрия оказывают статистически значимое влияние на продукцию БН тогда как линейный эффект этанола оказался статистически незначимым. Разработанная квадратичная модель была статистически значимой ($p = 0,0001$) при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,7752$. Численная оптимизация предсказала оптимальные условия культивирования: температура 24,4 °C, pH 4,57, 2% этанола и 0,04% лактата натрия, что соответствовало прогнозируемому выходу 0,767 г/л. Однако экспериментальная проверка показала более низкую продукцию целлюлозы в оптимизированных условиях по сравнению со стандартной средой. Анализ методом инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FTIR) и рентгеновской дифракции (XRD) подтвердил успешный синтез химически чистой бактериальной наноцеллюлозы с характерной кристаллической структурой целлюлозы I. Для оценки морфологии поверхности и структуры фибриллярной сети образцов бактериальной наноцеллюлозы была использована сканирующая электронная микроскопия (SEM). Полученные результаты демонстрируют важность экспериментальной валидации статистических подходов при оптимизации процессов производства бактериальной наноцеллюлозы.

Ключевые слова: бактериальная наноцеллюлоза, *Komagataeibacter xylinus*, методология поверхности отклика, план Бокса–Бенкена, этанол, лактат натрия, оптимизация.

Introduction

BNC is a unique extracellular polysaccharide produced by several acetic acid bacteria, particularly members of the genus *Komagataeibacter (Almeida et al., 2021; Barja, 2021)*. BNC possesses exceptional physicochemical properties, including high purity, mechanical strength, biocompatibility, biodegradability, and water-holding capacity, making it a promising material for biomedical, food, packaging, and engineering applications (Phatchayawat et al., 2025; R et al., 2021). A major advantage of BNC over plant-derived cellulose is its intrinsic purity, as it is synthesized without lignin, hemicellulose, or other plant-associated contaminants (Dáger-López et al., 2024). Among BNC-producing microorganisms, *K. xylinus* is considered one of the most efficient cellulose producers and has therefore become a model organism for studying bacterial cellulose biosynthesis (Ryngajłło et al., 2020; Ryngajłło, Kubiak, et al., 2019). The strain *K. xylinus* DSM 2325 possesses a well-characterized cellulose synthase system and demonstrates the ability to produce highly crystalline cellulose with excellent structural properties (Jang et al., 2019). Nevertheless, large-scale industrial implementation of BNC remains limited by relatively low productivity and the high cost of cultivation media. Consequently, optimization of cultivation conditions represents one of the most important approaches for improving the economic feasibility of bacterial cellulose production (Sayah et al., 2025; Skaradziński et al., 2025). The production of BNC is strongly influenced by environmental and nutritional factors, including temperature, pH, dissolved oxygen availability, carbon source composition, and the presence of metabolic stimulators (Chen et al., 2019). Temperature and pH directly affect bacterial growth, enzyme activity, and the regulation of cellulose biosynthesis pathways (Li et al., 2022). Previous studies have shown that even small deviations from optimal cultivation conditions may significantly reduce cellulose yield and alter the morphology of the resulting material. Therefore, identifying optimal physicochemical conditions is essential for maximizing productivity (El-Naggar et al., 2025; Rackov et al., 2025). In addition to conventional medium components, several metabolic additives have been reported to enhance bacterial cellulose production (Mongkolchat et al., 2026). Ethanol is one of the most extensively studied supplements and has been shown to stimulate cellulose biosynthesis in various *Komagataeibacter* strains (Montenegro-Silva et al., 2024). The beneficial effect of ethanol is commonly attributed to its role as an auxiliary energy source and its ability to redirect carbon metabolism away from gluconic acid formation, thereby increasing the availability of carbon precursors for cellulose synthesis (Pagliardini et al., 2013; Sun et al., 2020). However, the magnitude of this effect is highly strain-dependent and may vary according to cultivation conditions (Barboráková et al., 2025). Organic acids and their salts have also received attention as potential modulators of bacterial cellulose production (Revin et al., 2018; Revin et al., 2021). Sodium lactate can influence cellular metabolism by serving as an alternative carbon source and affecting intracellular redox balance. Furthermore, lactate supplementation may alter medium buffering capacity and cellular energy metabolism, potentially influencing cellulose biosynthesis (Hu et al., 2025; Lasagni et al., 2024). Despite these potential benefits, information regarding the combined effects of sodium lactate and ethanol on BNC production under agitated cultivation conditions remains limited (Kumar & Han, 2021). Agitated cultivation systems offer several advantages over conventional static fermentation, including improved oxygen transfer, enhanced nutrient distribution, and easier scale-up for industrial applications (Zhou et al., 2018). However, agitation also introduces hydrodynamic stress that may affect bacterial physiology, cellulose morphology, and overall productivity (Cáceres et al., 2025). As a result, optimization strategies developed for static cultivation are often not directly applicable to agitated systems. Understanding the interactions among environmental and nutritional factors under agitation therefore remains an important challenge for industrial BNC production (Dayou et al., 2026; Kamal et al., 2022). RSM has become a widely used statistical tool for optimizing complex bioprocesses because it enables simultaneous evaluation of multiple variables and their interactions while reducing the number of required experiments (Kanmani et al., 2013). Among RSM approaches, the Box–Behnken Design (BBD) provides an efficient framework for developing predictive models and identifying optimal cultivation conditions. This methodology has been successfully applied to optimize medium composition, fermentation parameters, and metabolite production in various microbial systems (Behravan & Hashemi, 2021; Sakr et al., 2026). Therefore, the aim of the present study was to investigate the combined effects of temperature, initial pH, ethanol concentration, and sodium lactate concentration

on BNC production by *K. xylinus* DSM 2325 under agitated cultivation conditions. A Box–Behnken experimental design coupled with Response Surface Methodology was employed to evaluate factor interactions, establish a predictive model, and identify optimal cultivation conditions. In addition, the physicochemical properties of the produced BNC were characterized using FTIR, XRD and SEM.

Materials and methods

Microorganism and Cultivation Conditions

The BNC-producing strain *K. xylinus* DSM 2325 was used throughout this study. The strain was maintained on Hestrin–Schramm (HS) agar medium and cultivated aerobically under laboratory conditions.

Batch cultivation experiments were conducted in 500 mL Erlenmeyer flasks containing 100 mL of production medium. The basal HS-medium consisted of glucose (20 g/L), yeast extract (5 g/L), and peptone (5 g/L). The initial pH of the medium was adjusted according to the experimental design using phosphate or phosphate–citrate buffer systems. Ethanol and sodium lactate were supplemented at concentrations specified by the Box–Behnken experimental design, with ethanol varying from 1 to 2% (v/v) and sodium lactate from 0 to 2% (w/v).

For inoculum preparation, *K. xylinus* DSM 2325 was pre-cultivated for 72 h under identical nutritional conditions. Optical density at 600 nm (OD_{600}) may yield inaccurate readings, as bacterial cellulose attenuates the incident light and thereby confounds turbidity-based estimation of cell density. Inoculum pre-cultivation was carried out under static conditions to prevent the shear-induced conversion of cellulose-producing (Cel^+) cells into non-producing (Cel^-) mutants prior to the main agitated experiments (Hur et al., 2020). Subsequently, 5 mL of the seed culture was transferred aseptically into each production flask. Cultivation was performed in an orbital shaking incubator at 120 rpm for 120 h. Depending on the experimental run, temperature and pH values were varied according to the optimization matrix. All experiments were conducted under aerobic conditions, and BNC production was evaluated as dry cellulose yield (g/L) after purification and drying procedures.

Experimental Design and Statistical Analysis

A four-factor Box–Behnken Design (BBD) was employed to evaluate the effects of: Temperature (°C); Initial pH; Ethanol concentration (% v/v); Sodium lactate concentration (% w/v) on BNC production. Response Surface Methodology was applied using Design-Expert 13.0.5.0 software to establish a second-order polynomial model describing the relationship between process variables and BNC yield. Prior to model fitting, the BNC yield response was subjected to a natural-logarithmic transformation, ln (Y + 0.0025), to stabilise variance across the wide range of experimental values. Consequently, the regression coefficients and the mean response value reported below (Table 3) refer to this transformed (ln-scale) response rather than to the untransformed yield in g/L.

The following second-order quadratic regression model was used to describe the relationship between the response and the investigated factors:

$$Y = \beta_0 + \sum_i \beta_i X_i + \sum_{ii} \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{ij} \beta_{ij} X_i X_j$$

where Y is the predicted value of the transformed response; X_i и X_j are the coded values of the independent factors. The coefficients for regression, linear, quadratic, and interaction are shown by the symbols β_0, β_i, β_{ii}, β_{ij}, respectively. Analysis of variance (ANOVA) was performed to determine statistical significance. Model adequacy was evaluated using R^2, adjusted R^2, predicted R^2, coefficient of variation (CV), Adeq Precision, and lack-of-fit statistics. All ANOVA computations were performed using Stat-Ease 360 V25.0.1 software.

Bacterial Nanocellulose Recovery and Yield Determination

Following cultivation, BNC was separated from the culture broth by filtration and subjected to an alkaline purification procedure to remove bacterial cells, residual nutrients, and other medium-derived impurities. The collected cellulose samples were treated with 0.1 M NaOH at 80 °C for 1 h under continuous heating. Subsequently, the purified material was thoroughly washed with distilled water until a neutral pH was reached.

Purified BNC samples were frozen and freeze-dried for 48 h at a condenser temperature of -60 °C under full vacuum to obtain a constant dry weight. The dry mass of BNC was determined gravimetrically using an analytical balance. BNC yield was expressed as grams of dry BNC per liter of culture medium (g/L).

The validation experiments were performed in triplicate, and the results are presented as mean ± standard deviation (SD). The coefficient of variation (CV) was calculated to evaluate the reproducibility of the cultivation process under different experimental conditions.

Physicochemical Characterization of Bacterial Nanocellulose

The chemical structure and purity of the obtained BNC samples were evaluated using Fourier-transform infrared spectroscopy coupled with attenuated total reflectance (FTIR-ATR). Spectra were recorded on Agilent Cary 630 FTIR spectrometer over the range of 4000–650 cm^{-1} at a spectral resolution of 4 cm^{-1}, with 32 scans averaged for both the background and the sample. Characteristic absorption bands corresponding to hydroxyl (O–H), aliphatic (C–H), and glycosidic (C–O–C) functional groups were identified and compared with previously reported cellulose spectra to confirm the successful production and purification of BNC. The resulting absorbance-versus-wavenumber spectra were processed in OriginPro 2015 V9.2.214 software, including baseline correction and smoothing to reduce high-frequency noise.

The crystalline structure of cellulose I and the crystallinity index of the BNC were evaluated by XRD using a Bruker D8 Advance diffractometer with Cu-Kα radiation (λ = 1.5406 Å). Diffractograms were recorded over a 2θ range of 5–60° at a generator current of 40.0 mA. The diffraction patterns were analyzed to identify characteristic cellulose I crystalline peaks and to evaluate the preservation of the native cellulose structure. The crystallinity index (CrI) was calculated using DIFFRAC.EVA V5.2 software from the integrated areas of crystalline and amorphous regions of the diffractograms and used as an indicator of structural order within the cellulose matrix. The XRD patterns were plotted in Origin Pro 2015 V9.2.214 without additional processing.

The surface morphology and fibrillar network structure of the BNC samples were examined by SEM. Micrographs were acquired on a JEOL JSM-7000 scanning electron microscope. The samples were mounted on aluminum stubs (12/25 mm diameter) using conductive double-sided carbon tape, and excess particles were removed with a gentle stream of dry air; no conductive coating was applied, as imaging was performed in low-vacuum mode. Topographic images were obtained with a low-vacuum secondary electron (LV-SE) detector at 5-10 kV (medium probe size, 4-8 frames averaged), and compositional contrast was recorded with a backscattered electron (BSE) detector at 10-15 kV, over a magnification range of ×100 to ×2,000. The morphology was evaluated in terms of the dimensions of the fibrillar network, pore structure, fiber aggregation, homogeneity, and the presence or absence of residual bacterial cells.

Results and their discussion

Effects of Cultivation Parameters on BNC Production

The effects of temperature, initial pH, ethanol concentration, and sodium lactate concentration on BNC production by *K. xylinus* DSM 2325 were investigated using a Box–Behnken experimental design consisting of 29 experimental runs. Considerable variation in BNC yield was observed among the tested conditions, indicating that cellulose production was influenced by the combined effects of the investigated factors rather than by a single parameter alone. The experimental BNC yield ranged from 0.001 to 0.446 g/L. The highest yield was obtained in run 19, where cultivation was performed at 30 °C, pH 6, 2% (v/v) ethanol, and without sodium lactate supplementation, resulting in a BNC yield of 0.446 g/L. Similarly, run 24 produced 0.407 g/L BNC under cultivation at 30 °C, pH 6, 1% (v/v) ethanol, and without sodium lactate. In contrast, the lowest yields were generally observed at elevated pH values (pH 8) and higher temperatures (38 °C), where cellulose production was almost completely suppressed (Table 1).

The distribution of BNC yields across all experimental runs is presented in Figure 1. The results demonstrate a clear tendency toward enhanced cellulose biosynthesis under moderately acidic conditions and intermediate cultivation temperatures. These observations suggest that *K. xylinus* DSM 2325 is highly sensitive to environmental conditions, particularly pH and temperature, which directly affect cellular metabolism and cellulose synthase activity.

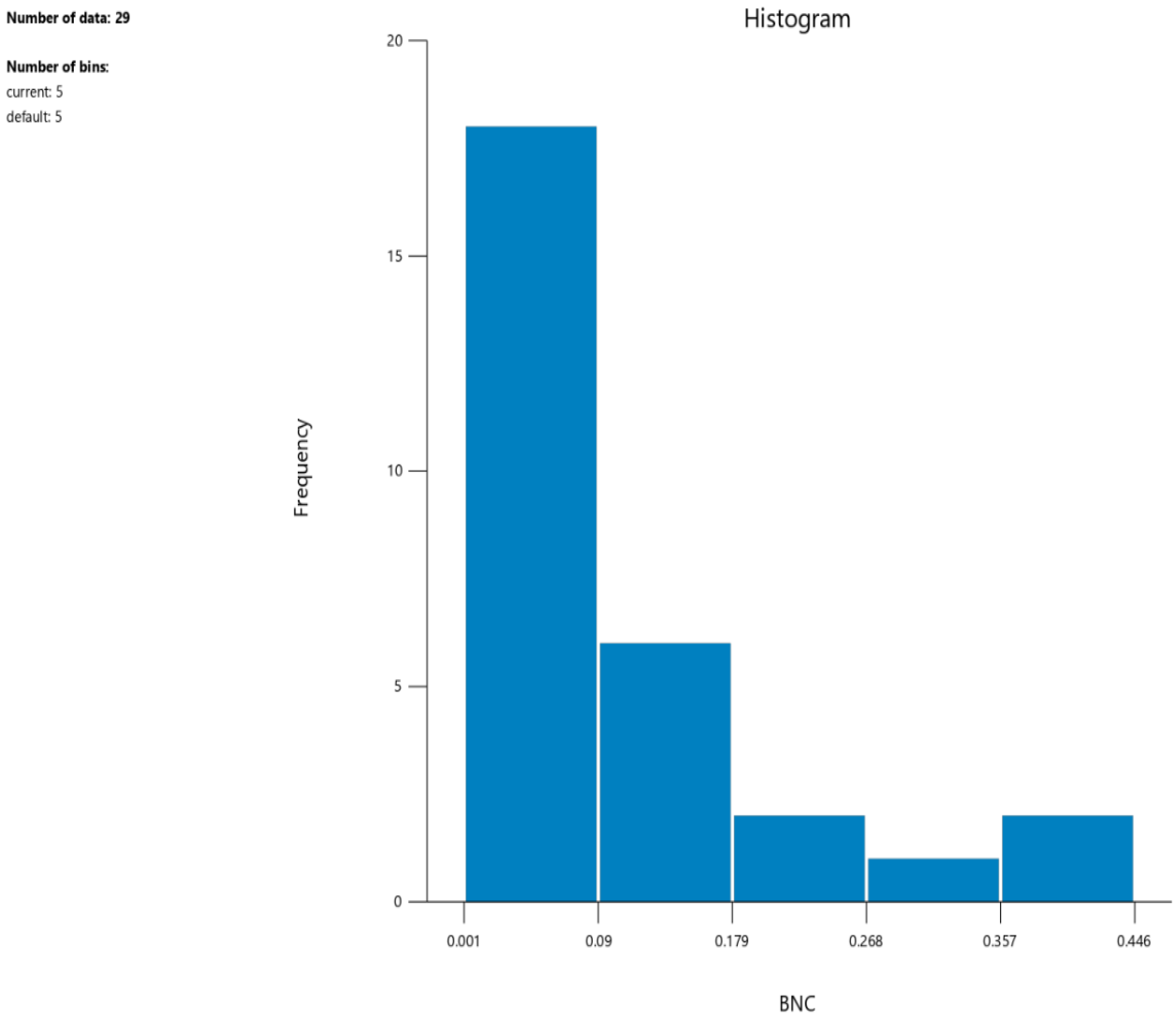
Although ethanol showed no statistically significant linear effect in the ANOVA model ($p = 0.7428$), the highest experimental BNC yields were observed in cultivation runs containing 1–2% (v/v) ethanol and no sodium lactate supplementation. This observation suggests that the influence of ethanol on cellulose biosynthesis may depend on interactions with other cultivation parameters rather than on an independent linear effect. Sodium lactate significantly influenced BNC production according to ANOVA analysis ($p = 0.0470$); however, increased

lactate concentrations did not consistently enhance cellulose yield. The highest BNC production was obtained in the absence of sodium lactate, suggesting that its effect was dependent on interactions with temperature and pH rather than direct stimulation of cellulose biosynthesis.

Table 1
Box–Behnken experimental design matrix and observed and predicted bacterial nanocellulose yields

№	Temperature, °C	pH	Ethanol, % (v/v)	Sodium lactate, % (w/v)	BNC, g/l	Predicted response value, g/L
1	30	6	1,5	1	0.029	0.092
2	30	4	2	1	0.156	0.093
3	30	8	1	1	0.001	0.004
4	22	4	1,5	1	0.137	0.203
5	22	8	1,5	1	0.003	0.000
6	22	6	2	1	0.130	0.080
7	30	6	1,5	1	0.065	0.092
8	38	6	2	1	0.003	0.006
9	30	4	1	1	0.225	0.091
10	30	6	2	2	0.294	0.054
11	30	6	1,5	1	0.081	0.092
12	30	6	1,5	1	0.076	0.092
13	30	6	1,5	1	0.120	0.092
14	38	6	1,5	0	0.001	0.012
15	38	4	1,5	1	0.002	0.000
16	30	4	1,5	2	0.006	0.021
17	30	8	1,5	2	0.001	0.006
18	22	6	1,5	2	0.011	0.037
19	30	6	2	0	0.446	0.191
20	22	6	1,5	0	0.112	0.136
21	30	8	2	1	0.001	0.007
22	38	6	1,5	2	0.001	0.002
23	30	4	1,5	0	0.235	0.376
24	30	6	1	0	0.407	0.156
25	38	6	1	1	0.003	0.005
26	30	6	1	2	0.108	0.043
27	30	8	1,5	0	0.002	0.004
28	38	8	1,5	1	0.008	0.000
29	22	6	1	1	0.082	0.065

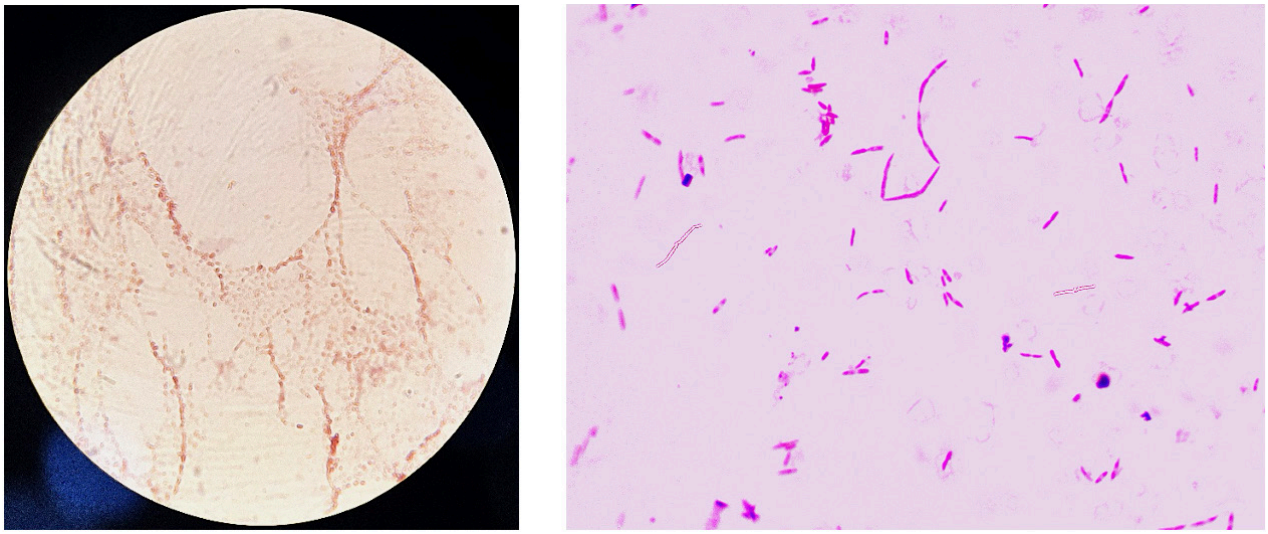
Figure 1
Yield distribution of bacterial nanocellulose obtained under different experimental conditions



Comparison of bacterial morphology under different cultivation conditions revealed notable differences in cell shape and organization. Cells cultivated under agitated conditions exhibited a more elongated morphology compared with those grown under static conditions. This observation may reflect physiological adaptation to hydrodynamic stress and altered oxygen transfer conditions. Furthermore, agitation influenced the physical appearance of the produced cellulose, resulting in dispersed cellulose aggregates rather than the continuous pellicles typically observed during static cultivation (Figure 2).

The results indicate that BNC production by *K. xylinus* DSM 2325 is strongly dependent on the interaction between physicochemical and nutritional factors. The substantial variation in yield observed among experimental runs justified the subsequent application of response surface methodology to identify statistically significant factors and determine the optimal cultivation conditions for maximizing BNC production.

Figure 2
Morphological comparison of K. xylinus DSM 2325 cultivated under static and agitated conditions



Development of the RSM Model

Analysis of variance (ANOVA) demonstrated that the developed quadratic model was statistically significant ($p = 0.0001$), confirming its suitability for describing the relationship between cultivation parameters and BNC production (Table 2). Among the investigated variables, temperature and pH exerted the strongest influence on cellulose biosynthesis, with both factors showing highly significant effects ($p < 0.01$). Sodium lactate also significantly affected BNC production ($p = 0.0470$), whereas ethanol concentration alone did not exhibit a statistically significant linear effect within the investigated range. Nevertheless, the highest experimental yields were achieved in the absence of sodium lactate, indicating that the statistically significant effect of this factor was not necessarily associated with increased cellulose production.

The quadratic model describing the nonlinear relationships between the response and the studied factors, with statistically significant values of $p = 0.0001$ and $F = 7.28$, is represented by the following equation:

$$\hat{Y} = Ц\,2.36 - 1.13A - 1.27B + 0.0972C - 0.6203D + 1.02AB + 0.0903BC + 0.7697BD - 1.37A^2 - 1.27B^2,$$

where $\hat{Y}$ is the predicted value of the transformed response, ln (BNC+0,0025); *A* is the temperature (°C); *B* is the initial pH; *C* is the ethanol concentration (v/v); *D* is the sodium lactate concentration (w/v).

Table 2
ANOVA for the quadratic response surface model

Source of variation	Sum of squares	Degrees of freedom, df	Mean square	F-value	p-value	Note
Model	67.02	9	7.45	7.28	0.0001	Statistically significant
A-Temperature	15.28	1	15.28	14.93	0.0010	Statistically significant
B-pH	19.32	1	19.32	18.89	0.0003	Statistically significant
C-Ethanol	0.1134	1	0.1134	0.1108	0.7428	Not statistically significant
D-Sodium lactate	4.62	1	4.62	4.51	0.0470	Statistically significant
AB	4.16	1	4.16	4.07	0.0580	Not statistically significant
BC	0.0327	1	0.0327	0.0319	0.8601	Not statistically significant
BD	2.37	1	2.37	2.32	0.1445	Not statistically significant

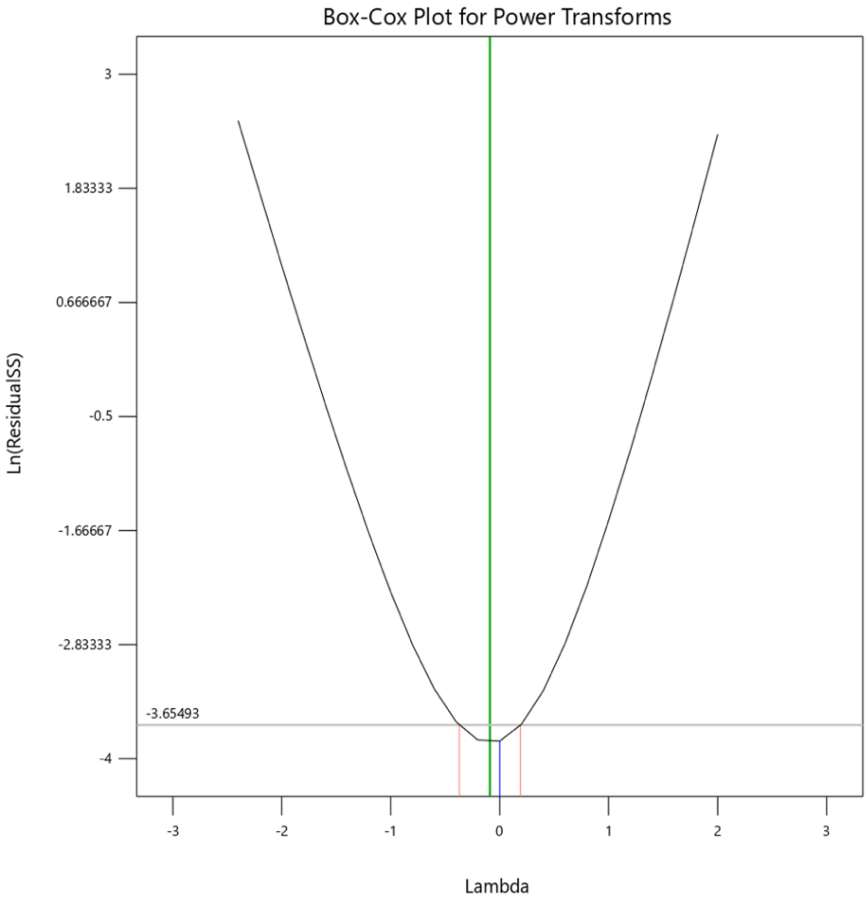
Continuation of the table

Source of variation	Sum of squares	Degrees of freedom, df	Mean square	F-value	p-value	Note
A^2	12.90	1	12.90	12.61	0.0021	Statistically significant
B^2	11.12	1	11.12	10.87	0.0038	Statistically significant
Residual error	19.44	19	1.02	—	—	—
Lack of fit	18.44	15	1.23	4.94	0.0670	Not statistically significant
Pure error	0.9963	4	0.2491	—	—	—
Adjusted total	86.45	28	—	—	—	—

The quadratic model exhibited acceptable goodness-of-fit, with an R^2 value of 0.7752, demonstrating that 77.5% of the observed variation in BNC production could be explained by the selected process variables. The adjusted R^2 (0.6687) indicated satisfactory agreement between the model and experimental data, whereas the predicted R^2 (0.2900) suggested limited predictive accuracy. Nevertheless, an adequate precision value of 9.097, which exceeded the recommended threshold of 4, confirmed that the model provided an adequate signal for navigating the design space.

Prior to model interpretation, a Box–Cox transformation analysis was performed to evaluate the necessity of response transformation. The resulting Box–Cox plot indicated that the selected transformation adequately stabilized variance and improved model performance (Figure 3).

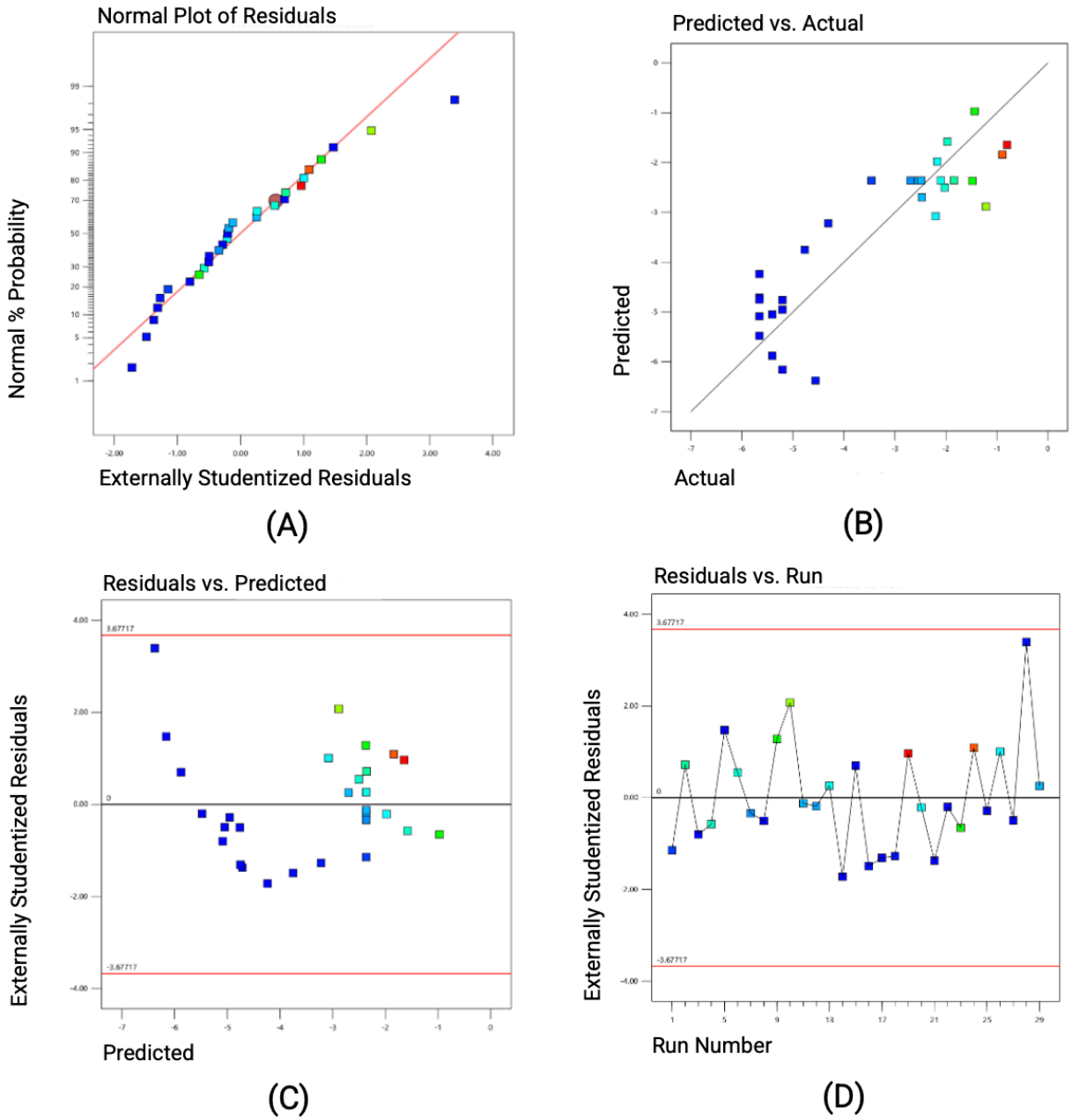
Figure 3
Box–Cox plot for power transformation selection of bacterial nanocellulose yield response



Model adequacy was further assessed using diagnostic plots (**Figure 4**). The normal probability plot of residuals demonstrated an approximately linear distribution, indicating normality of residuals. The predicted versus actual values plot showed reasonable agreement between experimental observations and model predictions. Additionally, residuals were randomly distributed around zero without obvious patterns, suggesting homoscedasticity and independence of experimental errors.

Figure 4

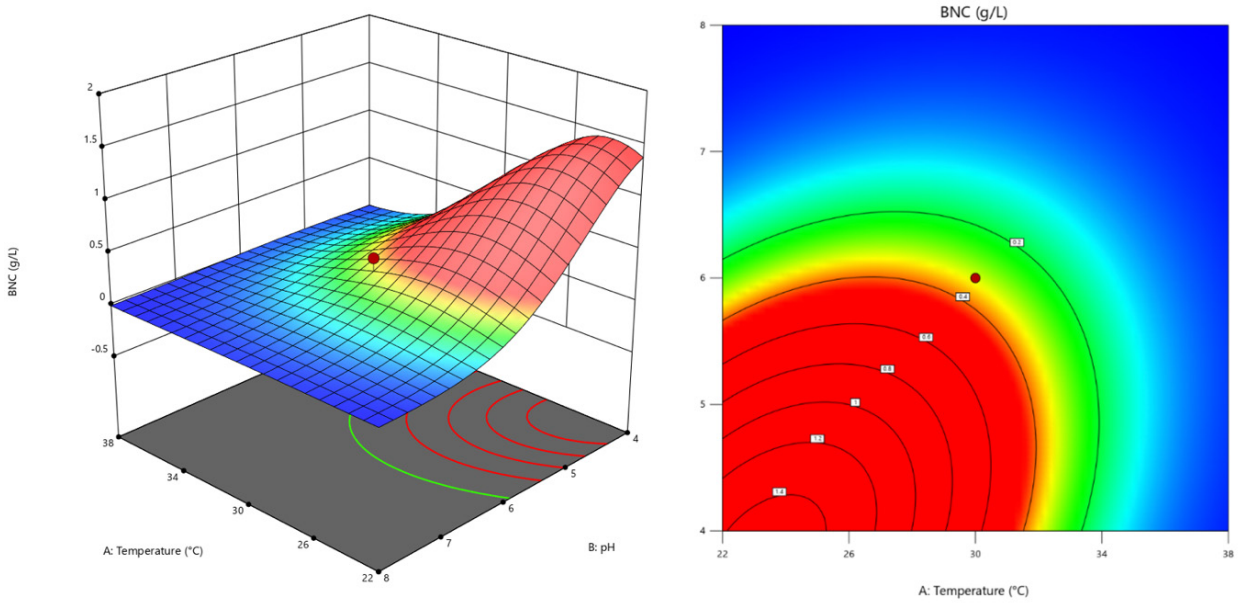
Diagnostic plots of the developed quadratic model: (A) normal probability plot of externally studentized residuals; (B) predicted versus actual values; (C) residuals versus predicted values; and (D) residuals versus run number



Response surface analysis revealed a strong interaction between pH and temperature. Maximum predicted BNC production was observed at moderately acidic pH values and intermediate cultivation temperatures. The response surface plot clearly demonstrated the existence of an optimum region rather than a simple linear relationship between factors and cellulose yield (Figure 5).

Figure 5

Response surface and contour plots illustrating the interactive effects of temperature and pH on bacterial nanocellulose production by K. xylinus DSM 2325 at fixed ethanol (2%, v/v) and sodium lactate (0%, w/v) concentrations



Optimization and Experimental Validation

Based on numerical optimization, the RSM model predicted optimal cultivation conditions of 24.4 °C, pH 4.57, 2% (v/v) ethanol, and 0.04% (w/v) sodium lactate, with a predicted BNC yield of 0.767 g/L.

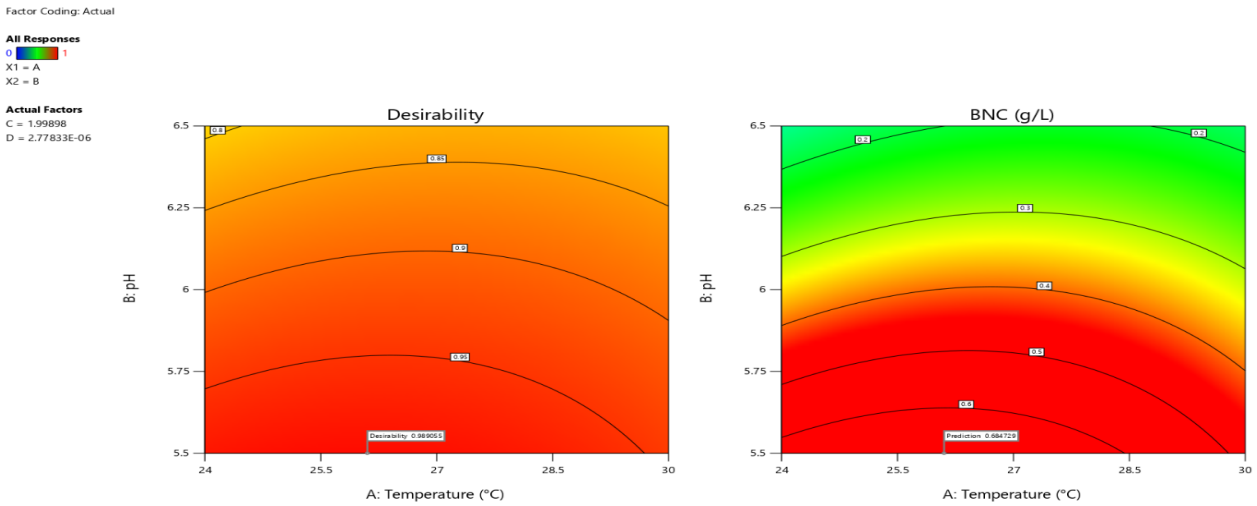
Experimental validation, however, revealed that the predicted optimum did not produce the highest observed cellulose yield. Instead, the standard cultivation medium generated a higher average BNC yield (0.2203 g/L) than the optimized conditions (0.1737 g/L), while also exhibiting considerably lower variability (Table 3).

The coefficient of variation increased from 12.8% under standard conditions to 38.6% under optimized conditions, indicating reduced process reproducibility. These findings emphasize the importance of experimental validation and suggest that the actual optimum may lie within a narrower region around pH 5.5–6.5 and temperatures between 24 and 30 °C. Using this region and the RSM model, the Design-Expert 13 software identified, as the most optimal solution, a combination of factors corresponding to a temperature of 26.0 °C, an initial pH of 5.5, an ethanol concentration of 2% (v/v), and the absence of sodium lactate. Under these conditions, the model predicted a bacterial cellulose yield of 0.685 g/L with a desirability function of 0.989, which fully satisfied the specified optimization criteria within the constrained factor space (Figure 6).

Table 3
Experimental validation of predicted optimum conditions

Experiment series	Batch conditions (with stirring at 120 rpm)	Individual values, g/L	Mean yield, g/L	SD, g/L	CV, %
Standard medium (ST)	Temperature 30 °C. pH 5.7, ethanol 0% (v/v), sodium lactate 0% (w/v)	1) 0.2530 2) 0.2050 3) 0.2030	0.2203	0.0283	12.8
Predicted optimized conditions (OPT)	Temperature 24.4 °C, pH 4.57, ethanol 2% (v/v), sodium lactate 0.04% (w/v)	1) 0.1120 2) 0.2450 3) 0.1640	0.1737	0.0670	38.6

Figure 6
Plot of desirability and bacterial cellulose yield following narrowing of the optimization region

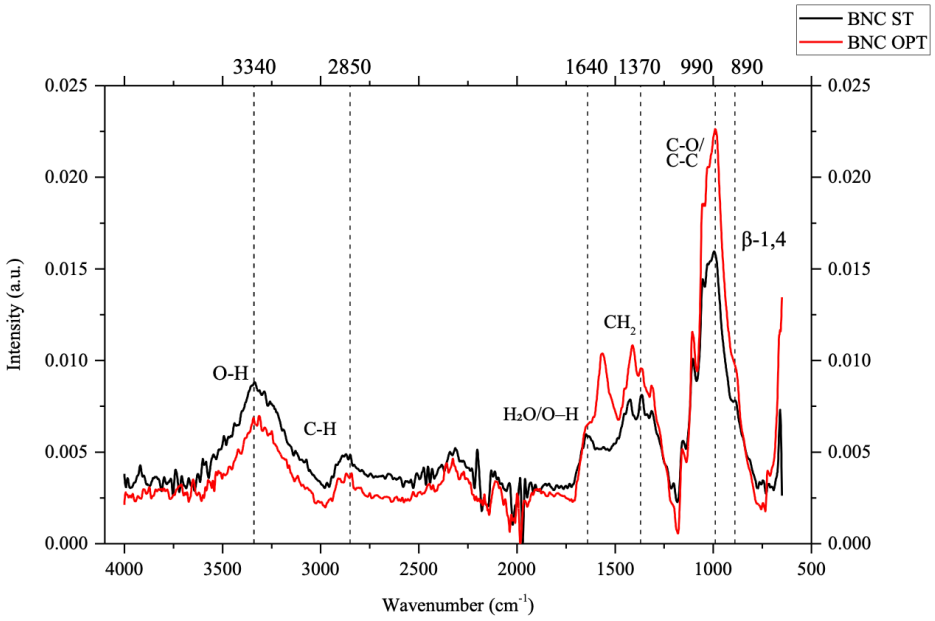


FTIR Characterization

The FTIR spectra of BNC samples produced under standard (BNC ST) and optimized cultivation conditions (BNC OPT) are presented in Figure 7. The spectra included the following main absorption bands: a broad region at 3330–3350 cm^{-1} corresponds to O–H stretching vibrations of hydroxyl groups and hydrogen bonds; the band near 2890–2920 cm^{-1} corresponds to C–H stretching vibrations; the band near 1620–1640 cm^{-1} is associated with the bending vibrations of absorbed water; the bands near 1430–1450 cm^{-1}, 1370–1335 cm^{-1}, and 1160 cm^{-1} are associated, respectively, with CH_2 bending vibrations, C–H/O–H bending vibrations, and C–O–C stretching vibrations of the cellulose backbone.

Peaks in the range of 1050–1030 cm^{-1} indicate C–O stretching vibrations, while a weak band in the range of 896–900 cm^{-1} confirms the presence of β-1,4-glycosidic bonds of cellulose. In addition, low-wavenumber regions near 750 and 710 cm^{-1} were noted, associated with cellulose I allomorphs, where 750 cm^{-1} is attributed to triclinic cellulose Iα and 710 cm^{-1} to monoclinic cellulose Iβ. The absence of pronounced bands in the 1700–1740 cm^{-1} region indicates the absence of residual carbonyl compounds, organic acids, and nutrient-medium impurities. Thus, FTIR analysis confirmed that the obtained samples correspond to the chemical structure of bacterial nanocellulose. Furthermore, compared with the BNC ST sample, the BNC OPT sample showed more intense signals in the fingerprint region (1500–650 cm^{-1}), and especially near 990 cm^{-1}, indicating more pronounced polysaccharide vibrations.

Figure 7
ATR–FTIR spectra of bacterial nanocellulose samples



XRD Analysis

The crystalline structure of BNC was examined using X-ray diffraction analysis. The diffraction patterns obtained for both samples are shown in **Figure 8.** Characteristic diffraction peaks corresponding to cellulose I were observed at approximately 14.5°, 16.5°, 18°, and 22.7° (2θ), confirming preservation of the native crystalline cellulose structure. No additional diffraction peaks associated with contaminating phases were detected, indicating effective purification of the cellulose material.

Quantitative analysis of the diffractograms yielded crystallinity index (CrI) values of 40.6% for the BNC synthesized under standard conditions (BNC ST) and 35.7% for the BNC synthesized under the RSM-predicted optimal conditions (BNC OPT). Thus, although both samples retained the cellulose I structure, cultivation under the optimized condition which contained 2% (v/v) ethanol produced cellulose with a lower degree of crystalline order. This reduction is consistent with reports that ethanol accelerates β-1,4-glucan chain assembly and, together with medium acidification by gluconic acid, can decrease the ordered packing of cellulose microfibrils, thereby increasing the amorphous fraction (Abraham et al., 2025; Fatima et al., 2023). These CrI values are also markedly lower than the 70–90% typically reported for bacterial nanocellulose, which is consistent with the generally low and poorly organized cellulose production observed under agitation in the present study.

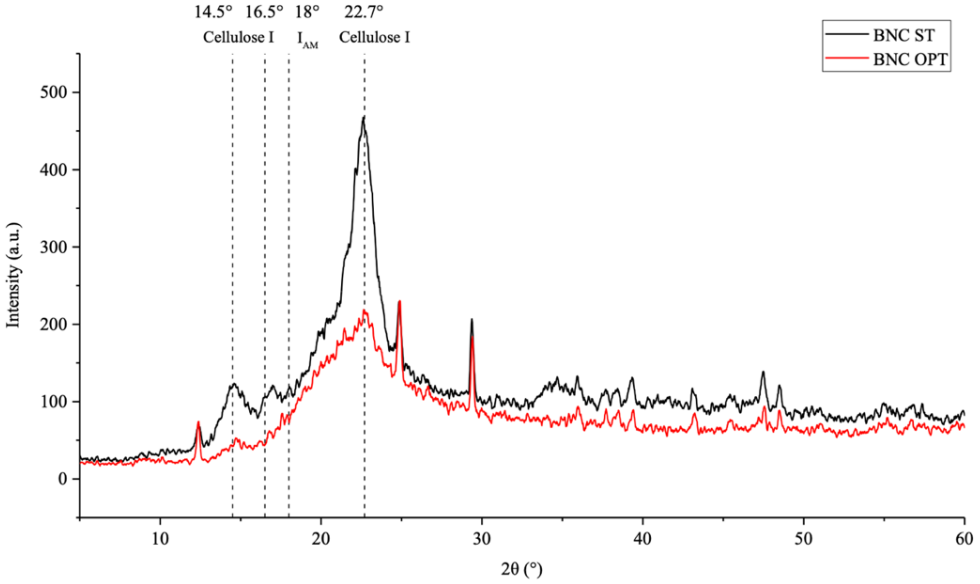
The observed crystalline structure is consistent with previously reported BNC and contributes to its desirable mechanical strength, dimensional stability, and potential applicability in advanced biomaterials.

SEM Characterization

The morphology of freeze-dried BNC synthesized in the standard (ST) and optimized media (OPT) was examined by SEM at identical magnification (×3000). Representative micrographs are presented in Figure 9.

Figure 9a (BNC ST) reveals a compact and highly aggregated morphology. The cellulose matrix appears as dense, coalesced layers with pronounced folds, ridges, and sheet-like structures. Individual nanofibrils cannot be clearly distinguished because they are fused into a continuous film-like network. The interfibrillar porosity is relatively low, indicating extensive fibril aggregation during biosynthesis and subsequent freeze-drying. Several elongated cavities and cracks are also visible, which may have originated from dehydration-induced shrinkage and partial delamination of the cellulose layers. Such compact morphology is commonly associated with reduced oxygen transfer within the cellulose matrix and with the formation of thicker cellulose bundles under cultivation conditions that favor rapid fibril aggregation.

Figure 8
XRD diffractograms of bacterial nanocellulose produced under standard and optimized cultivation conditions



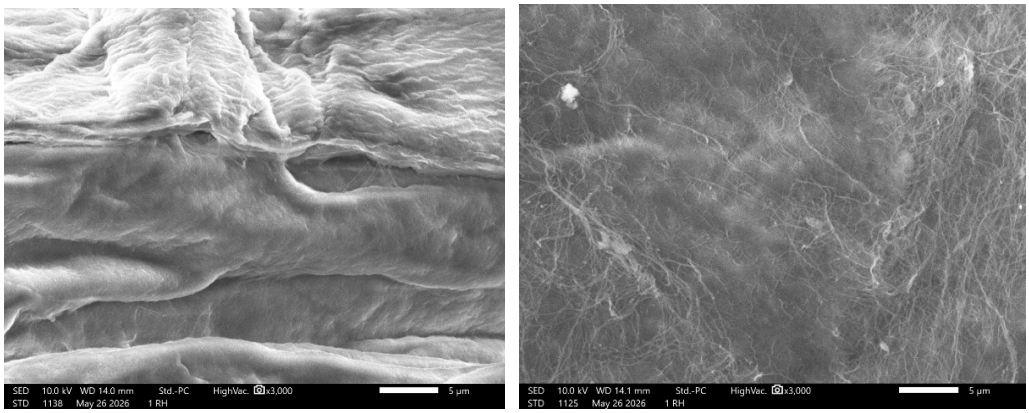
In contrast, Figure 9b (BNC OPT) exhibits a markedly different microstructure characterized by a well-developed three-dimensional nanofibrillar network. Individual ribbon-like cellulose fibrils are clearly visible and form an interconnected porous scaffold. The fibrils appear thinner, more uniformly distributed, and less aggregated than those observed in the standard sample. Numerous interfibrillar voids and channels are present throughout the structure, indicating increased porosity and a greater specific surface area. This morphology is characteristic of high-quality bacterial nanocellulose and is generally considered advantageous for applications requiring efficient mass transfer, water absorption, cell attachment, or loading of functional compounds.

The observed differences between Figures 9a and 9b suggest that cultivation conditions strongly influenced the supramolecular organization of cellulose fibrils. Under the optimized conditions, the lower cultivation temperature (24.4 °C), moderately acidic pH (4.57), supplementation with ethanol (2% v/v), and low sodium lactate concentration (0.04% w/v) likely altered bacterial metabolism and cellulose assembly dynamics. Slower metabolic activity may have promoted a more controlled extrusion and organization of glucan chains, resulting in the formation of thinner and better separated nanofibrils. At the same time, ethanol could serve as an auxiliary energy source, reducing carbon loss through competing metabolic pathways and supporting more uniform cellulose biosynthesis.

The SEM observations are also consistent with the physicochemical characterization results. Although the optimized sample exhibited a lower crystallinity index than the standard sample according to XRD analysis (35.7% vs. 40.6%), it demonstrated a more open and homogeneous fibrillar architecture. This finding indicates that increased fibril individualization and network development do not necessarily correspond to higher crystallinity. Instead, the optimized cultivation conditions promoted the formation of a finer nanofibrillar structure with improved morphological uniformity while partially reducing crystalline ordering.

Overall, SEM analysis confirmed that cultivation parameters significantly affect the microstructure of bacterial nanocellulose produced by *K. xylinus* DSM 2325. The standard medium generated a dense, compact cellulose matrix, whereas the optimized medium produced a more porous and interconnected nanofibrillar network, demonstrating that process optimization influences not only cellulose yield but also the structural characteristics of the resulting biomaterial.

Figure 9
SEM micrographs (× 3000 magnification) of freeze-dried bacterial nanocellulose produced by K. xylinus DSM 2325: (a) BNC synthesized under standard cultivation conditions (BNC ST); (b) BNC synthesized under optimized cultivation conditions (BNC OPT). Scale bar = 5 µm



The present study demonstrated that BNC production by *K. xylinus* DSM 2325 under agitated cultivation conditions was strongly influenced by the interaction of physicochemical and nutritional factors. Among the investigated variables, temperature and pH exerted the greatest influence on cellulose biosynthesis, which is consistent with previous reports indicating that these parameters directly affect bacterial growth, cellulose synthase activity, and carbon metabolism (Chen et al., 2019; Li et al., 2022). The highest experimental BNC yields were observed at 30 °C and pH 6, confirming that moderately acidic conditions favor cellulose formation.

Although ethanol did not exhibit a statistically significant linear effect in the ANOVA model, the highest cellulose yields were obtained in cultivation runs containing 1–2% ethanol. Similar observations were reported by Ryngajłło, Jacek, et al. (2019), who demonstrated that ethanol supplementation modifies the transcriptional profile of *Komagataeibacter* and can enhance cellulose biosynthesis depending on cultivation conditions. Ethanol may reduce carbon loss through gluconic acid formation and improve the availability of precursors for cellulose synthesis. However, the magnitude of this effect appears to be strain-dependent and strongly influenced by environmental conditions.

Sodium lactate significantly affected BNC production according to the statistical model, yet the highest experimental yields were obtained in its absence. This discrepancy suggests that lactate influenced cellulose production indirectly through interactions with temperature and pH rather than through direct stimulation of cellulose biosynthesis. Similar complexity has been reported for other metabolic additives, where statistically significant model effects do not necessarily translate into improved product formation under all cultivation conditions.

The developed RSM model explained approximately 77.5% of the variability in BNC production. Although the model was statistically significant, its predictive performance was moderate, as reflected by the relatively low predicted R^2 value (0.2900). Furthermore, experimental validation did not confirm the predicted optimum. The optimized conditions generated a lower average BNC yield than the standard medium. Similar discrepancies between predicted and experimental optima have been reported in microbial bioprocess optimization studies and are often attributed to biological variability, nonlinear metabolic responses, and limitations of second-order polynomial models (Behravan & Hashemi, 2021; Kanmani et al., 2013)

A further consideration is the generally very low absolute BNC yields obtained in this work (maximum 0.446 g/L), which are well below the values commonly reported for static cultivation of Komagataeibacter (typically several g/L). This is characteristic of agitated cultivation of *K. xylinus*, in which hydrodynamic shear stress promotes the irreversible conversion of cellulose-producing (Cel^+) cells into non-producing (Cel^-) mutants through insertion of an IS element into the bcsA gene (Hur et al., 2020). Such stochastic loss of cellulose-producing capacity is consistent with the elongated cell morphology observed under agitation and with a shift of carbon flux towards soluble polysaccharides such as acetan rather than crystalline cellulose (Zhang et al., 2022). This mechanism offers a biological explanation both

for the predominance of near-zero yields across the design and for the poor reproducibility (high coefficient of variation) that limited the predictive performance of the RSM model.

FTIR analysis confirmed the presence of characteristic cellulose functional groups, while XRD analysis demonstrated the preservation of the cellulose I crystalline structure. The diffraction peaks observed near 14.5°, 16.5°, and 22.7° are consistent with previous reports for bacterial nanocellulose produced by *Komagataeibacter* species. These results indicate that neither ethanol nor sodium lactate supplementation altered the fundamental chemical structure of the produced cellulose. However, the crystallinity index decreased from 40.6% to 35.7%, indicating that the ethanol-containing optimized condition reduced the degree of crystalline order while preserving the cellulose I polymorph. Ethanol at a concentration of 2% (v/v) affected not only the rate of bacterial cellulose biosynthesis by *K. xylinus* DSM 2325 but also the spatial organization of cellulose fibrils, as evidenced by SEM images and a reduction in crystallinity.

The findings indicate that temperature and pH are the primary determinants of BNC production by *K. xylinus* DSM 2325 under agitation, whereas the effects of ethanol and sodium lactate depend on interactions with other cultivation parameters. The study also highlights the necessity of experimental verification when applying statistical optimization methods to biological production systems.

Conclusion

This study systematically evaluated the combined effects of temperature, initial pH, ethanol concentration, and sodium lactate supplementation on BNC production by *K. xylinus* DSM 2325 under agitated cultivation conditions using Response Surface Methodology (RSM) and a Box–Behnken experimental design. The results demonstrated that BNC biosynthesis is governed by complex interactions among environmental and nutritional factors, with temperature and pH emerging as the most influential variables affecting cellulose production. Statistical analysis confirmed the significance of the developed quadratic model, while response surface analysis revealed the presence of a distinct optimum region for cellulose biosynthesis under agitation. Among all experimental conditions, the highest BNC yield (0.446 g/L) was obtained at 30 °C, pH 6, 2% (v/v) ethanol, and in the absence of sodium lactate supplementation. Although sodium lactate was identified as a statistically significant factor in the ANOVA model, its influence on cellulose production was inconsistent, as the highest experimental yields were achieved without lactate addition. Similarly, ethanol did not exhibit a significant linear effect but appeared to contribute to enhanced cellulose production under specific cultivation conditions, highlighting the importance of factor interactions rather than isolated parameter effects. The discrepancy between the RSM-predicted optimum and the experimentally validated results emphasizes the limitations of purely model-based optimization approaches in biological systems. These findings demonstrate that statistical optimization should always be complemented by experimental verification, particularly when working with complex microbial metabolic processes. Furthermore, FTIR and XRD analyses confirmed the successful synthesis of chemically pure bacterial nanocellulose possessing the characteristic functional groups and crystalline cellulose I structure, whereas SEM analysis revealed changes in the morphological structure of the cellulose. The preservation of these structural features indicates that the investigated cultivation parameters affected cellulose yield without substantially altering the fundamental chemical composition or crystallinity of the produced material. Overall, this work contributes to a deeper understanding of the factors regulating bacterial nanocellulose production by *K. xylinus* DSM 2325 under agitated cultivation conditions. The obtained results provide valuable information for future medium optimization studies, bioprocess development, and industrial scale-up of bacterial nanocellulose production. Future research should focus on improving model predictability, investigating additional metabolic stimulators and carbon sources, and evaluating process performance in pilot-scale bioreactor systems to further enhance BNC productivity and economic feasibility.

Funding Statement

This work was supported by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under Grant No. BR27199103 titled “Development of Eco-Friendly Packaging Materials from Recyclable Paper and Biomass Waste with Adaptive and Enhanced Protective Properties”.

Acknowledgements and conflict of interest

The authors thank all collaborators and institutions involved in this study for their support. The authors declare no conflicts of interest.

References

Abraham, A., Lee, S., & Sang, B. I. (2025). Modulation of bacterial nanocellulose crystallinity through carbon source-dependent metabolic pathways. *Cellulose*, *32*(17), 9901–9919. https://doi.org/10.1007/s10570-025-06797-0

Almeida, T., Silvestre, A. J. D., Vilela, C., & Freire, C. S. R. (2021). Bacterial nanocellulose toward green cosmetics: Recent progresses and challenges. *International Journal of Molecular Sciences*, *22*(6), 2836. https://doi.org/10.3390/ijms22062836

Barboráková, Z., Tančinová, D., Medo, J., Jakabová, S., Häubl, G., Jaunecker, G., Mašková, Z., & Labuda, R. (2025). Strain-dependent variability in ochratoxin A production by Aspergillus spp. under different in vitro cultivation conditions. *Microorganisms*, *13*(12), 2850. https://doi.org/10.3390/microorganisms13122850

Barja, F. (2021). Bacterial nanocellulose production and biomedical applications. *Journal of Biomedical Research*, *35*(4), 310–317. https://doi.org/10.7555/JBR.35.20210036

Behravan, A., & Hashemi, A. (2021). RSM-based model to predict optimum fermentation conditions for soluble expression of the antibody fragment derived from 4D5MOC-B humanized Mab in SHuffle™ T7 Escherichia coli. *Iranian Journal of Pharmaceutical Research*, *20*(1), 254–266. https://doi.org/10.22037/ijpr.2020.114377.14822

Cáceres, R., Oyarzún, P., Vargas, J. P., Cuevas, F., Torres, K., Elgueta, E., Martínez, I., & Núñez, D. (2025). Sustainable production of bacterial cellulose in a rotary disk bioreactor: Grape pomace as a replacement for the carbon source. *Fermentation*, *11*, 441. https://doi.org/10.3390/fermentation11080441

Chen, G., Chen, L., Wang, W., Chen, S., Wang, H., Wei, Y., & Hong, F. F. (2019). Improved bacterial nanocellulose production from glucose without the loss of quality by evaluating thirteen agitator configurations at low speed. *Microbial Biotechnology*, *12*(6), 1387–1402. https://doi.org/10.1111/1751-7915.13477

Dáger-López, D., Chenché, Ó., Ricaurte-Párraga, R., Núñez-Rodríguez, P., Bajaña, J. M., & Fiallos-Cárdenas, M. (2024). Advances in the production of sustainable bacterial nanocellulose from banana leaves. *Polymers*, *16*(8), 1157. https://doi.org/10.3390/polym16081157

Dayou, H., Li, J., Wang, Y., Gu, S., Wang, X., & Wang, X. (2026). Research on agricultural development issues based on comprehensive optimization strategy. *Scientific Reports*, *16*(1), 12505. https://doi.org/10.1038/s41598-026-39307-8

El-Naggar, N. E. A., Elyamny, S., Shitifa, A. G., & El-Sawah, A. A. (2025). Biofabrication, statistical optimization, and characterization of collagen nanoparticles synthesized via Streptomyces cell-free system for cancer therapy. *Scientific Reports*, *15*, 43835. https://doi.org/10.1038/s41598-025-29189-7

Fatima, A., Ortiz-Albo, P., Neves, L. A., Nascimento, F. X., & Crespo, J. G. (2023). Biosynthesis and characterization of bacterial cellulose membranes presenting relevant characteristics for air/gas filtration. *Journal of Membrane Science*, *674*, 121509. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.121509

Hu, X., Zhang, Y., Shao, X., Yang, X., Zhang, Z., Yin, X., & Xu, Y. (2025). Bacterial cellulose production under agitated culture conditions using tobacco waste extract by a strain of Komagataeibacter sp. isolated from rotten mango. *Biotechnology Letters*, *47*, 111. https://doi.org/10.1007/s10529-025-03652-x

Hur, D. H., Rhee, H. S., Lee, J. H., Shim, W. Y., Kim, T. Y., Lee, S. Y., Park, J. H., & Jeong, K. J. (2020). Enhanced production of cellulose in Komagataeibacter xylinus by preventing insertion of IS element into cellulose synthesis gene. *Biochemical Engineering Journal*, *156*, 107527. https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107527

Jang, W. D., Kim, T. Y., Kim, H. U., Shim, W. Y., Ryu, J. Y., Park, J. H., & Lee, S. Y. (2019). Genomic and metabolic analysis of Komagataeibacter xylinus DSM 2325 producing bacterial cellulose nanofiber. *Biotechnology and Bioengineering*, *116*(12), 3372–3381. https://doi.org/10.1002/bit.27150

Kamal, T., Ul-Islam, M., Fatima, A., Ullah, M. W., & Manan, S. (2022). Cost-effective synthesis of bacterial cellulose and its applications in the food and environmental sectors. *Gels*, *8*(9), 552. https://doi.org/10.3390/gels8090552

Kanmani, P., Karthik, S., Aravind, J., & Kumaresan, K. (2013). The use of response surface methodology as a statistical tool for media optimization in lipase production from the dairy effluent isolate Fusarium solani. *ISRN Biotechnology*, *2013*, 528708. https://doi.org/10.5402/2013/528708

Kumar, A., & Han, S. S. (2021). Efficacy of bacterial nanocellulose in hard tissue regeneration: A review. *Materials*, *14*(17), 4777. https://doi.org/10.3390/ma14174777

Lasagni, F., Cassanelli, S., & Gullo, M. (2024). How carbon sources drive cellulose synthesis in two Komagataeibacter xylinus strains. *Scientific Reports*, *14*, 20494. https://doi.org/10.1038/s41598-024-71648-0

Li, G., Wang, L., Deng, Y., & Wei, Q. (2022). Research progress of the biosynthetic strains and pathways of bacterial cellulose. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, *49*(1), kuab071. https://doi.org/10.1093/jimb/kuab071

Mongkolchat, P., Malherbe, F., Palombo, E., & Butardo, V., Jr. (2026). Bacterial cellulose production by a novel Levilactobacillus brevis isolate using response surface-optimised agro-industrial substrates. *Foods*, *15*(2), 394. https://doi.org/10.3390/foods15020394

Montenegro-Silva, P., Ellis, T., Dourado, F., Gama, M., & Domingues, L. (2024). Enhanced bacterial cellulose production in Komagataeibacter sucrofermentans: Impact of different PQQ-dependent dehydrogenase knockouts and ethanol supplementation. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, *17*(1), 35. https://doi.org/10.1186/s13068-024-02482-9

Pagliardini, J., Hubmann, G., Alfenore, S., Nevoigt, E., Bideaux, C., & Guillouet, S. E. (2013). The metabolic costs of improving ethanol yield by reducing glycerol formation capacity under anaerobic conditions in Saccharomyces cerevisiae. *Microbial Cell Factories*, *12*, 29. https://doi.org/10.1186/1475-2859-12-29

Phatchayawat, P. P., Yodmuang, S., & Phisalaphong, M. (2025). In vitro biodegradation and biocompatibility of bacterial nanocellulose-chitosan-based hydrogel scaffolds for bone tissue engineering. *ACS Omega*, *10*(38), 43669–43686. https://doi.org/10.1021/acsomega.5c03747

R, R., Philip, E., Thomas, D., Madhavan, A., Sindhu, R., Binod, P., Varjani, S., Awasthi, M. K., & Pandey, A. (2021). Bacterial nanocellulose: Engineering, production, and applications. *Bioengineered*, *12*(2), 11463–11483. https://doi.org/10.1080/21655979.2021.2009753

Rackov, N., Janßen, N., Akkache, A., Drotleff, B., Beyer, B., Scoppola, E., Vrana, N. E., Hengge, R., Bidan, C. M., & Hathroubi, S. (2025). Bacterial cellulose: Enhancing productivity and material properties through repeated harvest. *Biofilm*, *9*, 100276. https://doi.org/10.1016/j.bioflm.2025.100276

Revin, V., Liyaskina, E., Nazarkina, M., Bogatyreva, A., & Shchankin, M. (2018). Cost-effective production of bacterial cellulose using acidic food industry by-products. *Brazilian Journal of Microbiology*, *49*(Suppl. 1), 151–159. https://doi.org/10.1016/j.bjm.2017.12.012

Revin, V. V., Dolganov, A. V., Liyaskina, E. V., Nazarova, N. B., Balandina, A. V., Devyataeva, A. A., & Revin, V. D. (2021). Characterizing bacterial cellulose produced by Komagataeibacter sucrofermentans H-110 on molasses medium and obtaining a biocomposite based on it for the adsorption of fluoride. *Polymers*, *13*(9), 1422. https://doi.org/10.3390/polym13091422

Ryngajłło, M., Jacek, P., Cielecka, I., Kalinowska, H., & Bielecki, S. (2019). Effect of ethanol supplementation on the transcriptional landscape of bionanocellulose producer Komagataeibacter xylinus E25. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *103*, 6673–6688. https://doi.org/10.1007/s00253-019-09904-x

Ryngajłło, M., Jędrzejczak-Krzepkowska, M., Kubiak, K., Ludwicka, K., & Bielecki, S. (2020). Towards control of cellulose biosynthesis by Komagataeibacter using systems-level and strain engineering strategies: Current progress and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *104*(15), 6565–6585. https://doi.org/10.1007/s00253-020-10671-3

Ryngajłło, M., Kubiak, K., Jędrzejczak-Krzepkowska, M., Jacek, P., & Bielecki, S. (2019). Comparative genomics of the Komagataeibacter strains—Efficient bionanocellulose producers. *MicrobiologyOpen*, *8*(5), e00731. https://doi.org/10.1002/mbo3.731

Sakr, E. A. E., Hassan, M. S., El-Sedik, M., Rekaby, M. M., & El-Sayed, G. M. (2026). Residual-hybrid dynamic response-surface/machine-learning framework for predicting malachite green removal and biodegradation by a bacterial consortium. *Journal of Biological Engineering*, *20*, 64. https://doi.org/10.1186/s13036-026-00663-8

Sayah, I., Chakroun, I., Gervasi, C., Barreca, D., Lanteri, G., Iannazzo, D., Celesti, C., Santini, A., Achour, S., & Gervasi, T. (2025). Bioconversion of date waste into bacterial nanocellulose by a new isolate Komagataeibacter sp. IS22 and its use as carrier support for probiotics delivery. *Foods*, *14*(16), 2853. https://doi.org/10.3390/foods14162853

Skaradziński, G., Janek, T., Śliwka, P., Skaradzińska, A., & Łaba, W. (2025). Statistical optimization of bacterial cellulose production and its application for bacteriophage immobilization. *International Journal of Molecular Sciences*, *26*(13), 6059. https://doi.org/10.3390/ijms26136059

Sun, S., Ding, Y., Liu, M., Xian, M., & Zhao, G. (2020). Comparison of glucose, acetate and ethanol as carbon resource for production of poly(3-hydroxybutyrate) and other acetyl-CoA derivatives. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, *8*, 833. https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00833

Zhang, H., Chen, C., Yang, J., Sun, B., Lin, J., & Sun, D. (2022). Effect of culture conditions on cellulose production by a Komagataeibacter xylinus strain. *Macromolecular Bioscience*, *22*(6), e2100476. https://doi.org/10.1002/mabi.202100476

Zhou, Y., Han, L. R., He, H. W., Sang, B., Yu, D. L., Feng, J. T., & Zhang, X. (2018). Effects of agitation, aeration and temperature on production of a novel glycoprotein GP-1 by Streptomyces kanasenisi ZX01 and scale-up based on volumetric oxygen transfer coefficient. *Molecules*, *23*(1), 125. https://doi.org/10.3390/molecules23010125

Information about the authors:

Belkozhayev Ayaz Maratovich (corresponding author) – PhD, Associate Professor, Department of Chemical and Biochemical Engineering, K. Turyssov Institute of Geology and Oil and Gas Business, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: a.belkozhayev@satbayev.university).

Neumyvakin Pavel – BSc in Biotechnology, Department of Chemical and Biochemical Engineering, K. Turyssov Institute of Geology and Oil and Gas Business, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: pavel777485@gmail.com).

Tuleyeva Rysgul Nurlanovna – PhD, Department of Chemistry and Technology of Organic Substances, Natural Compounds and Polymers, Al-Farabi Kazakh National University; Research Scientist, Department of Chemical and Biochemical Engineering, K. Turyssov Institute of Geology and Oil and Gas Business, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: rysgultuleyeva@gmail.com).

Mussalimova Madina – PhD candidate, Department of Chemical and Biochemical Engineering, K. Turyssov Institute of Geology and Oil and Gas Business, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: mussalimova.m@stud.satbayev.university, mmussalimova@bk.ru).

Yelemessova Gauhargul – PhD candidate, Department of Chemical and Biochemical Engineering, K. Turyssov Institute of Geology and Oil and Gas Business, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: gauhargul1997@gmail.com).

Gizatullina Nargiz – PhD candidate, Department of Chemical and Biochemical Engineering, K. Turyssov Institute of Geology and Oil and Gas Business, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: gizatullinanargiz.nz@gmail.com).

Toleutay Gaukhar – PhD, Department of Chemical and Biochemical Engineering, K. Turyssov Institute of Geology and Oil and Gas Business, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: gaukhar.toleutay@gmail.com).

Авторлар туралы мәлімет:

Белкожаев Аяз Маратович (хат-хабарға жауапты автор) – PhD, Сәтбаев университеті, Қ. Тұрысов атындағы Геология және мұнай-газ ісі институтының Химиялық және биохимиялық инженерия кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Алматы, Қазақстан, e-mail: a.belkozhayev@satbayev.university).

Неумывакин Павел – биотехнология бакалавры, Сәтбаев университеті, Қ. Тұрысов атындағы Геология және мұнай-газ ісі институтының Химиялық және биохимиялық инженерия кафедрасы (Алматы, Қазақстан, e-mail: pavel777485@gmail.com).

Тулеева Рысгуль Нурлановна – PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің Органикалық заттар, табиғи қосылыстар және полимерлер химиясы мен технологиясы кафедрасы; Сәтбаев университеті, Қ. Тұрысов атындағы Геология және мұнай-газ ісі институтының Химиялық және биохимиялық инженерия кафедрасының ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: rysgultuleyeva@gmail.com).

Мусалимова Мәдина – PhD докторанты, Сәтбаев университеті, Қ. Тұрысов атындағы Геология және мұнай-газ ісі институтының Химиялық және биохимиялық инженерия кафедрасы (Алматы, Қазақстан, e-mail: mussalimova.m@stud.satbayev.university, mtmussalimova@bk.ru).

Елемесова Гаухаргүл – PhD докторанты, Сәтбаев университеті, Қ. Тұрысов атындағы Геология және мұнай-газ ісі институтының Химиялық және биохимиялық инженерия кафедрасы (Алматы, Қазақстан, e-mail: gauhargul1997@gmail.com).

Гизатуллина Наргиз – PhD докторанты, Сәтбаев университеті, Қ. Тұрысов атындағы Геология және мұнай-газ ісі институтының Химиялық және биохимиялық инженерия кафедрасы (Алматы, Қазақстан, e-mail: gizatullinanargiz.nz@gmail.com).

Төлеутай Гаухар – PhD, Сәтбаев университеті, Қ. Тұрысов атындағы Геология және мұнай-газ ісі институтының Химиялық және биохимиялық инженерия кафедрасы (Алматы, Қазақстан, e-mail: gaukhar.toleutay@gmail.com).

Сведения об авторах:

Белкожаев Аяз Маратович (автор для корреспонденции) – PhD, ассоциированный профессор кафедры химической и биохимической инженерии Института геологии и нефтегазового дела имени К. Турысова, Университет Сатпаева (Алматы, Казахстан, e-mail: a.belkozhayev@satbayev.university).

Неумывакин Павел – бакалавр биотехнологии, кафедра химической и биохимической инженерии Института геологии и нефтегазового дела имени К. Турысова, Университет Сатпаева (Алматы, Казахстан, e-mail: pavel777485@gmail.com).

Тулеева Рысгуль Нурлановна – PhD, кафедра химии и технологии органических веществ, природных соединений и полимеров Казахского национального университета имени аль-Фараби; научный сотрудник кафедры химической и биохимической инженерии Института геологии и нефтегазового дела имени К. Турысова, Университет Сатпаева (Алматы, Казахстан, e-mail: rysgultuleyeva@gmail.com).

Мусалимова Мәдина – докторант PhD, кафедра химической и биохимической инженерии Института геологии и нефтегазового дела имени К. Турысова, Университет Сатпаева (Алматы, Казахстан, e-mail: mussalimova.m@stud.satbayev.university, mtmussalimova@bk.ru).

Елемесова Гаухаргүл – докторант PhD, кафедра химической и биохимической инженерии Института геологии и нефтегазового дела имени К. Турысова, Университет Сатпаева (Алматы, Казахстан, e-mail: gauhargul1997@gmail.com).

Гизатуллина Наргиз – докторант PhD, кафедра химической и биохимической инженерии Института геологии и нефтегазового дела имени К. Турысова, Университет Сатпаева (Алматы, Казахстан, e-mail: gizatullinanargiz.nz@gmail.com).

Толеутай Гаухар – PhD, кафедра химической и биохимической инженерии Института геологии и нефтегазового дела имени К. Турысова, Университет Сатпаева (Алматы, Казахстан, e-mail: gaukhar.toleutay@gmail.com).

Received June 09, 2026
Accepted September 26, 2026

IRSTI 68.03.07; 68.05.45 https://doi.org/10.26577/EJE208830526

B.D. Kossalbayev[1,2*], M. Lyu[3,4], A.K. Sadvakasova[2],
D.E. Zaletova[1,2], M.O. Bauenova[2], D. Kelden[1],
J. Wang[3,4], Zh. Huang[3,4]

[1]Satbayev University, Almaty, Kazakhstan
[2]Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
[3] Tianjin Institute of Industrial Biotechnology, Chinese Academy of Sciences, Tianjin, China
[4] National Center of Technology Innovation for Synthetic Biology, Tianjin, China
*e-mail: kossalbayev.bekzhan@gmail.com

EFFECTS OF A TEN-BACTERIAL CONSORTIUM ON RICE GROWTH AND RHIZOSPHERE MICROBIAL COMMUNITY COMPOSITION

Rice production needs sustainable strategies that reduce dependence on chemical inputs while maintaining growth and yield. In this study, we assembled a ten-bacterial consortium (B10) from dominant rice-associated isolates and evaluated its effects on rice growth and rhizosphere bacterial communities under pot conditions. Compared with the control (CK), inoculation significantly enhanced rice growth, with dry biomass, fresh weight, shoot height, and stem height increasing by 50.7%, 47.6%, 18.2%, and 14.8%, respectively. High-throughput 16S rRNA sequencing showed that the consortium did not significantly alter alpha diversity, but clearly shifted beta diversity and community composition. B10 enriched taxa positively associated with rice growth, including *Azospirillum brasilense*, *Delftia tsuruhatensis*, *Bdellovibrio*, *Paracoccus*, and *Pseudomonas*, while reducing several negatively associated taxa. Functional prediction analyses indicated that B10 reshaped the rice rhizosphere into a more favorable microbiome than CK by enriching beneficial predicted metabolic functions and reducing undesirable phenotypes. These results indicate that the consortium promoted rice growth partly through rhizosphere microbiome restructuring. This work shows the potential of multi-strain inoculants in agroecosystems.

Keywords: rice, consortium, rhizosphere, microbiome, inoculation.

Б.Д. Қосалбаев[1,2*], М. Лиу[3,4], А.К. Садвакасова[2],
Д.Е. Залетова[1,2], М.Ө. Бауенова[2], Д. Келден[1], Ж. Ван[3,4], Ж. Хуанг[3,4]

[1]Қ. Тұрысов атындағы Геология және мұнай-газ ісі институты, Satbayev University, Алматы, Қазақстан
[2]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан
[3]Тяньцзинь өнеркәсіптік биотехнология институты, Қытай ғылым академиясы, Тяньцзинь, Қытай
[4]Синтетикалық биология саласындағы технологиялық инновациялардың ұлттық орталығы, Тяньцзинь, Қытай
*e-mail: kossalbayev.bekzhan@gmail.com

Күріштің өсуіне және ризосфералық микробтық қауымдастық құрамына он бактериядан тұратын консорциумның әсері

Күріш өндірісіне өсім мен өнімділікті сақтай отырып, химиялық енгізілімдерге тәуелділікті азайтатын тұрақты стратегиялар қажет. Осы зерттеуде біз күрішпен ассоциацияланған басым изоляттардан он бактериядан тұратын консорциумды (B10) құрастырып, оның күріштің өсуіне және ризосферадағы бактериялық қауымдастықтарға әсерін вегетациялық ыдыстар жағдайында бағаладық. Бақылаумен (CK) салыстырғанда, инокуляция күріштің өсуін едәуір жақсартты: құрғақ биомасса, жаңа салмақ, өркен биіктігі және сабақ биіктігі тиісінше 50,7%, 47,6%, 18,2% және 14,8%-ға артты. 16S rRNA жоғары өнімді секвенирлеу нәтижелері консорциумның альфа-алуантүрлілікке айтарлықтай әсер етпегенін, бірақ бета-алуантүрлілік пен қауымдастық құрамын анық өзгерткенін көрсетті. B10 күріштің өсуімен оң байланысты таксондарды, соның ішінде *Azospirillum brasilense*, *Delftia tsuruhatensis*, *Bdellovibrio*, *Paracoccus* және *Pseudomonas* туыстарын байытты, сонымен қатар өсуге теріс байланысты бірнеше таксондардың үлесін азайтты. Функционалдық болжау талдауы B10 нұсқасының CK-пен салыстырғанда күріш ризосферасының микробиомын пайдалы болжанған метаболикалық функцияларды байыту және қолайсыз фенотиптерді азайту арқылы анағұрлым қолайлы күйге өзгерткенін көрсетті. Бұл нәтижелер консорциумның ризосфера микробиомын қайта құрылымдау арқылы күріштің өсуін ішінара

 © 2026 Al-Farabi Kazakh National University

дырғанын көрсетеді. Бұл жұмыс көпштаммды инокулянттардың агроэкожүйелердегі әлеуетін көрсетеді.

Түйін сөздер: күріш, консорциум, ризосфера, микробиом, инокуляция.

Б.Д. Косалбаев[1, 2*], Ж. Ван[3, 4], М. Лиу[3, 4], А.К. Садвакасова[2],
Д.Е. Залетова[1, 2], М.О. Бауенова[2], Д. Келден[1], Ж. Хуанг[3, 4]

[1]Институт геологии и нефтегазового дела им. К. Турысова, Satbayev University, Алматы, Казахстан
[2]Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан
[3]Тяньцзиньский институт промышленной биотехнологии, Китайская академия наук, Тяньцзинь, Китай
[4]Национальный центр технологических инноваций в области синтетической биологии, Тяньцзинь, Китай
*e-mail: kossalbayev.bekzhan@gmail.com

Влияние консорциума из десяти бактерий на рост риса и состав микробного сообщества ризосферы

Производству риса необходимы устойчивые стратегии, позволяющие снизить зависимость от химических средств при сохранении роста и урожайности. В данном исследовании мы сформировали консорциум из десяти бактерий (B10) на основе доминирующих изолятов, ассоциированных с рисом, и оценили его влияние на рост риса и бактериальные сообщества ризосферы в условиях вегетационного опыта. По сравнению с контролем (CK) инокуляция значительно улучшила рост риса: сухая биомасса, свежая масса, высота побега и высота стебля увеличились на 50,7%, 47,6%, 18,2% и 14,8% соответственно. Высокопроизводительное секвенирование 16S rRNA показало, что консорциум не оказывал значимого влияния на альфа-разнообразие, однако заметно изменял бета-разнообразие и состав сообщества. B10 способствовал обогащению таксонов, положительно связанных с ростом риса, включая *Azospirillum brasilense*, *Delftia tsuruhatensis*, *Bdellovibrio*, *Paracoccus* и *Pseudomonas*, одновременно снижая представленность нескольких таксонов, отрицательно связанных с ростом. Анализ функционального прогнозирования показал, что B10 перестроил микробиом ризосферы риса в более благоприятное состояние по сравнению с CK за счёт обогащения полезных прогнозируемых метаболических функций и снижения нежелательных фенотипов. Эти результаты показывают, что консорциум способствовал росту риса отчасти за счёт реструктуризации ризосферного микробиома. Данная работа демонстрирует потенциал многоштаммовых инокулянтов в агроэкосистемах.

Ключевые слова: рис, консорциум, ризосфера, микробиом, инокуляция.

Introduction

Rice (*Oryza sativa* L.) is one of the most important food crops in the world and remains central to global food security. FAO and IRRI describe rice as a staple food for more than half of the world's population, and in Asia alone more than 2 billion people obtain 60–70% of their dietary energy from rice and rice-derived products (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2003). Beyond its nutritional importance, rice cultivation also supports the livelihoods of hundreds of millions of farmers and rural households, especially in developing countries (Fukagawa & Ziska, 2019).

Conventional rice production has relied heavily on chemical fertilizers and other external inputs to maintain yield, but this strategy raises concerns about production costs, nutrient losses, environmental contamination, and long-term soil health. For this reason, microbial inoculants have attracted increasing attention as a sustainable alternative or complement to chemical inputs. Recent works describe plant growth-promoting rhizobacteria and related bioinoculants as promising tools for improving nutrient availability, phytohormone production, stress tolerance, and crop performance while reducing dependence on synthetic fertilizers. For example, Ríos-Ruiz et al. (2020) reported that selected native bacterial consortia increased rice productivity while allowing nitrogen fertilizer inputs to be reduced by up to 25% in field conditions in Peru. Likewise, Huang et al. (2024) showed that microbial inoculation significantly increased rice yield and seed-setting rate, with co-inoculation increasing yield by up to 13.7%. In another study, Wang et al. (2023) found that inoculants promoted rice growth mainly by regulating the rhizosphere microbiome rather than simply acting alone or only increasing soil nutrient availability.

Although many studies have focused on single beneficial strains, increasing evidence suggests that microbial consortia may be more effective because different members can contribute complementary functions and improve colonization stability in the rice rhizosphere. For example, Etesami and Alikhani (2016) showed that co-inoculation of rhizosphere and endophytic *Pseudomonas* strains improved rice growth and nutrient uptake while allowing a 25% reduction in N fertilizer. In addition, Moronta-Barrios

et al. (2018) demonstrated that a 10-strain simplified bacterial community could colonize rice seedlings together for 30 days, indicating that multispecies inoculants can persist as coordinated assemblages. Also, Xiao et al. (2022) found that co-inoculation improved rice yield and altered the resident soil bacterial community, particularly rare taxa associated with crop performance.

A closely related concept is that beneficial inoculants may not act only through direct plant-growth-promoting traits, but also by reshaping the indigenous rhizosphere microbiome in ways that support crop performance. This mechanism is especially important in rice because introduced strains must establish and function within an already complex root-associated microbial community. For example, Islam et al. (2023) reported that inoculation of rice with *Paraburkholderia fungorum* BRRh-4 and *Delftia* sp. BTL-M2 significantly improved growth and yield, while 16S-based analysis showed clear changes in the diversity, structure, and composition of the root and rhizosphere bacteriome; the authors concluded that these probiotic strains likely promoted rice performance partly by modulating associated bacterial communities. Likewise, Li et al. (2024) showed that inoculation with the nitrogen-fixing bacterium R3 (*Herbaspirillum*) increased rice yield by 8.81% and altered the native nitrogen-fixing microbiome, increasing the abundance of key genera such as *Ralstonia*, *Azotobacter*, *Geobacter*, *Streptomyces*, and *Pseudomonas*. Yang et al. (2025) found that *Bacillus amyloliquefaciens*-modified bio-organic fertilizer increased rice yield by 9.6% and markedly restructured the rhizosphere bacterial community, enriching beneficial taxa such as *Sphingomonas* that were positively associated with soil nutrient status and crop performance.

The present study evaluated whether a consortium of high-abundance bacterial isolates could improve rice growth and modify rhizosphere bacterial communities. We hypothesized that high-abundance bacteria would promote rice growth not only through their own colonization, but also by enriching beneficial soil bacteria and shifting community composition toward taxa positively associated with plant performance.

Materials and methods

Sample preparation, isolation, and DNA preparation

Forty plates each of TSA (Doyle et al., 1968), PDA (de Wet & Brink, 2021), and LB (Bertani, 1951) media were prepared. Root-adjacent soil (1 g), rhizosphere soil (0.1 g) from the Daan region of China, and rice roots treated with microbial agent N were used for microbial isolation. Soil samples were suspended in 9 mL sterile water, while roots were rinsed twice with sterile water, blotted dry, weighed (1 g), and homogenized in 9 mL sterile water. Seven replicate samples were pooled for each treatment. Suspensions were serially diluted 10-fold in PBS to $10^{-}5$, and 100 µL aliquots of the $10^{-}2$ to $10^{-}5$ dilutions were spread onto TSA, PDA, and LB plates using glass beads. Plates were labeled and incubated inverted at 30°C for 24 h. Plates containing 30–100 colonies were selected for further analysis. For colony isolation, 1 mL TSB (Perchetti et al., 2020) was dispensed into each well of 96-well deep plates using an automated liquid handler. Single colonies of appropriate size were picked using a QPix 420 automated colony picker (Molecular Devices, USA) and transferred into 96-well plates, which were then sealed and incubated overnight at 30°C with shaking.

DNA extraction and PCR

Following enrichment, a Biomek i7 (Beckman Coulter, California, USA) automated workstation was employed. For each well in a 96-deep well plate, 10 µL of bacterial suspension was collected and centrifuged at 4000 rpm for 5 min at room temperature. After discarding the supernatant, 10 µL of lysis buffer (TaKaRa Bio, Shiga, Japan) was added. The plate was then incubated at 80°C for 15 minutes in a PCR machine to lyse the cells and extract the DNA.

The PCR mixture was prepared in the sample loading slot of the workstation with the following components: 7875 µL Taq MasterMix (Kangwei Century, China), 5250 µL dH_2O, 525 µL 1492R primer, and 525 µL 27F primer. After thorough mixing, the PCR mixture was aliquoted into a 96-well PCR plate, with each well receiving 27 µL. An additional 3 µL of the extracted DNA was then added to each well, bringing the total volume to 30 µL per well. The PCR amplification program was set as follows: denaturation- 94°C for 5 min, denaturation – 94°C (35 cycles) for 30 secs, annealing – 56°C for 30 secs, and extension – 72°C for 10 min. After amplification, the samples were sent to BGI Genomics Co., Ltd. (Shenzhen, China) for sequencing. The sequencing results were then compared with the NCBI database to determine the taxonomic classification of each bacterial strain.

Soil collection and sterilization

Rhizosphere soil was collected from the upper 30 cm of a weed field in the Tianjin, China. The sampled soil was air dried and thoroughly mixed, followed by a sieving step (0.5-cm mesh) to remove plant debris. 10 plastic pots (diameter 10 cm, height 9 cm) were sterilized using 1.5% sodium hypochlorite and 100% ethanol and then exposed to UV-C light for 2 hours by turning sides every 30 min. Soil was sterilized in an autoclave at 121°C for 2 h with help of autoclave bags. 10 pot bags were filled with soil, each containing 300 g of soil.

Rice pot experiment

High-throughput sequencing identified 603 isolates/strains representing 24 genera and 56 species. High abundance ten PGPB (*Pseudomonas kilomensis* 520-20*, Stutzerimonas chloritidismutans, Kosakonia sacchari* strain SP1, *Enterobacter mori* strain YIM Hb-3*, Atlantibacter hermannii* strain CIP 103176*, Cronobacter dublinensis* subsp. lausannensis strain E515*, Salmonella enterica* subsp. salamae strain DSM 9220*, Bacillus aerius* strain 24K*, Halomonas lutescens* strain Q1U*, Aeromonas hydrophila* strain JCM 1027) from identified species were grown in TSB medium at 30°C for 48 hours on a rotary shaker (180 rpm). The bacterial broth was washed three times with 0.9% NaCl solution and resuspended with sterile deionized water. The number of bacteria was counted by microscopy and was adjusted to about 3×10^8 CFU/mL with sterile deionized water. The resuspended bacteria were verified by TSB plates.

The glume of rice seeds (Ledao 111, Wuchang Fangyuan Institute of Agricultural Sciences cross-breeding, Heilongjiang, China) were removed by a rice huller (Taizhou Grain Instrument Factory, Taizhou, China). Intact rice seeds were sterilized with 3.7% sodium hypochlorite (wt/vol) for 15 min, 75% ethanol for 5 min. The seeds were stirred with a glass rod throughout the sterilization period. Then the seeds were washed six times with sterile water. Rice seeds were soaked for 10 min when washing them for the last three times. The sterile water used to wash rice seeds for the last time was used to verify the sterilization.

Twenty rice seeds were sown in each pot. Each pot was drenched with 50 mL sterile water. There were 2 treatments (Table 1). In order to prevent microbial contamination, after sowing on the ultra-clean table, the mouth of the sealing bottle was wiped with alcohol cotton ball. Five replications of each treatment were set up. Pots were placed randomly in a growth chamber (CIMO, Shanghai, China) with 75% relative humidity and 16/8 h day/night. Before seedling emergence, the temperature was controlled at 30°C. Then, the temperature was set at 28°C day/24°C night for one leaf stage, 28°C day/25°C night for two-leaf stage, and 28°C day/22°C night for other stages. The cultured pots were watered 50 ml every 48 h, and the position of the rice pots was randomly changed.

Table 1
The treatments of the rice pot experiment

#	Name	Supernatant (50 mL)	Inoculation (50 mL)
1	CK	sterilized dH_2O	sterilized dH_2O
2	10B	sterilized dH_2O	10 bacterial suspensions

Amplicon sequencing analysis

Soil bacterial communities were analyzed using high throughput sequencing. The bacterial hypervariable regions (V3-V4) of the 16S rRNA genes were amplified using primers 338F (5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3') – 806R (5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3') respectively. PCR products were purified and then sequenced using the MiSeq platform at Majorbio Co., Ltd. (Shanghai, China). Raw data were processed and analyzed (ACE α-diversity, PCoA β-diversity, taxonomic composition, detection of inoculated taxa, Spearman correlations, linear regression, and a correlation network) using Majorbio. Alpha-diversity (Sobs) was compared using the Wilcoxon rank-sum test. Spearman correlation, linear regression, and correlation network analyses were performed in R. PCoA was used to evaluate beta-diversity.

Biosafety statement

All procedures involving bacterial isolates were performed under approved institutional biosafety practices in designated laboratory facilities. Appropriate personal protective equipment was used throughout, and all cultures, media, and contaminated materials were decontaminated by sterilization before disposal. No live microbial material was intentionally released into the environment.

Data analysis

To evaluate differences between the data presented in figures, we conducted a one-way analysis of variance (ANOVA) with Tukey's honestly

significant differences (HSD) as a post-hoc test in IBM SPSS Statistics. Correlation analyses were conducted using R (version 3.1.1). Figures and one-way analysis of variance (ANOVA) with Tukey's of pot experiments were generated with GraphPad Prism.

Results and their discussion

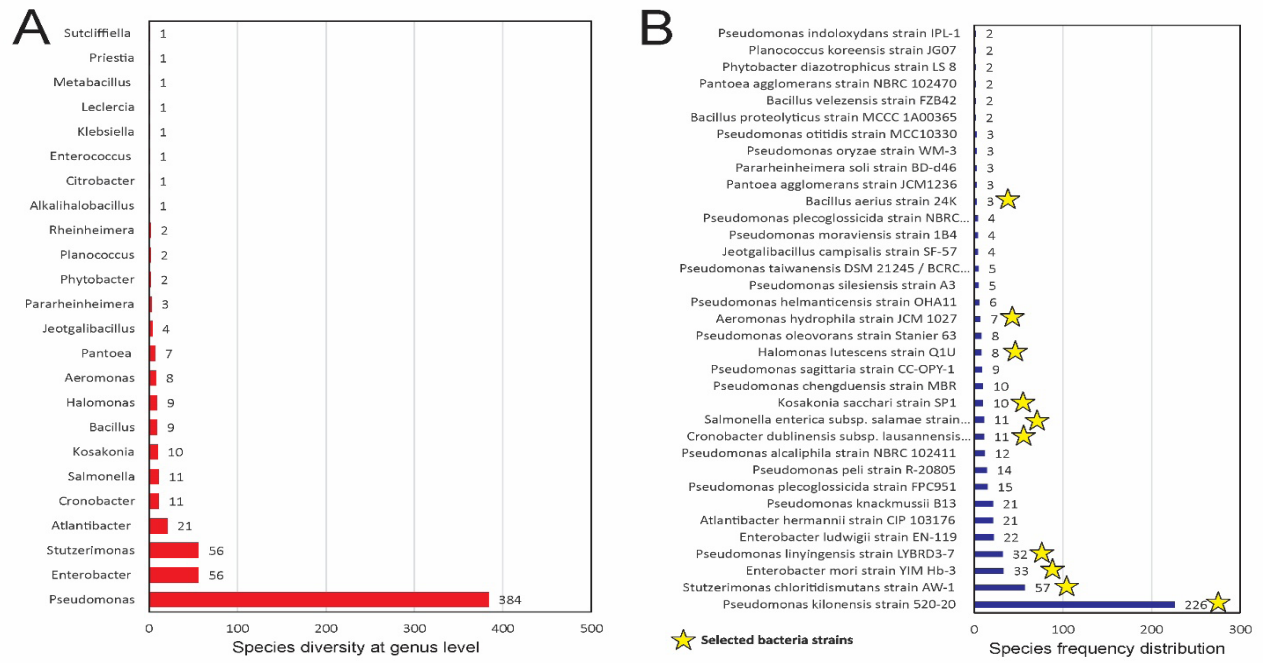
Isolation and selection of bacterial species

Sequencing results showed that there were 603 strains belonging to 24 genera. The ten strains were selected as the most representative species from the dominant genera based on isolation frequency, while avoiding repeated selection of closely related taxa; Bacillus aerius was additionally included because Bacillus is a well-known plant growth-promoting genus (Figure 1). These 10 selected species are common rhizosphere-associated bacteria of agricultural plants. *Pseudomonas* species contained 63.68% (384) of total isolated samples, so total number were 384. *Enterobacter* and *Stutzerimonas* were 9.29% (56) of total isolated strains. Other species were as follows: *Atlantibacter* – 3.48% (21), *Cronobacter* and *Salmonella* 1.82% – (11), *Kosakonia* – 1.66% (10), *Bacillus* and *Halomonas* – 1.49% (9), *Aeromonas* – 1.33% (8), *Pantoea* – 1.16% (7), *Jeotgalibacillus* – 0.66% (4), *Pararheinheimera* – 0.50% (3), *Phytobacter*, *Planococcus* and *Rheinheimera* – 0.33%, *Alkalihalobacillus*, *Citrobacter*, *Enterococcus*, *Klebsiella*, *Leclercia*, *Metabacillus*, *Priestia* and *Sutcliffiella* – 0.17% (1) (Fig. 1A).

There were 56 different species at species level with different strain names. We took 1 from each dominated species. For example, among *Pseudomonas* species, *Pseudomonas kilomensis* frequency was 226, so we took this one. From *Stutzerimonas* species *Stutzerimonas chloritidismutans* had frequency 57, so we took this species. *Enterobacter mori* (33), *Atlantibacter hermannii* (21), *Salmonella enterica* subsp. salamae (11), *Cronobacter dublinensis* subsp. ausannensis (11), *Kosakonia sacchari* (10), *Halomonas lutescens* (8), *Aeromonas hydrophila* (7) and *Bacillus aerius* (3) (Fig. 1B).

Following 10 species were chosen for next experiments based on their high abundance: *Pseudomonas kilomensis* G1, *Enterobacter mori strain* H1, *Stutzerimonas chloritidismutans* E1, *Atlantibacter hermannii* C10, *Cronobacter dublinensis* C11, *Salmonella enterica* F7, *Kosakonia sacchari* H9, *Bacillus aerius* D4, *Halomonas lutescens* D3, *Aeromonas hydrophila* G3.

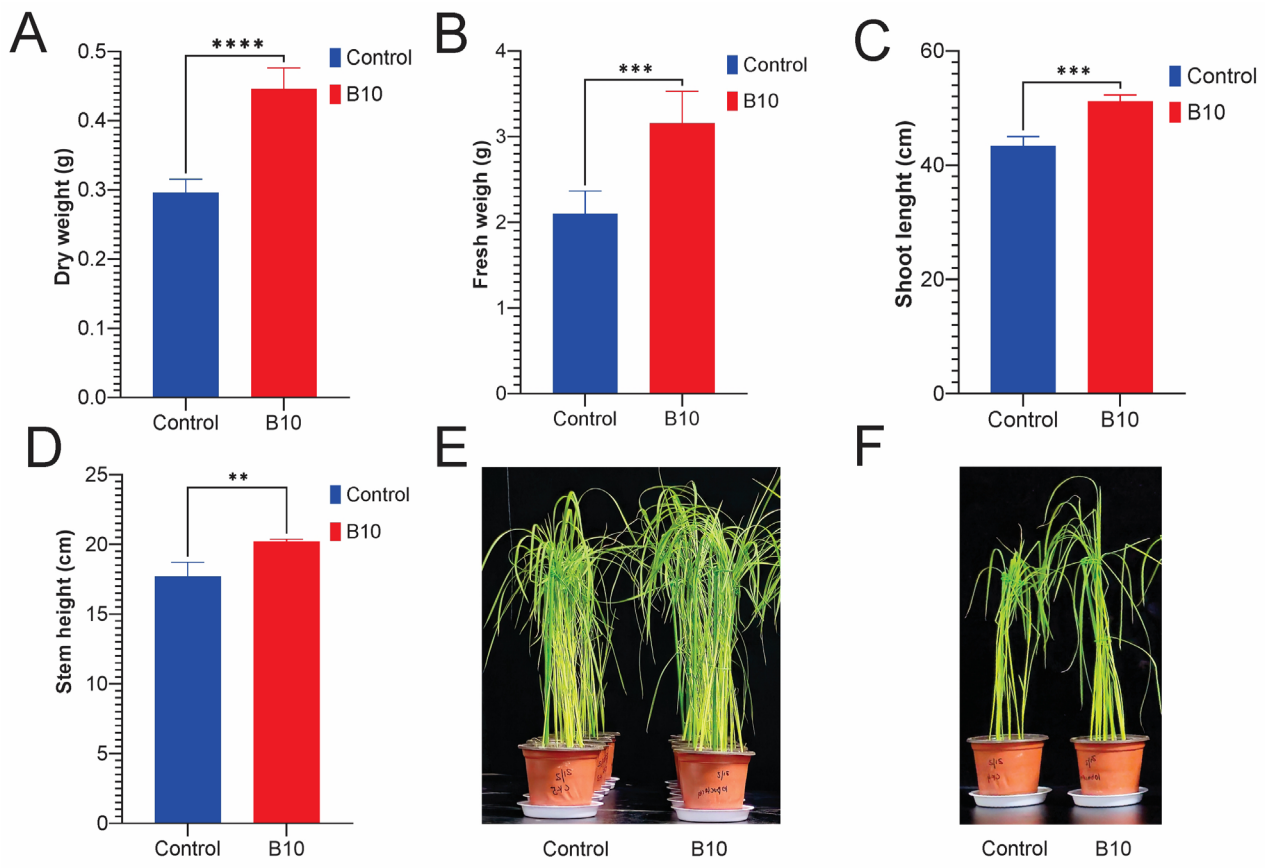
Figure 1
Total number of isolated bacterial taxa at the genus (A) and species (B) levels



The effect of inoculants on rice

The effect of 10 newly isolated bacterial strains on rice growth was evaluated in a subsequent experiment. Compared with the uninoculated CK, the rice plants treated with the B10 exhibited improved growth performance. After 31 days under laboratory conditions, dry biomass, fresh biomass, shoot height, and stem height were measured. Dry biomass was significantly higher in B10 (0.446 g) than in CK (0.296 g), corresponding to an increase of 50.7% (Fig. 2A; $P < 0.0001$, $R = 0.9912$). In addition, fresh biomass was significantly higher in B10 (3.1 g) than in CK (2.1 g) (Fig. 2B; $P = 0.0010$, $R = 0.9491$). Likewise, shoot height increased significantly from 43.3 cm in CK to 51.2 cm in B10 (Fig. 2C; $P = 0.0003$, $R = 0.9724$). Stem height was also significantly greater in B10 (20.2 cm) than in CK (17.6 cm) (Fig. 2D; $P = 0.0087$, $R = 0.8519$). Representative images of individual pots and grouped pots are presented in Fig. 2E and Fig. 2F, respectively.

Figure 2
Effect of inoculants on rice growth



(A) Dry weight; (B) fresh weight; (C) shoot height, (D) stem height; (E) five pots for each treatment; (F) a representative pot from each treatment

Effect of inoculants on microbial diversity and composition

Community diversity analysis

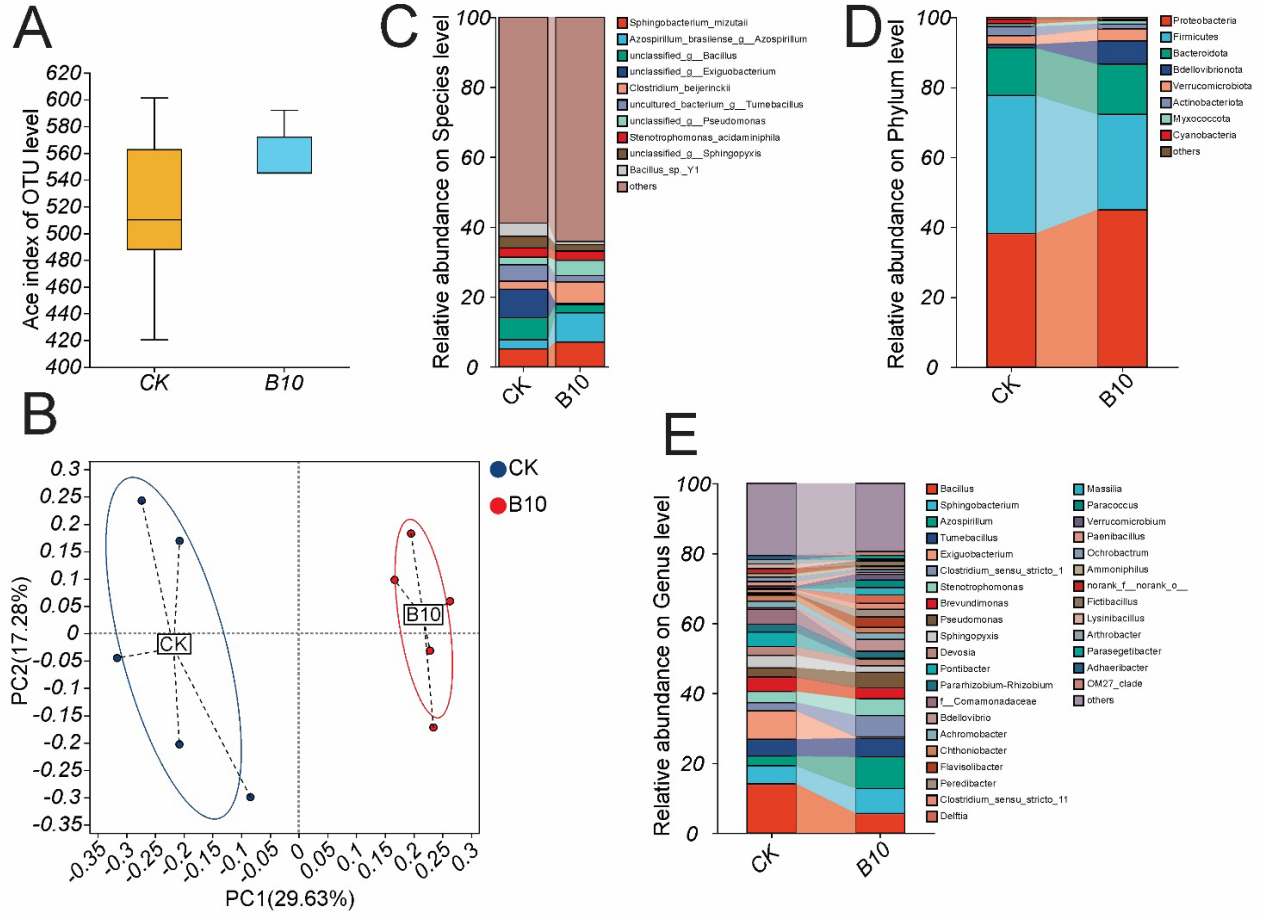
There was no significant difference in bacterial α-diversity between the B10 treatment and the CK based on the ACE index (Wilcoxon rank-sum test, $p = 0.5309$; Fig. 3A). Although the median ACE value was slightly higher in B10 (544.94) than in CK (509.94), the difference was not statistically significant, indicating that inoculation with the 10-bacterial consortium did not markedly change overall bacterial richness in the rice rhizosphere.

In contrast, the bacterial community structure differed between B10 and CK in the β-diversity analysis (Fig. 3B). Principal coordinate analysis (PCoA) at the species level showed a clear separation between the two treatments. PC1 and PC2 ex-

plained 29.63% and 17.28% of the total variation, respectively. All B10 replicates were distributed on the positive side of PC1, whereas all CK replicates were located on the negative side of PC1, indicating that the inoculation shifted the bacterial community composition in the rhizosphere soil.

Figure 3

Effects of B10 inoculation on bacterial diversity and community composition in the rice rhizosphere



(A) Between-group difference test of the ACE index based on the Wilcoxon rank-sum test; (B) Principal coordinate analysis (PCoA) of bacterial communities at the species level; (C–E) Community composition analysis showing the relative abundance of bacterial taxa at the species, phylum, and genus levels, respectively

Community composition analysis

At 31 days after inoculation, the bacterial community composition of the rice rhizosphere differed between the B10 treatment and the CK. At the species level (Fig. 3C), the B10 treatment was mainly dominated by *Azospirillum brasilense* (8.37%), *Sphingobacterium mizutaii* (7.04%), *Clostridium beijerinckii* (6.07%), unclassified *Pseudomonas* (4.37%), and *Tumebacillus ginsengisoli* (3.48%). In contrast, the CK treatment was dominated by unclassified *Exiguobacterium* (8.11%), unclassified *Bacillus* (6.30%), *Sphingobacterium mizutaii* (5.13%), uncultured *Tumebacillus* (4.74%), unclassified Comamonadaceae (4.22%), and *Pontibacter populi* (3.72%). Compared with CK, B10 markedly increased the relative abundance of *Azospirillum brasilense*, *Clostridium beijerinckii*, *Tumebacillus ginsengisoli*, uncultured *Flavisolibacter*, unclassified *Pseudomonas*, and *Delftia tsuruhatensis*. By contrast, unclassified *Exiguobacterium*, unclassified Comamonadaceae, unclassified *Bacillus*, *Pontibacter populi*, and uncultured *Tumebacillus* were clearly reduced in the B10 treatment.

At the phylum level (Fig. 3D), Proteobacteria was the most abundant phylum in both treatments, but its relative abundance was higher in B10 than

in CK (44.99% vs. 38.20%). In contrast, Firmicutes was less abundant in B10 than in CK (27.32% vs. 39.51%), showing a clear decline after inoculation. Bacteroidota remained one of the dominant phyla in both treatments and showed a slight increase in B10 (14.35%) compared with CK (13.57%). A notable enrichment was also observed for Bdellovibrionota, which increased strongly in B10 (6.61%) relative to CK (0.98%). In addition, Verrucomicrobiota increased from 2.51% in CK to 3.49% in B10. In contrast, Actinobacteriota and Cyanobacteria decreased in B10, dropping from 2.57% to 1.37% and from 1.31% to 0.28%, respectively. Overall, the phylum-level profile suggests that B10 shifted the rhizosphere microbiome toward Proteobacteria- and Bdellovibrionota-dominated communities, while reducing the contribution of Firmicutes.

At the genus level (Fig. 3E), the B10 treatment was dominated by Azospirillum (9.10%), Sphingobacterium (7.13%), Clostridium_sensu_stricto_1 (6.10%), Bacillus (5.58%), Tumebacillus (5.29%), Stenotrophomonas (4.78%), and Pseudomonas (4.39%). In CK, however, Bacillus (14.04%) and Exiguobacterium (8.15%) were the most dominant genera, followed by Sphingobacterium (5.19%), Tumebacillus (4.79%), unclassified Comamonadaceae (4.22%), and Pontibacter (4.13%). Compared with CK, B10 strongly enriched Azospirillum, Clostridium_sensu_stricto_1, Bdellovibrio, Flavisolibacter, Delftia, Paracoccus, Massilia, and Pseudomonas. In contrast, Bacillus, Exiguobacterium, unclassified Comamonadaceae, Pontibacter, and Sphingopyxis decreased in the B10 treatment. Among the inoculated genera, Pseudomonas, Kosakonia, and Enterobacter were more abundant in B10 than in CK, while Halomonas was detected only in B10 and Bacillus showed a lower relative abundance in B10 than in CK.

Inoculation

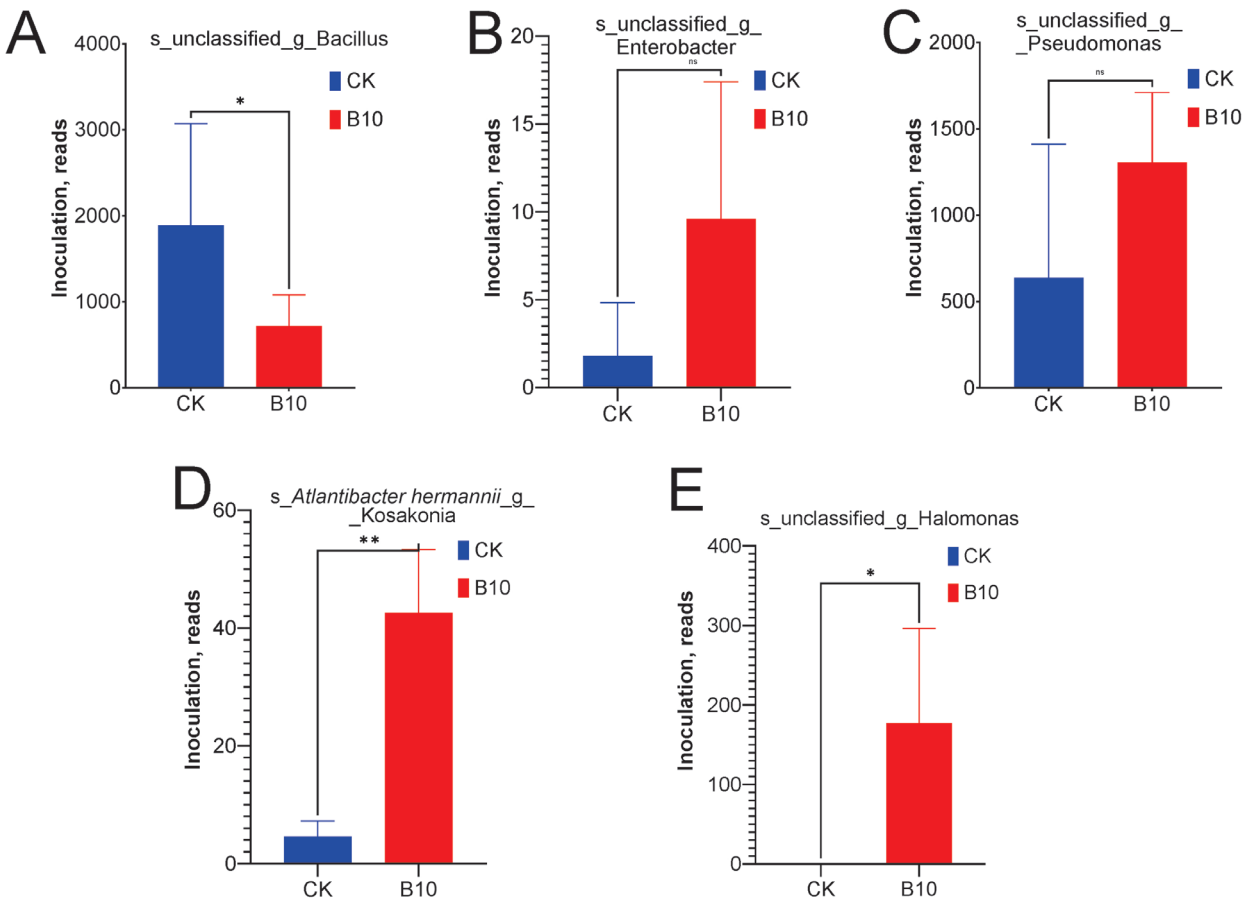
Among the inoculated taxa, five were detected in the sequencing dataset, including Bacillus, Pseudomonas, Enterobacter, Halomonas, and *Atlantibacter hermannii*/Kosakonia. Their abundance patterns differed between the CK and B10 treatments.

Bacillus was detected in both treatments but was significantly more abundant in CK (9,434 total reads) than in B10 (3,593 total reads), indicating that inoculation did not increase the abundance of this taxon under the experimental conditions ($P = 0.0453$, $R = 0.6737$; Fig. 4A). Enterobacter was detected at very low abundance in CK (9 total reads) and showed a higher total abundance in B10 (48 total reads). However, this difference was not statistically significant ($P = 0.1276$, $R = 0.4791$; Fig. 4B). Pseudomonas was enriched in B10, with total read counts increasing from 3,193 in CK to 6,532 in B10. This increase showed a marginal trend but did not reach statistical significance ($P = 0.0549$, $R = 0.6434$; Fig. 4C). Similarly, *Atlantibacter hermannii*/Kosakonia was present at low abundance in CK (23 total reads) and increased in B10 (213 total reads), although this difference was not statistically significant ($P = 0.1276$, $R = 0.4791$; Fig. 4D). Halomonas was not detected in CK but was consistently detected in all B10 replicates, with a total of 885 reads. This taxon showed a significant association with B10 inoculation ($P = 0.0028$, $R = 0.9142$; Fig. 4E).

Correlation analysis

Spearman correlation analysis between bacterial taxa and rice growth traits revealed clear associations between rhizosphere community composition and plant performance (Fig. 5A). Across the CK and B10 samples, several taxa showed strong positive correlations with both shoot height and shoot dry weight. The strongest positive correlations with shoot height were observed for Bdellovibrio ($r = 0.906$, $p < 0.001$), Peredibacter ($r = 0.869$, $p = 0.001$), Paracoccus ($r = 0.805$, $p = 0.005$), *Azospirillum brasilense* ($r = 0.778$, $p = 0.008$), and *Delftia tsuruhatensis* ($r = 0.736$, $p = 0.015$). Similarly, shoot dry weight was positively correlated with *Delftia tsuruhatensis* ($r = 0.828$, $p = 0.003$), *Azospirillum brasilense* ($r = 0.816$, $p = 0.004$), Paracoccus ($r = 0.794$, $p = 0.006$), and Bdellovibrio ($r = 0.791$, $p = 0.006$). In addition, *Sphingobacterium mizutaii*, Flavisolibacter, Pseudomonas, and *Clostridium beijerinckii* also showed positive correlations with shoot traits, although these associations were weaker. In contrast, several taxa were negatively correlated with plant growth. Shoot height showed strong negative correlations with unclassified Sericytochromatia ($r = -0.894$, $p < 0.001$), Adhaeribacter ($r = -0.853$, $p = 0.002$), Exiguobacterium ($r = -0.741$, $p = 0.014$) and Sphingopyxis ($r = -0.687$, $p = 0.028$). Shoot dry weight was most negatively correlated with *Methylorubrum extorquens* ($r = -0.890$, $p < 0.001$), Adhaeribacter ($r = -0.829$, $p = 0.003$), unclassified Sericytochromatia ($r = -0.779$, $p = 0.008$) and unclassified Comamonadaceae ($r = -0.767$, $p = 0.010$). The correlation heatmap suggests that taxa positively associated with rice growth were more closely linked with the improved performance observed under B10 inoculation, whereas negatively correlated taxa were associated with poorer plant growth.

Figure 4
Detection and abundance of inoculated bacterial taxa

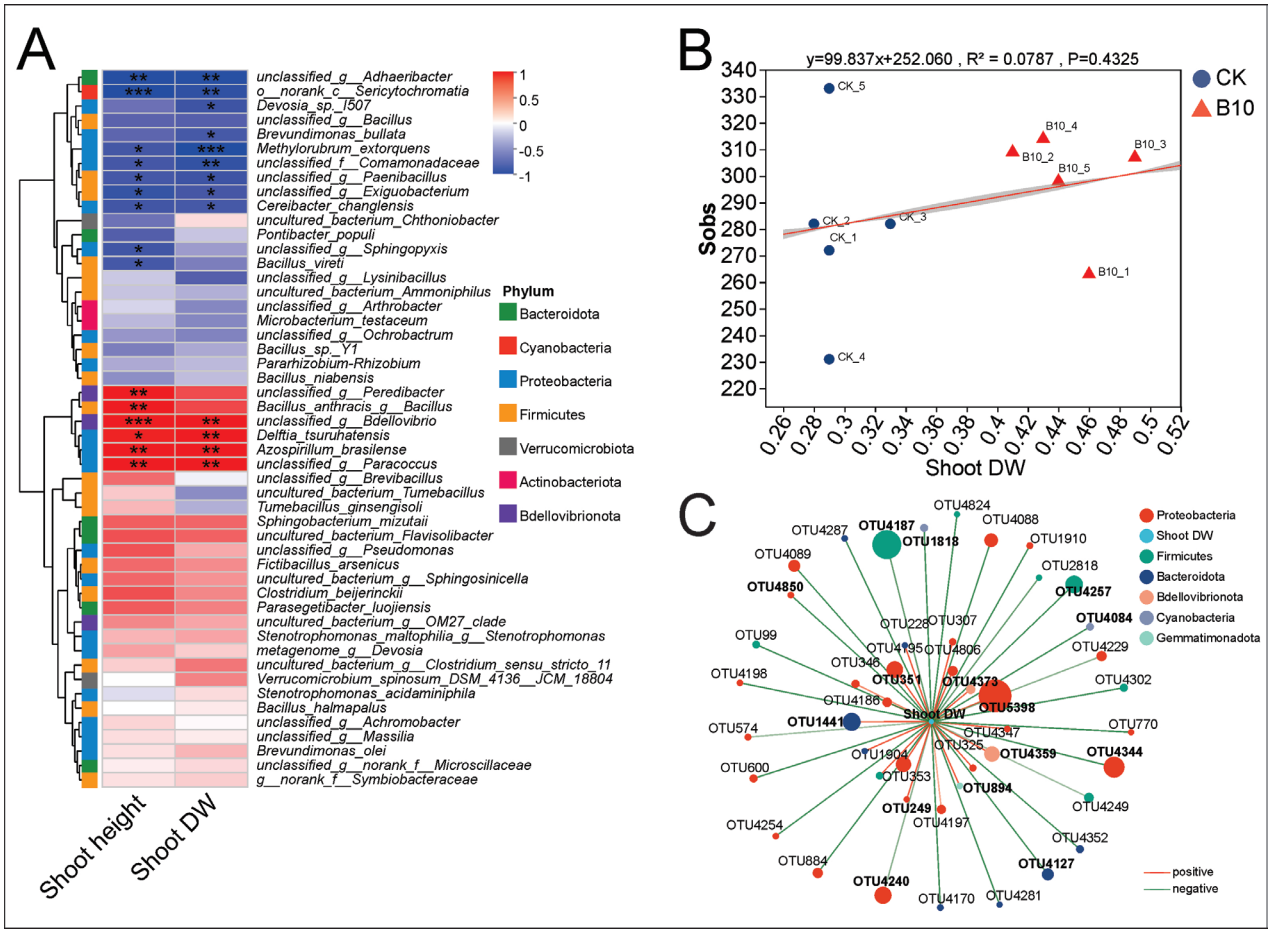


(A) Bacillus, (B) Enterobacter, (C) Pseudomonas, (D) Atlantibacter hermannii, (E) Halomonas

Linear regression analysis was performed to evaluate the relationship between shoot dry weight and bacterial richness (Sobs) across the CK and B10 treatments (Fig. 5B). The regression model showed a positive slope ($y = 99.837x + 252.060$), indicating that Sobs tended to increase slightly with increasing shoot dry weight. However, this relationship was weak and not statistically significant ($R^2 = 0.0787$, $P = 0.4325$), showing that shoot dry weight explained only a small proportion of the variation in bacterial richness. Although B10 samples were generally distributed at higher shoot dry weight values than CK, the overall regression analysis suggested that bacterial richness was not significantly associated with shoot dry weight under the conditions of this experiment.

Figure 5

Correlation analysis of rice biomass and rhizosphere bacterial communities

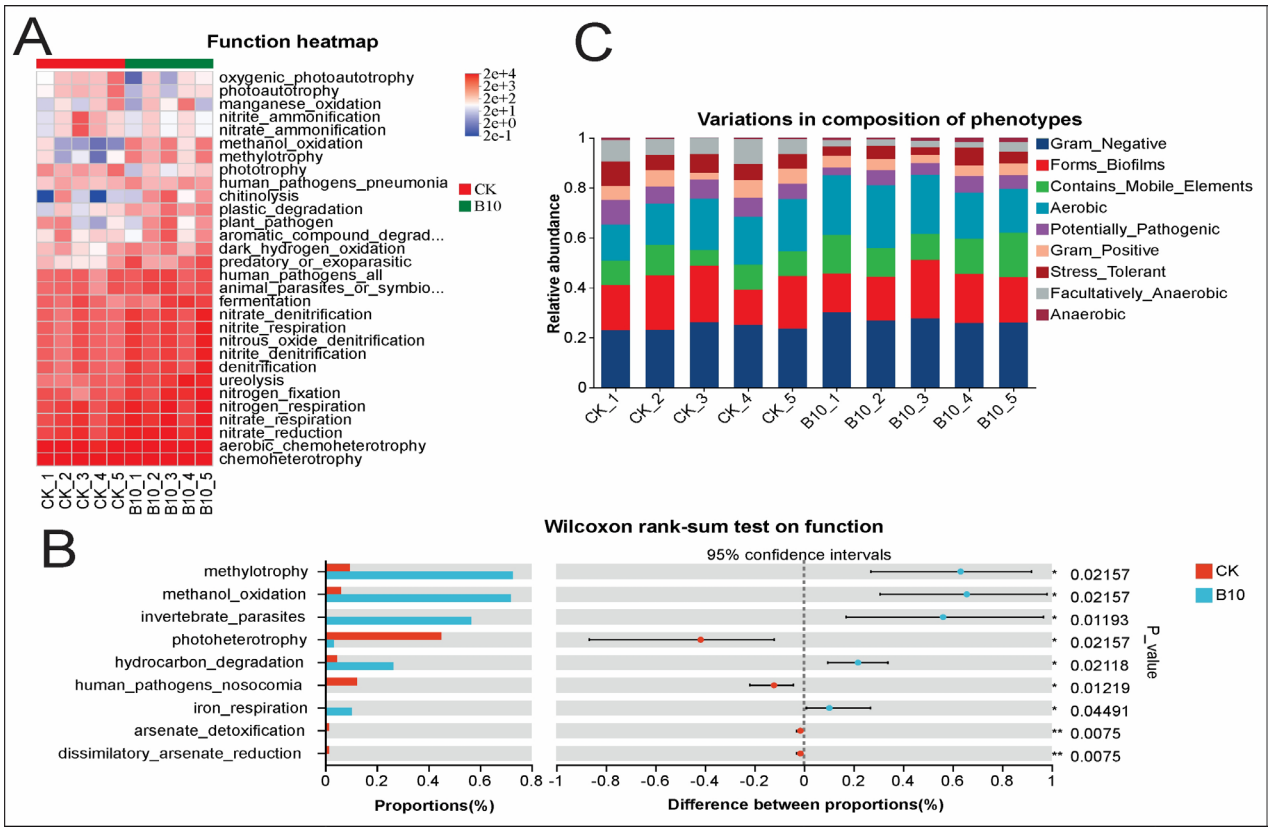


*(A) Spearman correlation heatmap showing relationships between bacterial taxa and rice growth traits; (B) Linear regression analysis between shoot dry weight and observed bacterial richness (Sobs); (C) Two-way correlation network diagram showing associations between shoot dry weight and bacterial taxa. Asterisks indicate significant correlations ($p < 0.05$, **p** < 0.01, **p** < 0.001)*

The two-way correlation network analysis showed significant associations between shoot dry weight (Shoot DW) and multiple bacterial OTUs (Fig. 5C). The network contained 46 nodes and 45 edges, with Shoot DW as the central node connected to all significant taxa. Network topology showed a diameter of 2, an average shortest path length of 1.96, and zero transitivity/clustering, indicating a simple star-like structure centered on plant performance rather than a highly interconnected microbial network. Consistent with the Spearman correlation results, several taxa were positively associated with Shoot DW, including Halomonas (OTU351, $r = 0.910$, $p < 0.001$), Paracoccus (OTU353, $r = 0.903$, $p < 0.001$), Bdellovibrio (OTU4359, $r = 0.897$, $p < 0.001$), *Azospirillum brasilense* Sp245 (OTU4806, $r = 0.880$, $p < 0.001$), *Delftia tsuruhatensis* (OTU4195, $r = 0.828$, $p = 0.003$), and another Azospirillum OTU (OTU4373, $r = 0.816$, $p = 0.004$). Positive links were also observed for unclassified Enterobacteriaceae, Lutispora, Bdellovibrio (OTU4347), and Flavisolibacter. In contrast, the strongest negative correlations with Shoot DW were found for *Methylorubrum extorquens* (OTU4089, $r = -0.890$, $p < 0.001$), Pontibacter (OTU4352, $r = -0.844$, $p = 0.002$), Adhaeribacter (OTU4127, $r = -0.829$, $p = 0.003$), Bacillus (OTU4257, $r = -0.804$, $p = 0.005$), and *Comamonas terrigena* (OTU884, $r = -0.766$, $p = 0.010$). Overall, the network indicates that taxa belonging mainly to Proteobacteria and Bdellovibrionota were positively linked with improved shoot dry weight, whereas several members of Firmicutes, Bacteroidota, and Cyanobacteria showed negative associations.

Functional prediction analysis

Figure 6
Functional potential and phenotype distribution of rhizosphere bacterial communities



Functional annotation based on FAPROTAX; (B) comparison of significantly different functional groups; (C) BugBase phenotype composition. Asterisks indicate significant differences ($p < 0.05$, $p < 0.01$, $p < 0.001$).

Integrated FAPROTAX analysis revealed a clear functional separation between B10 and CK (Fig.6A,B). Relative to CK, B10 was significantly enriched in predicted functions associated with carbon utilization and respiratory activity, including methanol oxidation and methylotrophy (both p = 0.02157), plastic degradation (p = 0.01219), hydrocarbon degradation (p = 0.02118), and iron respiration (p = 0.04491). By contrast, CK was significantly associated with phototrophy-related functions, including phototrophy (p = 0.02157), photoautotrophy and oxygenic photoautotrophy (both p = 0.03671), as well as cyanobacteria and ammonification-related functions (both p = 0.03671). These results support that B10 established a functionally superior rhizosphere environment compared with CK.

The predicted phenotype composition differed markedly between treatments, with B10 favoring a more aerobic and Gram-negative community, while suppressing several undesirable phenotypes relative to CK (Fig.6C). Specifically, B10 had significantly higher proportions of Gram-negative, aerobic, anaerobic, and mobile-element-containing bacteria, whereas CK was enriched in facultatively anaerobic, biofilm-forming, Gram-positive, potentially pathogenic, and stress-tolerant phenotypes. Notably, the lower abundance of potentially pathogenic (p = 0.0046) and stress-tolerant (p = 0.0052) phenotypes in B10 suggests that inoculation with the ten-bacterial consortium reshaped the rhizosphere toward a more favorable microbial phenotype profile than the uninoculated control.

In the present pot experiment, inoculation with the ten-bacterial consortium (B10) significantly promoted early rice growth, increasing shoot dry weight by 50.7% (0.446 vs. 0.296 g), shoot height

from 43.3 to 51.2 cm, stem height from 17.6 to 20.2 cm, and fresh weight from 2.1 to 3.1 g after 31 days (Fig. 2A). At the same time, bacterial richness did not differ significantly between treatments (Fig. 3A), whereas β-diversity and taxonomic composition shifted markedly (Fig. 3B), with enrichment of Proteobacteria and Bdellovibrionota, reduction of Firmicutes, and positive correlations of Azospirillum, Delftia, Paracoccus, Bdellovibrio, Halomonas, and related OTUs with shoot performance (Fig. 5). These results indicate that the growth-promoting effect of B10 was associated less with a general increase in microbial richness than with selective restructuring of the rhizosphere community toward taxa linked to improved plant performance. This interpretation is strengthened by the inoculant detection data: only part of the introduced taxa showed clear enrichment, and Halomonas was the only inoculated member with a strong treatment-specific signal (Fig. 4E), whereas Pseudomonas and Enterobacter increased only weakly and Bacillus was more abundant in CK (Fig. 4A-D), suggesting that the observed plant response cannot be explained simply by persistence of all introduced strains, but rather by consortium-driven reassembly of a functionally favorable microbiome (Sherpa et al., 2021). This pattern is consistent with previous studies showing that rice bacterial consortia can enhance plant growth and agronomic traits, as reported for native rhizobacterial consortia under organic rice cultivation, and that inoculation may simultaneously reshape the associated microbiome, as shown for *Azospirillum* sp. B510, which recruited other N_2-fixing bacteria and altered bacterial community structure under field conditions (Yasuda et al., 2022). It also agrees with field evidence that coinoculation with growth-promoting bacteria can improve nitrogen-use efficiency in irrigated rice, supporting the practical value of multistrain inoculants beyond single-strain effects (Turino Mattos et al., 2023). More recent SynCom work in rice further suggests that rational selection of small, functionally complementary communities can improve biomass and nutrient acquisition through multiple pathways (Ma et al., 2024), which provides a useful framework for future refinement of the B10 consortium. Because the present study was conducted at the seedling stage under pot conditions, the next step should be to test whether these early microbiome shifts persist through later developmental stages and translate into stable yield benefits under field conditions.

These functional predictions suggest that B10 did not merely alter taxonomic composition, but redirected the rhizosphere microbiome toward functions more closely associated with nutrient turnover and active heterotrophic metabolism, especially nitrogen fixation, nitrate reduction, denitrification, methanol oxidation, methylotrophy, ureolysis, and chemoheterotrophy. In contrast, the greater representation of phototrophy-, photoautotrophy-, cyanobacteria-, and ammonification-related functions in CK suggests that the uninoculated rhizosphere retained a less plant-beneficial functional profile than the B10 treatment. The BugBase results strengthen this interpretation by showing that B10 was associated with reduced potentially pathogenic and stress-tolerant phenotypes, indicating that consortium inoculation promoted a functionally and ecologically more favorable rhizosphere environment, which is consistent with the improved rice growth observed in the B10 treatment.

Conclusion

This study demonstrates that a consortium composed of high-abundance B10 can enhance rice growth and reshape the rhizosphere microbiome. Compared with the uninoculated CK, B10 significantly increased dry biomass, fresh weight, shoot height, and stem height, confirming a clear plant growth-promoting effect under pot conditions. Although inoculation did not significantly change bacterial richness, it strongly altered community structure and favored the enrichment of taxa positively associated with plant performance, including *Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Delftia*, *Paracoccus*, and *Bdellovibrio*. At the same time, several taxa negatively correlated with growth declined in relative abundance. B10 established a functionally superior predicted rhizosphere microbiome compared with CK, supporting its potential as an effective rice growth-promoting bacterial consortium. These results suggest that the beneficial effect of the consortium was mediated not only by direct colonization of introduced strains but also by broader microbiome modulation in the rice rhizosphere. B10 represents a promising candidate microbial inoculant for sustainable rice production. However, further work is needed to validate its performance under field conditions, determine the stability of its effects across growth stages, and confirm the biosafety of the selected strains before practical application.

Funding

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (AP26193911). Also supported by the Tianjin Municipal Science and Technology Program (23YFYSHZ00050, 24PTLYHZ00300), the Central Guidance Fund for Local Scientific and Technological Development (Establishment and key technologies of agricultural microbial resource library of Xinjiang, 2024YD009), the Xinjiang Agricultural Microorganisms and Fertilizer Creation Key Laboratory Open Project (SYS2024-01), the Tianjin Synthetic Biotechnology Innovation Capacity Improvement Project (TSBICIP-BRFI-009, TSBICIP-IJCP-001).

References

Bertani, G. (1951). Studies on lysogenesis. I. The mode of phage liberation by lysogenic Escherichia coli. *Journal of Bacteriology, 62*(3), 293–300. https://doi.org/10.1128/jb.62.3.293-300.1951

de Wet, M. M., & Brink, H. G. (2021). Fungi in the bioremediation of toxic effluents. In V. K. Sharma, M. P. Shah, S. Parmar, & A. Kumar (Eds.), *Fungi bio-prospects in sustainable agriculture, environment and nano-technology* (pp. 407–431). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821925-6.00009-5

Doyle, J. E., Mehrhof, W. H., & Ernst, R. R. (1968). Limitations of thioglycolate broth as a sterility test medium for materials exposed to gaseous ethylene oxide. *Applied Microbiology, 16*(11), 1742–1744. https://doi.org/10.1128/am.16.11.1742-1744.1968

Etesami, H., & Alikhani, H. A. (2016). Co-inoculation with endophytic and rhizosphere bacteria allows reduced application rates of N-fertilizer for rice plant. *Rhizosphere, 2*, 5–12. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2016.09.003

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2003). The International Year of Rice: Background. *International Rice Commission Newsletter, 52*. https://www.fao.org/4/Y5167E/y5167e02.htm

Fukagawa, N. K., & Ziska, L. H. (2019). Rice: Importance for global nutrition. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology, 65*(Supplement), S2–S3. https://doi.org/10.3177/jnsv.65.S2

Huang, K., Yin, H., Zheng, Q., Lv, W., Shen, X., Ai, M., & Zhao, Y. (2024). Microbial inoculation alters rhizoplane bacterial community and correlates with increased rice yield. *Pedobiologia, 104*, Article 150945. https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2024.150945

Islam, T., Fatema, Hoque, M. N., Gupta, D. R., Mahmud, N. U., Sakif, T. I., & Sharpe, A. G. (2023). Improvement of growth, yield and associated bacteriome of rice by the application of probiotic Paraburkholderia and Delftia. *Frontiers in Microbiology, 14*, Article 1212505. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1212505

Li, P., Tian, Y., Yang, K., Tian, M., Zhu, Y., Chen, X., Hu, R., Qin, T., Liu, Y., Peng, S., Yi, Z., Liu, Z., Ao, H., & Li, J. (2024). Mechanism of microbial action of the inoculated nitrogen-fixing bacterium for growth promotion and yield enhancement in rice (Oryza sativa L.). *Advanced Biotechnology, 2*, Article 32. https://doi.org/10.1007/s44307-024-00038-4

Ma, H., Zhang, H., Zheng, C., Liu, Z., Wang, J., Tian, P., Wu, Z., & Zhang, H. (2024). Synthetic microbial community isolated from intercropping system enhances P uptake in rice. *International Journal of Molecular Sciences, 25*(23), Article 12819. https://doi.org/10.3390/ijms252312819

Moronta-Barrios, F., Gionechetti, F., Pallavicini, A., Marys, E., & Venturi, V. (2018). Bacterial microbiota of rice roots: 16S-based taxonomic profiling of endophytic and rhizospheric diversity, endophytes isolation and simplified endophytic community. *Microorganisms, 6*(1), Article 14. https://doi.org/10.3390/microorganisms6010014

Perchetti, G. A., Huang, M. L., Peddu, V., Jerome, K. R., & Greninger, A. L. (2020). Stability of SARS-CoV-2 in phosphate-buffered saline for molecular detection. *Journal of Clinical Microbiology, 58*(8), Article e01094-20. https://doi.org/10.1128/JCM.01094-20

Ríos-Ruiz, W. F., Torres-Chávez, E. E., Torres-Delgado, J., Rojas-García, J. C., Bedmar, E. J., & Valdez-Nuñez, R. A. (2020). Inoculation of bacterial consortium increases rice yield (Oryza sativa L.) reducing applications of nitrogen fertilizer in San Martin region, Peru. *Rhizosphere, 14*, Article 100200. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100200

Sherpa, M. T., Sharma, L., Bag, N., & Das, S. (2021). Isolation, characterization, and evaluation of native rhizobacterial consortia developed from the rhizosphere of rice grown in organic state Sikkim, India, and their effect on plant growth. *Frontiers in Microbiology, 12*, Article 713660. https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.713660

Turino Mattos, M. L., Valgas, R. A., & da Silva Martins, J. F. (2023). Coinoculation with growth-promoting bacteria increases the efficiency of nitrogen use by irrigated rice. *ACS Omega, 8*(51), 48719–48727. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c05339

Wang, J., Zhao, S., Xu, S., Zhao, W., Zhang, X., Lei, Y., Zhai, H., & Huang, Z. (2023). Co-inoculation of antagonistic Bacillus velezensis FH-1 and Brevundimonas diminuta NYM3 promotes rice growth by regulating the structure and nitrification function of rhizosphere microbiome. *Frontiers in Microbiology, 14*, Article 1101773. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1101773

Xiao, X., Zhu, Y., Gao, C., Zhang, Y., Gao, Y., & Zhao, Y. (2022). Microbial inoculations improved rice yields by altering the presence of soil rare bacteria. *Microbiological Research, 254*, Article 126910. https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126910

Yang, J., Lu, X., Hao, B., Wang, S., Kong, L., Shao, Q., Li, W., Wang, X., Xu, Y., Wu, W., Wang, J., Yan, L., Ren, L., & Chen, G. (2025). Bio-organic fertilizers reshape rhizosphere bacterial community and enhance crop productivity in reclaimed soil. *Frontiers in Microbiology, 16*, Article 1713125. https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1713125

Yasuda, M., Dastogeer, K. M. G., Sarkodee-Addo, E., Tokiwa, C., Isawa, T., Shinozaki, S., & Okazaki, S. (2022). Impact of Azospirillum sp. B510 on the rhizosphere microbiome of rice under field conditions. *Agronomy, 12*(6), Article 1367. https://doi.org/10.3390/agronomy12061367

Information about the authors:

Bekzhan D. Kossalbayev – PhD, Associate Professor, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: kossalbayev.bekzhan@gmail.com).

Mingda Lyu – Master's student, Tianjin Institute of Industrial Biotechnology, Chinese Academy of Sciences (Tianjin, China, e-mail: lvmingda@tib.cas.cn).

Assemgul K. Sadvakasova – Candidate of Biological Sciences, Professor, Department of Biotechnology, Faculty of Biology and Biotechnology, al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: asem182010@gmail.com).

Dilnaz E. Zaletova – PhD student, Department of Biotechnology, Faculty of Biology and Biotechnology, al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: zaletova_dilnaz@mail.ru).

Meruyert O. Bauenova – PhD, Associate Professor, Department of Biotechnology, Faculty of Biology and Biotechnology, al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: bauyen.meruyert@gmail.com).

Dinar Kelden – Specialist, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: dinarkeldenkyzy@gmail.com).

Jingjing Wang – Professor, Tianjin Institute of Industrial Biotechnology, Chinese Academy of Sciences (Tianjin, China, e-mail: wang_jj@tib.cas.cn).

Zhiyong Huang – Professor, Tianjin Institute of Industrial Biotechnology, Chinese Academy of Sciences (Tianjin, China, e-mail: huang_zy@tib.cas.cn).

Авторлар туралы мәлімет:

Бекжан Д. Қосалбаев – PhD, Satbayev University-нің химиялық және биологиялық инженерия кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Алматы, Қазақстан, e-mail: kossalbayev.bekzhan@gmail.com).

Мингда Лиу – Қытай ғылым академиясының Тяньцзинь өнеркәсіптік биотехнология институтының магистранты (Тяньцзинь, Қытай, e-mail: lvmingda@tib.cas.cn).

Асемгуль К. Садвакасова – биология ғылымдарының кандидаты, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің биология және биотехнология факультеті биотехнология кафедрасының профессоры (Алматы, Қазақстан, e-mail: asem182010@gmail.com).

Дильназ Е. Залетова – әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің биология және биотехнология факультеті биотехнология кафедрасының PhD докторанты (Алматы, Қазақстан, e-mail: zaletova_dilnaz@mail.ru).

Меруерт Ө. Бауенова – PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің биология және биотехнология факультеті биотехнология кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Алматы, Қазақстан, e-mail: bauyen.meruyert@gmail.com).

Динар Келден – Satbayev University-нің химиялық және биологиялық инженерия кафедрасының маманы (Алматы, Қазақстан, e-mail: dinarkeldenkyzy@gmail.com).

Жингжинг Ван – Қытай ғылым академиясының Тяньцзинь өнеркәсіптік биотехнология институтының профессоры (Тяньцзинь, Қытай, e-mail: wang_jj@tib.cas.cn).

Жиуонг Хуанг – Қытай ғылым академиясының Тяньцзинь өнеркәсіптік биотехнология институтының профессоры (Тяньцзинь, Қытай, e-mail: huang_zy@tib.cas.cn).

Сведения об авторах:

Бекжан Д. Косалбаев – PhD, ассоциированный профессор кафедры химической и биологической инженерии, Satbayev University (Алматы, Казахстан, e-mail: kossalbayev.bekzhan@gmail.com).

Мингда Лиу – магистрант Тяньцзиньского института промышленной биотехнологии Китайской академии наук (Тяньцзинь, Китай, e-mail: lvmingda@tib.cas.cn).

Асемгуль К. Садвакасова – кандидат биологических наук, профессор кафедры биотехнологии факультета биологии и биотехнологии Казахского национального университета имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: asem182010@gmail.com).

Дильназ Е. Залетова – докторант PhD кафедры биотехнологии факультета биологии и биотехнологии Казахского национального университета имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: zaletova_dilnaz@mail.ru).

Меруерт О. Бауенова – PhD, ассоциированный профессор кафедры биотехнологии факультета биологии и биотехнологии Казахского национального университета имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: bauyen.meruyert@gmail.com).

Динар Келден – специалист кафедры химических и биологических технологий, Satbayev University (Алматы, Казахстан, e-mail: dinarkeldenkyzy@gmail.com).

Жингжинг Ван – профессор Тяньцзиньского института промышленной биотехнологии Китайской академии наук (Тяньцзинь, Китай, e-mail: wang_jj@tib.cas.cn).

Жиуонг Хуанг – профессор Тяньцзиньского института промышленной биотехнологии Китайской академии наук (Тяньцзинь, Китай, e-mail: huang_zy@tib.cas.cn).

Received May 21, 2026
Accepted September 23, 2026

IRSTI 34.35.25 https://doi.org/10.26577/EJE208830626

A. Mamirova[1]* , N. Akhmetalina[1] , A. Assan[2] ,
A. Baubekova[1] , N. Ermekova[1] , A. Nurmagambetova[3] ,
R. Berzhanova[1] , V. Pidlisnyuk[4]

[1]Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
[2]Satbaev University, Almaty, Kazakhstan
[3]Institute of Plant Biology and Biotechnology, Almaty, Kazakhstan
[4]Jan Evangelista Purkyne University, Usti nad Labem, Czech Republic
*e-mail: aigerim.mamirova@mail.com

RECHAR-M2C: MICROBIAL ISOLATION FROM LEGACY-CONTAMINATED SOILS

The present study aimed to isolate Zn-solubilising and metal-tolerant microbial strains from legacy-contaminated soils affected by potentially toxic elements (PTEs), persistent organic pollutants (POPs), or their combination. A total of 242 microbial strains were isolated. Subsequent sequential screening for Zn-solubilisation potential identified 13 isolates with solubilisation indices exceeding 1.5. Of these, four isolates (S21, S56, TA5, and TE32) exhibited strong tolerance to 0.03–0.06% Zn, with relative growth intensities (RGIs) ranging from 86.6% to 104%, while S56 and TE32 maintained sufficient tolerance at a Zn concentration of 0.12%. Regarding Ni tolerance, only TE32 exhibited sufficient resistance at a Ni concentration of 0.03%, with an RGI of 47.2%. For Cu tolerance, isolates S21, S56, and TE32 demonstrated strong resistance at a Cu concentration of 0.03%, with RGIs of 92.8%, 82.4%, and 79.6%, respectively. Furthermore, TE32 maintained sufficient tolerance at 0.06% Cu, with an RGI of 63.0%. Based on these results, three isolates (S21, S56, and TE32) were selected for comprehensive characterisation of their enzymatic (amylolytic, cellulolytic, lipolytic, and proteolytic) and plant growth-promoting traits, including siderophore, extracellular polymeric saccharide (EPS), and indole-3-acetic acid (IAA) production. Strain S21 exhibited moderate proteolytic activity, siderophore production, and superior IAA synthesis, reaching a peak concentration of 38.7 ± 3.29 μg mL^{-1}. Strain S56 demonstrated moderate proteolytic activity, strong lipolytic and proteolytic activities, siderophore production, and moderate IAA synthesis, with a maximum concentration of 17.5 ± 1.48 μg mL^{-1}. In contrast, strain TE32 exhibited strong amylolytic activity, proteolytic activity, EPS production, and the lowest IAA-producing capacity, reaching a peak concentration of 12.8 ± 0.88 μg mL^{-1}. Future research will focus on the development of microbe–biochar complexes through the immobilisation of microbial cells onto biochar surfaces, followed by validation of the developed complexes in marginal and/or contaminated soils to enhance plant growth.

Keywords: legacy soil contamination, potentially toxic elements, Zn-solubilising microorganisms, tolerance to heavy metals, plant growth-promoting microorganisms.

А. Мамирова[1]*, Н. Ахметалина[1], А. Асан[2], А. Баубекова[1],
Н. Ермекова[1], А. Нурмагамбетова[3], Р. Бержанова[1], V. Pidlisnyuk[4]

[1] Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан
[2] Қ.И. Сатпаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан
[3] Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институты, Алматы, Қазақстан
[4] Яна Евангелиста Пуркине Университеті, Усти над Лабем, Чехия Республикасы
*e-mail: aigerim.mamirova@mail.com

Rechar-M2C: тарихи ластанған топырақтардан микроорганизмдерді бөліп алу

Осы зерттеудің мақсаты потенциалды уытты элементтердің (ПУЭ), тұрақты органикалық ластағыштардың (ТОЛ) немесе олардың комбинациясының әсеріне ұшыраған тарихи ластанған топырақтардан Zn ерітуге қабілетті және металдарға төзімді микробтық штамдарды бөліп алу болды. Барлығы 242 микробтық штамм бөлініп алынды. Кейінгі дәйекті скрининг нәтижесінде Zn солюбилизациялау әлеуеті бойынша солюбилизация индекстері 1,5-тен жоғары 13 изолят анықталды. Олардың ішінде төрт изолят (S21, S56, TA5 және TE32) 0,03–0,06% Zn жағдайында жоғары төзімділік көрсетті, салыстырмалы өсу қарқындылығы (RGI) 86,6%-дан 104%-ға дейін өзгерді, ал S56 және TE32 изоляттары Zn концентрациясы 0,12% болған жағдайда да жеткілікті төзімділікті сақтады. Ni-ге төзімділікке қатысты, тек TE32 изоляты Ni концентрациясы 0,03%

 © 2026 Al-Farabi Kazakh National University

болғанда жеткілікті төзімділік көрсетті, оның RGI мәні 47,2% құрады. Cu-ге төзімділік бойынша S21, S56 және TE32 изоляттары Cu концентрациясы 0,03% болғанда жоғары төзімділік танытты, олардың RGI мәндері тиісінше 92,8%, 82,4% және 79,6% болды. Сонымен қатар, TE32 изоляты 0,06% Cu жағдайында да жеткілікті төзімділікті сақтап, RGI мәні 63,0% құрады. Осы нәтижелер негізінде үш изолят (S21, S56 және TE32) олардың ферментативтік қасиеттерін (амилолитикалық, целлюлолитикалық, липолитикалық және протеолитикалық белсенділіктерін), сондай-ақ өсімдік өсуін ынталандыратын белгілерін, соның ішінде сидерофорлар, жасушадан тыс полимерлік сахаридтер (EPS) және индол-3-сірке қышқылы (ИСҚ) өндіру қабілетін кешенді сипаттау үшін таңдап алынды. S21 штаммы орташа протеолитикалық белсенділік, сидерофорлар өндіру қабілеті және ИСҚ синтезінің ең жоғары деңгейін көрсетті, оның ең жоғары концентрациясы 38,7 ± 3,29 мкг/мл болды. S56 штаммы орташа протеолитикалық белсенділік, күшті липолитикалық және протеолитикалық белсенділіктер, сидерофорлар өндіру қабілеті және орташа ИСҚ синтезін көрсетті, ең жоғары концентрациясы 17,5 ± 1,48 мкг/мл құрады. Ал TE32 штаммы күшті амилолитикалық белсенділік, протеолитикалық белсенділік, EPS өндіру қабілеті және ИСҚ өндірудің ең төмен әлеуетін көрсетті, оның ең жоғары концентрациясы 12,8 ± 0,88 мкг/мл болды. Болашақ зерттеулер микробтық жасушаларды биокөмір бетіне иммобилизациялау арқылы микроб–биокөмір кешендерін әзірлеуге, кейін әзірленген кешендерді өсімдіктердің өсуін күшейту мақсатында өнімділігі төмен және/немесе ластанған топырақтарда валидациялауға бағытталатын болады.

Түйін сөздер: тарихи ластанған топырақ, потенциалды уытты элементтер, Zn еріту қабілеті бар микроорганизмдер, ауыр металдарға төзімділік, өсімдік өсуін ынталандыратын микроорганизмдер.

А. Мамирова[1]*, Н. Ахметалина[1], А. Асан[2], А. Баубекова[1],
Н. Ермекова[1], А. Нурмагамбетова[3], Р. Бержанова[1], V. Pidlisnyuk[4]
[1]Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан
[2]Казахский национальный исследовательский технический университет
им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан
[3]Институт биологии и биотехнологии растений, Алматы, Казахстан
[4]Университет Яна Евангелиста Пуркине, Усти-над-Лабем, Чешская Республика
*e-mail: aigerim.mamirova@mail.com

Rechar-M2c: выделение микроорганизмов из почв с историческим загрязнением

Целью данного исследования было выделение из почв с историческим загрязнением, подвергшихся воздействию потенциально токсичных элементов (ПТЭ), стойких органических загрязнителей (СОЗ) или их сочетания, микробных штаммов, способных солюбилизировать Zn и обладающих толерантностью к металлам. Всего было выделено 242 микробных штамма. Последующий последовательный скрининг на Zn-солюбилизирующую активность позволил выявить 13 изолятов с индексами солюбилизации выше 1,5. Среди них четыре изолята (S21, S56, TA5 и TE32) проявили высокую толерантность к 0,03–0,06% Zn, при этом относительная интенсивность роста (RGI) варьировала от 86,6% до 104%, тогда как S56 и TE32 сохраняли достаточную толерантность при концентрации Zn 0,12%. Что касается толерантности к Ni, только TE32 проявил достаточную устойчивость при концентрации Ni 0,03%, с RGI 47,2%. В отношении толерантности к Cu изоляты S21, S56 и TE32 продемонстрировали высокую устойчивость при концентрации Cu 0,03%, с RGI 92,8%, 82,4% и 79,6% соответственно. Кроме того, TE32 сохранял достаточную толерантность при 0,06% Cu, с RGI 63,0%. На основании полученных результатов три изолята (S21, S56 и TE32) были отобраны для комплексной характеристики их ферментативных свойств (амилолитической, целлюлолитической, липолитической и протеолитической активности), а также признаков, способствующих росту растений, включая продукцию сидерофоров, внеклеточных полимерных сахаридов (ЭПС) и индол-3-уксусной кислоты (ИУК). Штамм S21 проявил умеренную протеолитическую активность, способность к продукции сидерофоров и наиболее выраженный синтез ИУК, достигая максимальной концентрации 38,7 ± 3,29 мкг/мл. Штамм S56 продемонстрировал умеренную протеолитическую активность, выраженную липолитическую и протеолитическую активности, продукцию сидерофоров и умеренный синтез ИУК, с максимальной концентрацией 17,5 ± 1,48 мкг/мл. В отличие от них, штамм TE32 проявил выраженную амилолитическую активность, протеолитическую активность, продукцию ЭПС и наименьшую способность к продукции ИУК, достигая максимальной концентрации 12,8 ± 0,88 мкг/мл. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку микробно-биочарных комплексов посредством иммобилизации микробных клеток на поверхности биочара с последующей валидацией разработанных комплексов в деградированных и/или загрязнённых почвах для оптимизации развития растений.

Ключевые слова: историческое загрязнение почв, потенциально токсичные элементы, Zn-солюбилизирующие микроорганизмы, толерантность к тяжёлым металлам, микроорганизмы, способствующие росту растений.

Introduction

Extensive research is currently focused on the restoration of degraded, marginal, and contaminated lands in response to the United Nations report on the status of the Sustainable Development Goals (SDGs). As of 14 June 2025, SDG target 15.3, which aims to restore degraded lands, was classified as showing regression (UN, 2025), highlighting the urgent need to develop effective and sustainable solutions capable of reversing this negative trend and, at a minimum, preventing further deterioration.

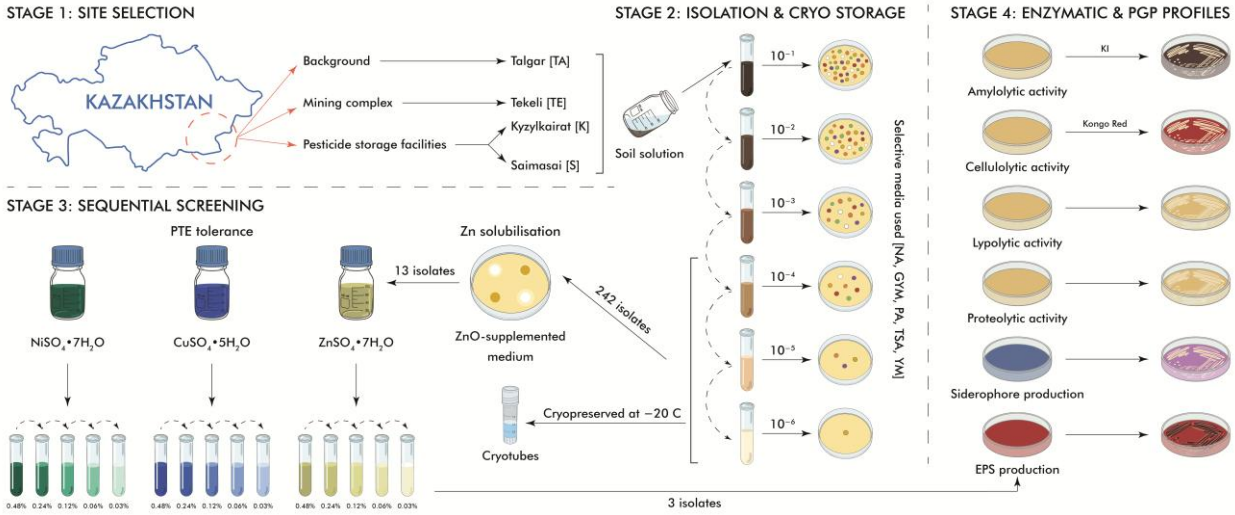
These challenges coincide with the broader evolution of resource management concepts. Since the introduction of the term "value chain" by Porter (1985), originally describing the creation of value-added products through continuous reintegration into biological or technical cycles (D'heur, 2015), the concept has been increasingly adopted within scientific research (Althuri & Venkata Mohan, 2022; Aso, 2020; Carvalho et al., 2021; Casarejos et al., 2018). In parallel, the concept of the bioeconomy, introduced by the European Commission in 2012, promoted resource recovery and reuse in place of dependence on external raw materials (European Commission & Directorate-General for Research and Innovation, 2012). These developments have accelerated the transition from a linear to a circular economic model (Khaw-ngern et al., 2021; Corona et al., 2019; European Commission et al., 2021; Khaw-ngern et al., 2021; Wiesmeth, 2021). Simultaneously, phytoremediation, as one of the most promising sustainable and economically feasible technology, has progressively evolved into the broader concept of phytomanagement (Evangelou et al., 2015; Stephenson & Black, 2014), which integrates environmental restoration with the production of economically valuable biomass. Furthermore, during the past decade, the technology has evolved towards microbe-assisted and biochar-assisted phytoremediation (Nurzhanova et al., 2025, 2026; Pidlisnyuk et al., 2020, 2022; Pidlisnyuk, Newton, et al., 2025). Despite its considerable potential for restoring contaminated soils, increasing concern has been raised regarding the annual generation of post-phytoremediation biomass, often referred to as "waste" or "unconditioned" biomass. The need for careful management of this biomass was first emphasised by Song & Park (2017), who called for the development of policies addressing "post-phytoremediation management". This was subsequently reinforced by numerous studies highlighting the necessity of implementing sustainable post-harvest management strategies (A.H. A. Khan et al., 2023; Priya et al., 2023; Tan et al., 2023). Such concerns are particularly relevant because biomass harvested from potentially toxic element (PTE)-contaminated sites may contain elevated concentrations of PTEs (Pidlisnyuk, Mamirova, et al., 2025).

Therefore, it has been proposed that post-phytoremediation biomass could instead be valorised through conversion into biochar and subsequently reused on contaminated soils to improve soil health and promote plant development (Pidlisnyuk, Mamirova, et al., 2025). Although numerous studies have demonstrated that biochar application improves soil fertility, enhances nutrient availability, stimulates microbial abundance, and promotes plant growth (Fox et al., 2016; Houben et al., 2014; W.-D. Khan et al., 2017; Mierzwa-Hersztek et al., 2017), several important limitations remain (Brtnicky et al., 2021; Ding et al., 2016). Among these, the most critical is the desorption of toxic substances, particularly PTEs, which may result in secondary contamination (2C) (Ding et al., 2016; George, 2022). Consequently, when post-phytoremediation biomass is converted into biochar, the potential risk of 2C must be carefully considered. Recent studies have demonstrated that Miscanthus-derived biochar may contain elevated concentrations of Mn, Zn, and Sr (Kononchuk et al., 2022; Pidlisnyuk, Newton, et al., 2025). Although Zn is an essential micronutrient for plant growth, excessive concentrations induce phytotoxicity, forcing plants to divert resources from development towards defence responses and activation of avoidance strategies (Rai et al., 2019; Robb, 2013). Consequently, the incorporation of Zn-enriched waste-derived biochar into soil may create a substantial risk of 2C, potentially reducing biomass productivity and impairing the phytoremediation process. Indeed, recent evidence has demonstrated that biochar produced from waste biomass may release Cu and Zn into soil, thereby creating an additional environmental concern (Nurzhanova et al., 2025). Mitigation of this risk therefore requires the development of effective biochar conditioning strategies before its application. A review of the available literature revealed remarkably limited research addressing the prevention of 2C associated with contaminated biochar. One of the few reported approaches involved loading nano zero-valent iron

onto biochar followed by re-pyrolysis to stabilise Cr and reduce its bioavailability (Fan et al., 2019).

To address this knowledge gap, the project "ReChar-M2C", officially entitled AP23490702 "Development of Biochar Decontamination Technology for Sustainable Waste Biomass Conversion into Value-Added Products", was initiated to develop a microbial biochar reconditioning technology aimed at preventing secondary contamination through biochar decontamination. The proposed approach is based on reducing the metal or PTE load in biochar by exploiting the metal-leaching capacity of selected microbial isolates. The present study represents the first stage of this project and focuses on the isolation of Zn-solubilising and PTE-tolerant microorganisms from legacy-contaminated soils. Such environments were selected as potential reservoirs of microorganisms possessing multiple desirable traits and capable of serving as biological agents for biochar de-metalisation (Figure 1).

Figure 1
Experimental workflow visualisation



Materials and methods

Soil Characterisation

Site Description

Four sites (Table 1) located in the Almaty and Zhetysu regions (Kazakhstan) were selected for microbial isolation based on previously reported contamination (Baubekova et al., 2021; Mamirova et al., 2022; Nurzhanova et al., 2025). At each site, an area of 25 m^2 was designated for sampling.

According to the World Reference Base for Soil Resources (IUSS Working Group WRB, 2022), soils from Sites 1–3 and Site 4 were classified as Chernozem and Kastanozems, respectively. Based on Köppen–Geiger classification (Beck et al., 2018; Kottek et al., 2006), the climate of Sites 1–4 was classified as *Dfa* (snow–fully humid–hot summer) in 2006 and *BSk* (arid–steppe–cold) in 2016.

Soil Collection

Soil sampling adhered to the ISO 18400–203:2018 (ISO 18400-203:2018, 2018) and ISO 18400–206:2018 (ISO 18400-206:2018, 2018) for chemical and microbiological analyses, respectively. Five samples were procured from investigated areas, with each sample taken from a 5 × 5 m^2 area at a depth of 0–0.6 m. Following sampling, collected soil was sieved (d = 3 mm) to remove the plant materials and stones, thoroughly homogenized, air-dried, and stored at 4 °C before passing for agrochemical and chemical analyses.

Table 1
Site description

Site		1	2	3	4
Designated name		TA	K	S	TE
Type of soil		Background	Complexly contaminated		PTE-contaminated
Sampling location	Territory	foot of Talgar Peak	–	–	–
	Village	–	Kyzylkairat	Saimasai	–
	City	Talgar	–	–	Tekeli
Region		Almaty			Zhetysu
GPS coordinates		43°16'36.0" N, 77°12'37.0" E	43°17'58.7" N, 77°11'39.6" E	43°27'19.5" N, 77°18'51.5" E	44°53'15" N, 78°37'34" E
Contamination	PTEs	✓	✓	✓	✓
	POPs	✗	✓	✓	✗
Contamination origin		✗	Former pesticide storage facility		Mining complex

Agrochemical Analysis

Agrochemical parameters of the research soils 1–4 were determined using standard methods: total organic content (TOC) – by Tyurin's method (ST RK 3477-2019, 2019); available phosphorus (P_2O_5) and potassium (K_2O) – by Machigin method in CRIAAS modification (GOST 26205-91, 1993); the absorbed bases of sodium (Na) and potassium (K) – by Antipov-Karataev and Mametov method in Grabarov modification; the absorbed bases of calcium (Ca) and magnesium (Mg) – by Arinushkin method in Grabarov modification; and the soil pH – in accordance with the GOST 26423-85 (GOST 26423-85, 2011). The agrochemical profiles of research soils are presented in Table 2.

Table 2
Agrochemical profiles of studied soils

Parameter	Unit	TA soil	K soil	S soil	TE soil	*p*-value
pH (H_2O)	–	7.79 ± 0.04 **a**	7.44 ± 0.03 **c**	7.64 ± 0.02 **b**	6.68 ± 0.06 **d**	< 0.001
TOC	%	1.23 ± 0.08 **c**	2.93 ± 0.02 **b**	2.81 ± 0.07 **b**	4.31 ± 0.03 **a**	< 0.001
P_2O_5	mg kg^{-1}	9.00 ± 1.00 **c**	19.0 ± 1.00 **b**	61.0 ± 1.00 **a**	21.0 ± 1.00 **b**	< 0.001
K_2O		115 ± 5.00 **d**	200 ± 0 **b**	340 ± 0 **a**	180 ± 0 **c**	< 0.001
NO_3		0.59 ± 0.02 **b**	1.66 ± 0.05 **a**	0.60 ± 0.05 **b**	0.58 ± 0.05 **b**	< 0.001
NH_4		1.35 ± 0.25 **c**	3.70 ± 0.60 **b**	1.50 ± 0.20 **c**	4.90 ± 0.50 **a**	< 0.001
Ca	mg Eq/100 g	13.3 ± 0.24 **c**	16.3 ± 0.73 **b**	10.7 ± 0 **d**	21.1 ± 0.24 **a**	< 0.001
Mg		1.70 ± 0.24 **b**	3.40 ± 0.97 **b**	13.8 ± 1.68 **a**	3.16 ± 0.25 **b**	< 0.001
Na		0.15 ± 0 **a**	0.15 ± 0 **a**	0.08 ± 0 **b**	0.15 ± 0 **a**	< 0.001
K		0.06 ± 0 **a**	0.06 ± 0 **a**	0.04 ± 0 **b**	0.06 ± 0 **a**	< 0.001

Notes: TA – Talgar; K – Kyzylkairat; S – Saimasai; TE – Tekeli; TOC – total organic carbon.

Determination of Potentially Toxic Elements Content

The determination of 8 elements (Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, and Pb) in soil samples was conducted using a mass spectrometer with inductively coupled plasma (ICP-MS) Agilent 7500 series (Agilent Technologies, Inc., USA) following ST RK ISO 11047–2008 (ST RK ISO 11047-2008, 2009) and GD 52.18.721-2009 (GD 52.18.721-2009, 2010). The decomposition of soil samples was performed in a microwave sample decomposition system Speedwave Four, Berghof, following the Soil EPA 3051A (US EPA 3051A, 2007) standard. For this purpose, a sample of soil weighing (1.0 ± 0.5 g) with

an accuracy of 4 digits was utilized. The samples were placed in a Teflon autoclave, to which 6.0 mL of concentrated nitric acid (HNO_3) and 1 mL of hydrogen peroxide (H_2O_2) were added. The Teflon autoclave was sealed and then put in a SpeedWave Four microwave digestion system. Afterwards, the samples were cooled to room temperature. The solution with the precipitate was transferred to a volumetric flask and brought to the 25.0 mL mark with bi-distilled water (dH_2O). The sample was filtered and subsequently analysed on a mass spectrometer.

In order to evaluate soil contamination levels in relation to PTEs, geo-accumulation index (I_{geo}), soil toxicity index (Z_{ci}), ecological risk factor (*ER*), and potential ecological risk index (*PERI*) were calculated.

Geo-accumulation index (I_{geo}) was used as common index for the assessment of soil pollution with PTEs (Saleem et al., 2024) and calculated using the following equation:

$$I_{geo} = log_2\left(\frac{C_i}{1.5 \times C_{g\varphi i}}\right) \quad (1)$$

where I_{geo} – geo-accumulation index; C_i – actual concentration of *i* element in soil (mg kg^{-1}); $C_{g\phi i}$ – geochemical background concentration of *i* element (mg kg^{-1}; Table 3) (Lide, 2005).

Soil toxicity index (Z_{ci}) was used as comprehensive method representing cumulative soil contamination (Vodyanitskii, 2010) and calculated as follows:

$$Z_{ci} = \Sigma(K_{Ci} \times K_{Ti} + \cdots + K_{cn} \times K_{Tn}) - (n-1) \quad (2)$$

$$K_C = C_i / C_{\varphi i} \quad (3)$$

where K_C – concentration coefficient of *i* element; K_T – toxicity coefficient of *i* element (Table 3); *n* – number of elements with K_c >1; C_i – actual concentration of *i* element (mg kg^{-1}); $C_{\phi i}$ – maximum permissible concentration of *i* element (mg kg^{-1}).

Ecological risk factor (E_R) was used as indicator of ecological risk for each PTE separately (Hakanson, 1980) and calculated as follows:

$$E_R = T_R \times C_{Fi} \quad (4)$$

$$C_{Fi} = C_i / C_{g\varphi i} \quad (5)$$

where T_R – toxic response factor of element (Table 3) (Hakanson, 1980; Siddig et al., 2025); C_{Fi} – contamination factor of element; C_i – actual concentration of *i* element in soil (mg kg^{-1}); $C_{g\phi i}$ – geochemical background concentration of *i* element (mg kg^{-1}; Table 3) (Lide, 2005).

Potential ecological risk index (PERI) was used as a comprehensive method representing cumulative toxicological effect and calculated as follows (Hakanson, 1980):

$$PERI = \sum_{i=1}^{n} E_R \quad (6)$$

Table 3
Values and scales used for estimation of soil contamination levels

PTE	MPC*	$C_{g\phi i}$	K_T	T_R	Scale	I_{geo}	Z_{ci}	E_R	*PERI*
Cr	90	102	1.5	2.00	Safe/low	< 1	< 16	< 40	< 150
Co	5.0	25.0	1.0	5.00	Moderate	> 1 < 3	> 16 < 32	> 40 < 80	> 150 < 300
Ni	20	84.0	1.5	5.00					
Cu	33	60.0	1.0	5.00	Considerable	–	> 32 < 128	> 80 < 160	> 300 < 600
Zn	55	70.0	1.5	1.00					
Cd	0.5	0.15	1.5	30.0	Heavy	> 3 < 5	–	> 160 < 320	–
As	2.0	1.80	1.5	10.0					
Pb	32 [a]	14.0	1.5	5.00	Extreme	> 5	> 128	> 320	> 600

*Notes: * – maximum permissible concentrations for mobile fractions of elements (mg kg^{-1}) (MH RK, 2021); [a] – MPC for total concentration; $C_{g\phi i}$ – geochemical background concentration of i element (mg kg^{-1}) (Lide, 2005); K_T – toxicity coefficient of i element (Vodyanitskii, 2010); T_R – toxic response factor of element (Hakanson, 1980; Siddig et al., 2025); I_{geo} – geo-accumulation index, contamination (Saleem et al., 2024); Z_{ci} – soil toxicity index, danger (Vyborov et al., 2004); E_R – ecological risk factor, risk (Hakanson, 1980); PERI – potential ecological risk index, risk (Hakanson, 1980).*

Determination of Persistent Organic Pollutants Content

POP-pesticides concentrations, including 21 compounds, were measured in studied soils in accordance with ST RK 2131-2011 (ST RK 2131-2011, 2012). The analysed compounds included DDT metabolites (2.4′-DDD, 4.4′-DDD, 4.4′-DDE, and 4.4′-DDT), HCH isomers (α−, β−, γ−, and δ−), aldrin, chlordane, dieldrin, dicofol, endosulfan (α and β), endosulfan sulfate, endrin, endrin aldehyde, hexachlorobenzene (HCB), heptachlor, heptachlor epoxide, and methoxychlor. Analyses were performed using a Gas Chromatograph 6890N with an Electron Capture Detector (Agilent Technologies, Inc., USA) equipped with a Combi-PAL autosampler (CTC Analytics AG, Switzerland).

To extract POPs, 10 g of the sample was placed in a stopper 200 mL flask, 20 mL of n-hexane was added, and the mixture was shaken for 24 h. The volume of the obtained extract was measured and concentrated to 1 mL. The extract was placed in a 50-mL conical flask, 5-10 mL of *n*-hexane was added, and the flask was stirred for 30 min in a mixer. The resulting extract was filtered through filter paper, measured, and concentrated to 1 mL. 1 μL volume of the finalized extract was injected using an autosampler for introducing a sample to be heated to 250°C. For separation, a capillary column DB−35MS (Agilent Technologies, Inc., USA) with a length of 30 m, internal diameter of 0.25 mm, and 0.25 mm thick film was used. The carrier gas (helium mark "A") was fed with a continuous flow rate of 1.0 mL min^{-1} (corresponding to an average linear flow velocity of 36 cm s^{-1}). The temperature of the thermostat column was programmed to heat up from 40°C (hold time 1 min) to 160°C (hold time 3 min) at a heating rate of 20°C min^{-1}, followed by further heating to 250°C (hold time 5 min) at 3°C min^{-1}. Detection was conducted by an electron capture device. For quantitative determination of POPs, calibration plots were obtained over a concentration range of 1–500 ng L^{-1}. The chromatography results were processed using MSD ChemStation software E.02.02 SP1.

Microbial Isolation & Cryopreservation

Upon arrival at the laboratory, the collected soil samples were air-dried at room temperature, sieved (d = 2 mm), and processed according to the procedure described by McPherson et al. (McPherson et al., 2018). Microorganisms were isolated using a serial dilution technique on different agar media (Janati et al., 2022). The sieved soil (10 g) was suspended in 90 mL sterile phosphate-buffered saline (PBS, pH 7.2) and shaken at 150 rpm for 2 h. The resulting suspension was subsequently diluted by transferring 1 mL into 9 mL of 0.1% peptone water to obtain serial dilutions ranging from 10^{-1} to 10^{-6}. Aliquots (0.1 mL) of each dilution were plated onto Nutrient agar (NA), Tryptic soy agar (TSA), Pseudomonas agar (PA), Glucose yeast malt agar (GYM), and Yeast malt agar (YM) media (Table 4).

Inoculated plates were incubated at 28–30 °C for 48 h. Morphologically distinct colonies were selected and purified by repeated subculturing (Madigan et al., 2018). Following the establishment of pure cultures, all isolates were characterised morphologically, including colony colour, margins, surface texture, shape, elevation, and pigmentation (Mohite, 2013). All isolates were cryopreserved and stored at −20 °C. In addition, all microbial cultures were screened for growth on NA medium.

Screening for Zn-Solubilising Activity

Zn-solubilising microorganisms were screened on Zn-supplemented medium with the following composition (g L^{-1}): 0.1 K_2HPO_4; 1.0 $(NH_4)_2SO_4$; 0.2 KCl; 0.2 $MgSO_4 \cdot \bullet 7H_2O$; 10 dextrose; 15.0 agar; and 1.245 ZnO. Colonies aged 24–48 h were transferred into the corresponding broth media (NA, GYM, or YM) and incubated at 28 °C and 160 rpm for 16 h. Following incubation, 10 μL of the microbial suspension was spot-inoculated onto the surface of control (without Zn) and 0.1% Zn-supplemented media. I Inoculations were performed in triplicate. The Petri plates were incubated in a thermostat at 28 °C for 7 days. After incubation, the diameters of the colonies and the clear ZnO dissolution zones were measured, and the solubilisation index (SI) was calculated according to Eq. 7 (Alexander & Zuberer, 1991; Boubekri et al., 2021):

$$SI = \frac{d_{Colony} + d_{Halo\ zone}}{d_{Colony}} \quad (7)$$

Table 4
Composition of agar media used for microbial isolation

Component	Unit	NA	TSA	PA	GYM	YM
Manufacturer	–	TM Media & HiMedia, India				
Premixed powder	g	15.0	30.0	45.03	–	–
pH (H_2O)		7.4 ± 0.2	7.3 ± 0.2	7.0 ± 0.2	7.2	6.2
Agar	g	20.0	20.0	13.6	20.0	20.0
$CaCO_3$	g	–	–	–	2.0	–
Glucose	g	–	2.5	–	4.0	10.0
Glycerol	g	–	–	20.0	–	–
Irgasan (Triclosan)	g	–	–	0.025	–	–
K_2HPO_4	g	–	2.5	–	–	–
K_2SO_4	g	–	–	10.0	–	–
Malt extract	g	–	–	–	10.0	3.0
Meat peptone	g	4.3	–	–	–	–
$MgCl_2$	g	–	–	1.40	–	–
NaCl	g	6.4	5.0	–	–	–
Peptone	g	–	–	20.0	–	5.0
Soya peptone	g	–	3.0	–	–	–
Tryptone	g	4.3	17.0	–	–	–
Yeast extract	g	–	–	–	4.0	3.0
dH_2O	mL	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Notes: NA – nutrient agar; TSA – tryptic soy agar; PA – pseudomonas agar; GYM – glucose yeast malt agar; YM – yeast malt agar; dH_2O – distilled water.

Screening for PTE Tolerance

Screening of isolated microbial strains for tolerance to PTEs was conducted in two stages: (i) pre-screening for tolerance to 0.06% Zn to identify strains exhibiting superior resistance to elevated Zn concentrations; and (ii) comprehensive screening of the selected strains for tolerance to 0.03–0.48% Ni, Cu, and Zn to determine their resistance to PTEs commonly present in contaminated soils and to establish the range of concentrations tolerated.

For the pre-screening tolerance assay, the corresponding media described in Table 4 were used. To prepare Zn-supplemented media, 30 mL stock solutions containing 0.5% Zn were prepared using analytical-grade $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ (0.6596 g). The final Zn concentrations in the assay tubes were 0.06%.

For comprehensive tolerance assays, Müller–Hinton broth (MHB) was used, with the following composition (g L^{-1}): 2.0 beef extract, 17.5 acid hydrolysate of casein, and 1.5 starch; pH 7.3 ± 0.2. To prepare PTE-supplemented media, 30 mL metal stock solutions containing 3.52% of Ni, Cu, or Zn were prepared using analytical-grade salts: 4.6438 g of $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$, 4.1493 g of $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, and 5.0526 g of $NiSO_4 \cdot 7H_2O$. Serial two-fold dilution (15 mL stock solution + 15 mL dH_2O) was subsequently performed to obtain concentrations of 1.76%, 0.88%, 0.44%, and 0.22% for each metal. The final PTE concentrations in the assay tubes were 0.03%, 0.06%, 0.12%, 0.24%, and 0.48%.

The subsequent experimental procedures were identical for both screening stages. Specifically, a 24 h fresh culture of each strain was inoculated into 25 mL of the respective broth (MHB or the corresponding medium) and incubated at 28–30 °C and 140 rpm for 24 h. Following incubation, microbial suspensions were transferred to 2 mL cuvette, and optical density at 600 nm (OD_{600}) was measured using a SF-2000 spectrophotometer (OKB Spectr, Russian Federation), with uninoculated MHB or respective broth serving as the blank. This procedure ensured standardisation of the inoculum density, with OD_{600} of 0.010 ± 0.001 for both control and experimental tubes.

The experimental design included the following: blank (uninoculated respective broth), control 1 (inoculated respective broth), control 2 (PTE-

supplemented respective broth; 3 PTEs × 5 concentrations), and experimental treatments (inoculated PTE-supplemented respective broth; 3 PTEs × 5 concentrations) for each microbial strain. The composition of the reaction mixtures for each experimental tube is presented in Table 5.

Table 5
Composition of reaction mixtures (n = 3)

Treatment	RB, mL	Suspension, mL	Me solution, mL	dH_2O, mL	Total volume, mL
Blank	3.8	–	–	0.6	4.4
Control 1	3.4	0.4	–	0.6	4.4
Control 2	3.8	–	0.6	–	4.4
Experiment	3.4	0.4	0.6	–	4.4

Notes: RB – respective broth; Me – metal (Ni, Cu, or Zn) solution at five different concentrations.

Immediately after preparation, each tube was vortexed briefly to ensure homogeneous mixing, and 1 mL aliquots were collected into labelled microcentrifuge tubes for OD_{600} measurement (time point 0 h). The tubes were then incubated in a shaking incubator at 28 °C and 140 rpm for 24 h. Following incubation, 1 mL samples were collected again from each tube, and OD_{600} was measured to assess bacterial growth under different PTE concentrations.

Biocompatibility Assay

Biocompatibility/antagonism was assessed by the cross-streak method, in which the test isolate was streaked centrally on agar, incubated, and then indicator strains were streaked perpendicular to it; inhibition was evaluated from the growth-free zone at the intersection of the streaks (Balouiri et al., 2016; Velho-Pereira & Kamat, 2011).

Qualitative Analysis of Enzymatic Activity

Screening of microbial enzymatic activities was performed by streaking a single colony from a 24 h fresh culture onto fresh Petri plates containing the respective media.

Amylolytic Activity

Determination of extracellular amylase (amylolytic) activity in microbial isolates was performed using starch agar plates (composition (Ntabo et al., 2018), g L^{-1}: soluble starch, 20.0; tryptone, 5.0; yeast extract, 3.0; agar, 15.0), followed by incubation at 28 °C for 48 h. Following incubation, the plates were flooded with iodine–potassium iodide (KI) solution, which forms a dark blue-black complex with intact starch; the presence of transparent zones surrounding the colonies indicated amylase production (Amoozegar et al., 2003; Hossain et al., 2020).

Cellulolytic Activity

Screening of microbial cellulase (endoglucanase) activity was conducted using carboxymethylcellulose (CMC) agar medium (composition (Shreshtha et al., 2025), g L^{-1}: $NaNO_3$, 2.0; K_2HPO_4, 1.0; $MgSO_4$, 0.5; KCl, 0.5; CMC salt, 2.0; peptone, 0.2; agar, 17.0). The inoculated plates were incubated in a thermostat at 30 °C for 48 h (Meddeb-Mouelhi et al., 2014). Following incubation, the plates were stained with Congo red (Merck Group, Darmstadt, Germany) solution (2.0 g L^{-1}) for 10 min and subsequently destained with 1 M NaCl for 15 min; the presence of halo zones surrounding the colonies indicated cellulase production (Carder, 1986).

Lipolytic Activity

Similarly, lipolytic activity was assessed by inoculating the isolates onto Tributyrin agar (TBA) medium (composition (Carrazco-Palafox et al., 2018), g L^{-1}: peptone, 5.0; yeast extract, 3.0; agar, 15.0; tributyrin 1% v/v) followed by incubation at 28 °C for 48 h. The development of a clear zone surrounding the colony was indicative of lipase or esterase activity.

Proteolytic Activity

For determination of proteolytic activity, 1% skim milk agar (SMA) was employed (composition (Masi et al., 2021; Ntabo et al., 2018; Shreshtha et al., 2025), g L^{-1}: casein enzymatic hydrolysate, 5.0; dextrose, 1.0; yeast extract, 2.5; skim milk powder,

1.0; agar, 15.0), followed by incubation at 28 °C for 48 h. Proteolytic activity was confirmed by the appearance of proteolysis zone surrounding the colonies.

Determination of Plant-Growth Promoting Traits

Siderophore Production

Screening of microbial isolates for siderophore production was performed using an universal assay applicable to both Gram-positive (G^+) and Gram-negative (G^-) microorganisms (Schwyn & Neilands, 1987). The method was based on a colour change from blue to orange, whereby the Chrome Azurol S (CAS)–Fe^{3+} complex exhibits a blue colour, changing to orange in the presence of siderophores (Eq. 8):

$$Fe^{3+} + CAS\ dye\ (blue) + \\ +Siderophore \rightarrow Fe^{3+} + dye\ (orange) \quad (8)$$

For preparation of the CAS indicator solution, 36.3 mg of CAS was dissolved in 30 mL of dH_2O. Separately, 43.75 mg of hexadecyltrimethyl ammonium bromide (HDTMA) was dissolved in 24 mL of dH_2O, followed by the addition of 6.0 mL of Fe^{3+} solution (prepared by dissolving 27.0 mg $FeCl_3 \cdot \bullet 6H_2O$ and 83.3 µL concentrated HCl in 100 mL dH_2O). The two solutions were combined to obtain a dark blue mixture with a final volume of 60 mL. The resulting CAS indicator solution was autoclaved for sterilisation.

For basal agar medium preparation, 17.05 g of 0.1 M 3-(N-morpholino)propanesulfonic acid (MOPS), 0.285 g of NaCl, 0.17 g of KH_2PO_4, 0.055 g of NH_4Cl, and 0.285 g of L-asparagine were dissolved in 471.5 mL of dH_2O in a 1 L flask. The pH of the solution was adjusted to 6.8 using 6 M NaOH, and the volume was then adjusted to 500 mL with dH_2O. Agar (8.5 g) was added, and the medium was heated with stirring until complete dissolution, followed by autoclaving for sterilisation.

A volume of 60 mL was withdrawn from the sterilised basal agar medium to obtain a final volume of 440 mL, after which the medium was cooled to 50 °C in a water bath. The CAS indicator solution (60 mL) was prepared separately and maintained at the same temperature. Subsequently, 10 mL of 50% (w/v) glucose solution was added to the 440 mL of basal agar medium under gentle stirring, followed by 50 mL of CAS indicator solution. After thorough mixing, a total of 500 mL of blue CAS agar medium was obtained. The medium was aseptically dispensed into sterile Petri dishes (~25 mL per plate), yielding ~20 plates.

A single colony from a 24 h fresh culture plate was transferred into 10 mL test tubes containing 5 mL of the corresponding broth (NA, GYM, or YM) and incubated at 28 °C and 140 rpm for 24 h. Following incubation, the strains were streak-inoculated onto CAS agar medium using a microbiological loop. The plates were incubated at 28 °C for 7 days. The CAS reaction rate was determined by monitoring the progression of the colour-change front in the blue CAS agar. Control plates containing uninoculated blue CAS agar were incubated under identical conditions, and no colour change was observed.

Extracellular Polymeric Saccharide Production

E The ability of selected isolates to produce extracellular polymeric saccharides (EPS) was evaluated using the Congo red agar (CRA) method (Christensen et al., 1982; Freeman et al., 1989; dos Santos et al., 2021). The medium was prepared with the following composition (g L^{-1}): Congo red dye (Merck Group, Darmstadt, Germany), 0.8; brain heart infusion (BHI) broth (HiMedia Laboratories, Thane, India), 37.0; sucrose, 50.0; agar, 10.0. The composition of BHI broth was as follows (g L^{-1}): peptone, 10.0; infusion solids, 12.5; BHI powder, 5.0; dextrose, 2.0; NaCl, 5.0; Na_2HPO_4, 2.5; pH 7.4 ± 0.2. Following inoculation, the plates were incubated aerobically at 37 °C for 24 h. EPS production was confirmed by a change in colony colour to black, whereas the absence of EPS production was indicated by a stable colony colour of pink and/or red.

Indole-3-Acetic Acid Synthesis

Quantitative evaluation of indole-3-acetic acid (IAA) production by microbial isolates was performed using Salkowski's reagent and a tryptophan-supplemented nutrient broth (TNB). Salkowski's reagent was prepared by mixing 1 mL of 0.5 M $FeCl_3$ with 49 mL of 35% perchloric acid ($HClO_4$) (Phetcharat & Duangpaeng, 2012). Prior to analysis, an IAA calibration curve was created. Standard solutions were prepared according to the method described by Gang et al. (2019), maintaining a 1:1 ratio between the sample and Salkowski's reagent. Appropriate volumes of the IAA stock solution (1 mg mL^{-1}) were diluted with dH_2O to a final volume of 750 µL, followed by the addition of

750 µL of Salkowski's reagent. A blank sample was prepared using dH_2O instead of IAA. Following preparation, the mixtures were incubated in the dark for 30 min, and the optical density (OD_{536}) was measured at 536 nm using an SF-2000 spectrophotometer (OKB Spectr, Russian Federation). For calibration curve construction, OD_{536} values of standard solutions within the concentration range of 1–100 µg mL^{-1} (Ali et al., 2022) were used, yielding a linear relationship described by the equation $y = 0.0316x + 0.0586$ (R^2 = 0.98). The concentration of IAA produced by microbial cultures was calculated from OD_{536} values using Eq. 9:

$$IAA\ (\mu g\ mL^{-1}) = \frac{OD_{536} - 0.0586}{0.0316} \quad (9)$$

Specifically, a single colony from a 24 h fresh culture was transferred into 10 mL of preculture broth without L-tryptophan (nutrient broth, NB), with the following composition (g L^{-1}): peptic digest of animal tissue, 10.0; meat extract, 3.0; NaCl, 15.0; pH 7.0 ± 0.2. The cultures were incubated in a shaking incubator at 28 °C and 140 rpm for 16 h. Subsequently, 100 mL bottles containing 50 mL of TNB (NB supplemented with 0.5 g L^{-1} L-tryptophan (Mamarasulov et al., 2022)) were inoculated with 100 µL of microbial suspension and incubated under dark conditions (bottles were wrapped in aluminium foil) in a shaking incubator at 28 °C and 140 rpm for at least 7 days. At 24 h intervals, 1.5 mL of culture broth was sampled and centrifuged at 5,000 rpm for 5 min. After centrifugation, 1 mL of supernatant was mixed with 1 mL of Salkowski reagent and incubated at 30 °C in the dark for 30 min. OD_{536} was then measured, with uninoculated TNB mixed with Salkowski's reagent used as a blank. Sampling and analysis at 24 h intervals were continued until a decrease in absorbance was observed, indicating cessation of IAA production.

Data Processing

Statistical data processing for all analysed parameters was performed using RStudio desktop software (version 2026.01.0 Build 392, RStudio PBC, 2026). Initially, the dataset was assessed for outliers, followed by testing for normality using the Shapiro–Wilk test and for homogeneity of variances using Levene's test. If the normality assumption was not met, non-parametric tests were applied: the Kruskal–Wallis test for two-factor analysis or the Wilcoxon test for three or more factors, followed by pairwise comparisons with Bonferroni adjustment. If the homogeneity assumption was violated, Welch's correction was applied, followed by Welch's analysis of variance (ANOVA). When both normality and homoscedasticity assumptions were satisfied, one- to three-way ANOVA was performed to identify statistically significant differences between treatments, followed by Tukey's honestly significant difference (HSD) test where appropriate. In all cases, pairwise comparisons resulted in statistical groupings denoted by letter annotations, and the corresponding graphs and/or tables were generated.

Results and their discussion

Soil Contamination Profile

Inorganic Contamination

Chemical analysis of soils for PTE content revealed that none of the studied soils contained Co or Cd, whereas elevated concentrations of Ni, Zn, and As were observed (Table 6). Elevated concentrations of Cr were identified in TA, K, and TE soils, while elevated concentrations of Cu were detected in K and TE soils. In the case of Pb, elevated concentrations were observed exclusively in TE soil. Overall, it was determined that TE soil exhibited elevated concentrations of five PTEs, followed by K soil, which contained elevated concentrations of four PTEs.

In addition, assessment of the soils based on geo-accumulation index (I_{geo}) (Saleem et al., 2024) indicated that TA and K soils were moderately contaminated with As, whereas TE soil was heavily contaminated with Zn and As and extremely contaminated with Pb. Almost identical patterns were observed for the ecological risk factor (E_R) (Hakanson, 1980), with TA and K soils exhibiting moderate risk associated with As concentrations, while TE soil demonstrated high and extreme risks for Zn and Pb, respectively. Evaluation of soil toxicity using the integrated pollution index (Z_{ci}) (Vyborov et al., 2004) indicated that TA and S soils could be considered safe, whereas K and TE soils posed moderate and extreme hazards, respectively. According to the potential ecological risk index (*PERI*) (Hakanson, 1980), all soils except TE presented low risk, while the latter exhibited an extreme ecological risk.

Table 6
PTE concentrations (mg kg^{-1}) in studied soils

Element	MPC	MDL	TA soil	K soil	S soil	TE soil	*p*-value
Cr	90 [a,b]	> 12	139 ± 9.17 ab	150 ± 4.89 a	< LOD	117 ± 11.0 b	< 0.01
Co	5.0	> 12	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	–
Ni	20	> 12	54.4 ± 1.32 b	70.1 ± 2.00 a	31.1 ± 2.00 d	44.1 ± 4.38 c	< 0.001
Cu	33	> 5	29.0 ± 0.05 c	97.6 ± 6.94 b	27.8 ± 0.10 c	169 ± 10.6 a	< 0.001
Zn	55	> 2	68.3 ± 2.20 c	87.7 ± 2.28 b	63.1 ± 1.52 c	1 077 ± 10.9 a	< 0.001
As	2.0	> 2	10.3 ± 0.75 c	13.0 ± 0.31 b	5.24 ± 0.57 d	49.7 ± 0.81 a	< 0.001
Cd	0.5	> 2	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	–
Pb	32 [a]	> 15	18.8 ± 1.55 b	23.8 ± 0.36 b	18.0 ± 0.30 b	1 040 ± 33.2 a	< 0.001
Z_{ci} (Vyborov et al., 2004)			13.7	19.9	5.67	122	–
PERI (Hakanson, 1980)			73.3	97.0	40.6	682	–

Notes: MPC – maximum permissible concentrations for mobile fractions of elements (MH RK, 2021); MDL – method detection limit (mg kg^{-1}); TA – Talgar; K – Kyzylkairat; S – Saimasai; TE – Tekeli; LOD – limit of detection; [a] – MPC for total concentration; [b] – MPC values for Europe (MECR, 2016).

Organic Contamination

In addition to PTE content, K and S soils were analysed for POP concentrations (Table 7). Chemical analysis revealed elevated concentrations, exceeding MPC, of DDT metabolites, dieldrin, endosulfan α, and endrin. Among the DDT metabolites, concentrations of 2.4-DDD and 4.4-DDD exceeded MPC in both soils, while 4.4-DDT concentrations exceeding MPC thresholds were detected in S soil. Both soils exhibited comparable concentrations of 2.4-DDD; however, S soil contained significantly higher concentrations of 4.4-DDD and 4.4-DDT compared with K soil. Overall, the sum concentrations of DDT metabolites exceeded MPC by 9.28- and 13.8-fold in K and S soils, respectively.

Similarly, both soils exhibited elevated concentrations of endosulfan α and endrin, exceeding MPC by 5.22–27.6-fold and 34.0–63.5-fold, respectively. K soil contained significantly higher concentrations of endosulfan α than S soil, whereas S soil exhibited significantly higher concentrations of endrin compared with K soil. In addition, elevated concentrations of dieldrin (5.6× MPC) were detected exclusively in S soil.

Assessment of cumulative POP concentrations indicated that K soil was more contaminated than S soil overall. The largest contribution to the cumulative concentration in K soil was attributed to endosulfan α, followed by DDT metabolites. In contrast, the cumulative concentration in S soil was primarily driven by DDT metabolites, followed by endosulfan α.

Microbial Isolation & Morphology

A total of 242 isolates were obtained from the four studied soils (Table 8). The highest number of isolates was recovered from K soil, whereas the lowest number was obtained from TE soil, potentially indicating that inorganic contamination exerted a more pronounced influence on soil microbial diversity than organic contamination (Thavamani et al., 2012). Furthermore, five distinct culture media were employed for isolation, with YM medium yielding the highest number of isolates (65) and PA the lowest (25). This pattern was likely attributable to the more nutrient-rich composition of YM, specifically its enrichment with glucose (10 g L^{-1}), malt extract, and yeast extract, whereas PA contains only peptone.

Of the 242 isolates, 172 were Gram-positive (G^+) and 70 were Gram-negative (G^-). According to cell morphology, 198 isolates were classified as bacilli, 26 as cocci, and 18 as filamentous forms.

Table 7
POP concentrations (μg kg^{-1}) in studied soils

POP-pesticide	MPC	K soil	S soil	*p*-value
2.4-DDD	100	484 ± 80.7	387 ± 48.0	0.149
4.4-DDD		371 ± 17.8 b	450 ± 42.1 a	< 0.05
4.4-DDE		58.2 ± 7.79 a	33.8 ± 0.86 b	< 0.01
4.4-DDT		14.5 ± 0.05 b	512 ± 47.0 a	< 0.001
∑ DDTs		928 ± 106 b	1 382 ± 52.0 a	< 0.01
α-HCH	100	< LOD	10.8 ± 0.30	–
β-HCH		< LOD	29.6 ± 0	–
γ-HCH		< LOD	7.48 ± 0	–
δ-HCH		4.00 ± 0	8.04 ± 0	–
∑ HCHs		4.00 ± 0 b	55.9 ± 0.30 a	< 0.001
Dieldrin	0.5	< LOD	2.80 ± 0.25	–
Endosulfan α	100	2 763 ± 150 a	522 ± 24.8 b	< 0.001
Endosulfan sulfate	–	12.1 ± 1.32 a	9.09 ± 0 b	< 0.05
Endrin	1	34.0 ± 0.65 b	63.5 ± 4.97 a	< 0.001
Endrin aldehyde	–	15.8 ± 1.88 b	24.1 ± 0.82 a	< 0.01
Heptachlor	50	< LOD	5.22 ± 0.04	–
Heptachlor epoxide		5.77 ± 0 a	4.99 ± 0.19 b	< 0.01
Methoxychlor	1 600	5.49 ± 0.47 b	23.5 ± 0.44 a	< 0.001
∑ Others		2 836 ± 150 a	656 ± 31.0 b	< 0.001
∑ POPs		3 768 ± 257 a	2 094 ± 83.3 b	< 0.001

Notes: MPC – maximum permissible concentrations (MH RK, 2021); K – Kyzylkairat; S – Saimasai; LOD – limit of detection.

Table 8
Number of microbial cultures isolated from different soils using selective media

Soil	Number of isolates					
	NA	TSA	PA	GYM	YM	Total
TA	14	15	4	7	23	63
K	13	15	8	18	19	73
S	17	14	9	11	14	65
TE	9	9	4	10	9	41
All	53	53	25	46	65	242

Notes: NA – nutrient agar; TSA – tryptic soy agar; PA – pseudomonas agar; GYM – glucose yeast malt agar; YM – yeast malt agar; TA – Talgar; K – Kyzylkairat; S – Saimasai; TE – Tekeli.

Zn-Solubilisation Activity

Evaluation of Zn-solubilising activity among the 242 isolated strains on ZnO-supplemented solid media was conducted by measuring colony and halo zone diameters. Of the 242 isolates tested, 27 exhibited Zn-solubilisation potential, as indicated by the formation of halo zones around colonies (Table 9). However, variability in replication was observed; for instance, isolate TE5 developed a halo zone on only one of three plates, with a solubilisation index (SI) of 1.33. Thirteen (13) isolates formed halo zones on two out of three plates, while the remaining 13 isolates exhibited halo formation consistently across all three plates.

The intensity of Zn-solubilising activity was classified according to the following scale: SI < 1.5, weak activity; 1.5 < SI < 2.5, moderate activity; and SI > 2.5, strong activity. Among isolates exhibiting

activity on all three plates, three (3) isolates (S40, S56, and TE32) demonstrated strong Zn-solubilising activity, with SI values ranging from 2.56 to 2.77. Nine (9) isolates (TA33, S12, TA5, S20, TA15, S25, S21, S24, and S36) exhibited moderate activity, with SI values between 1.64 and 2.33, while only isolate S39 showed weak activity (SI of 1.43).

Among isolates exhibiting activity on two out of three plates, only isolate S47 demonstrated strong activity, with an SI of 3.13. Eight (8) isolates (S41, TE31, TE30, S32, K23, S43, S37, and TE15) exhibited moderate activity, whereas the remaining four (4) isolates (TE29, TE7, K45, and S54) showed weak activity.

Table 9
Solubilisation index values

No.	Isolate	SI, mean ± SD	SG	No.	Isolate	SI, mean ± SD	SG
$n = 3$, $p < 0.001$				$n = 2$, $p < 0.001$			
1	S40	2.77 ± 0.16	a	14	S47	3.13 ± 0.06	a
2	S56	2.65 ± 0.26	ab	15	S41	1.99 ± 0.26	b
3	TE32	2.56 ± 0.19	abc	16	TE31	1.75 ± 0.15	bc
4	TA33	2.33 ± 0.17	abcd	17	TE30	1.62 ± 0.23	bc
5	S12	2.17 ± 0.31	bcde	18	S32	1.60 ± 0.31	bc
6	TA5	2.16 ± 0.12	cde	19	K23	1.58 ± 0.12	bc
7	S20	1.95 ± 0.14	def	20	S43	1.54 ± 0.29	bc
8	TA15	1.83 ± 0.18	efg	21	S37	1.52 ± 0.03	bc
9	S25	1.76 ± 0.16	efg	22	TE15	1.51 ± 0.20	bc
10	S21	1.70 ± 0.10	efg	23	TE29	1.40 ± 0.09	c
11	S24	1.68 ± 0.19	efg	24	TE7	1.37 ± 0.05	c
12	S36	1.64 ± 0.18	fg	25	K45	1.25 ± 0.03	c
13	S39	1.43 ± 0.20	g	26	S54	1.17 ± 0	c

Notes: SI – solubilisation index; SD – standard deviation; SG – statistical groups.

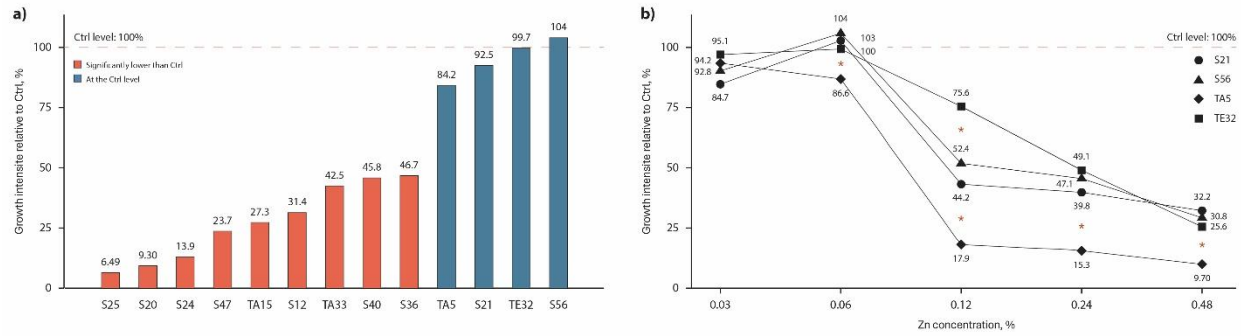
Thus, thirteen (13) isolates were selected for further investigation, specifically twelve isolates (S40, S56, TE32, TA33, S12, TA5, S20, TA15, S25, S21, S24, and S36) exhibiting moderate to strong Zn-solubilising activity consistently across all three plates, and one isolate (S47) demonstrating strong activity on two plates.

Microbial Tolerance to PTE

Pre-screening of thirteen (13) isolates, selected based on their Zn-solubilising activity, for tolerance to a Zn concentration of 0.06% on the respective media identified three isolates (S21, S56, and TE32) that exhibited growth intensity comparable to Ctrl (Fig. 2a). One isolate (TA5) showed only slight growth inhibition (15.8%), whereas the remaining nine isolates exhibited substantial growth inhibition, with reductions of up to 93.5%. Consequently, following sequential screening based on growth performance at 0.06% Zn, four isolates (S56, S21, TA5, and TE32) were selected for comprehensive evaluation of their tolerance to Ni, Cu, and Zn.

Analysis of microbial tolerance across the range of PTE concentrations (0.03–0.48%) demonstrated that, from a Zn concentration of 0.06% onwards, the growth intensities of isolates S21, S56, and TE32 were significantly higher than that of TA5 (Fig. 2b). This pattern remained consistent across all subsequent Zn concentrations. Overall, TE32 exhibited the highest growth intensity throughout the 0.06–0.24% Zn concentration range, whereas the growth intensities of S21 and S56 were nearly identical across all concentrations tested. In contrast, TA5 demonstrated tolerance to Zn only at concentrations of 0.03% and 0.06%, with growth intensity declining to 17.9% at 0.12% Zn and decreasing further to 9.70% at the higher concentrations.

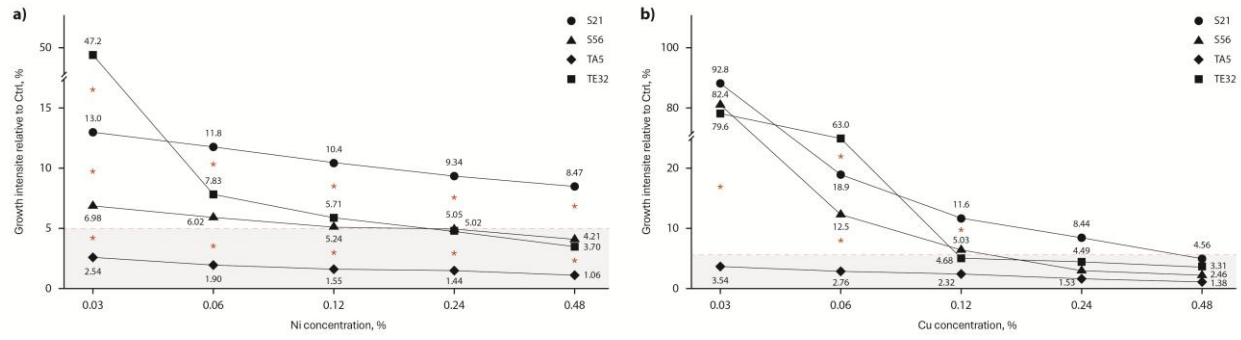
Figure 2
Growth intensity relative to the Ctrl in broth supplemented with 0.06% Zn (a) and 0.03–0.48% Zn (b)



Analysis of microbial growth intensities in Ni- and Cu-supplemented media showed that relative growth values ≤5% of the Ctrl were operationally classified as negligible residual growth, corresponding to ≥95% growth inhibition. Isolate TA5 did not exhibit tolerance to either PTE at any of the concentrations tested and also displayed the weakest tolerance to Zn. As observed for Zn tolerance, isolates S21 and S56 exhibited similar response patterns to Ni and Cu exposure; however, S21 demonstrated consistently greater and more stable tolerance to both PTEs. Specifically, under Ni-induced stress, the growth intensity of S21 declined gradually from 13.0% to 8.47% across the 0.03–0.48% Ni concentration range, indicating sustained resistance (Fig. 3a). Under Cu-induced stress, although growth intensity decreased sharply from 92.8% to 4.56%, S21 tolerated the broadest range of Cu concentrations (0.03–0.24%; Fig. 3b). Similarly, the growth intensity of S56 in Cu-supplemented medium declined markedly from 82.4% to 2.46%; however, the range of tolerated Cu concentrations was narrower (0.03–0.12%).

Isolate TE32 exhibited distinct response patterns to Ni and Cu. At the lowest Ni concentration (0.03%), TE32 displayed the highest relative growth intensity (47.2%), followed by a sharp decline to 7.83% at higher concentration (Fig. 3a). In contrast, under Cu-induced stress, TE32 demonstrated good tolerance at 0.03% and 0.06%, maintaining relative growth intensities of 79.6% and 63.0%, respectively (Fig. 3b). However, no meaningful growth was observed at the subsequent Cu concentrations. Based on the PTE tolerance profiles obtained, three isolates (S21, S56, and TE32) were selected for further investigation.

Figure 3
Growth intensity relative to the Ctrl in broth supplemented with Ni (a) and Cu (b).

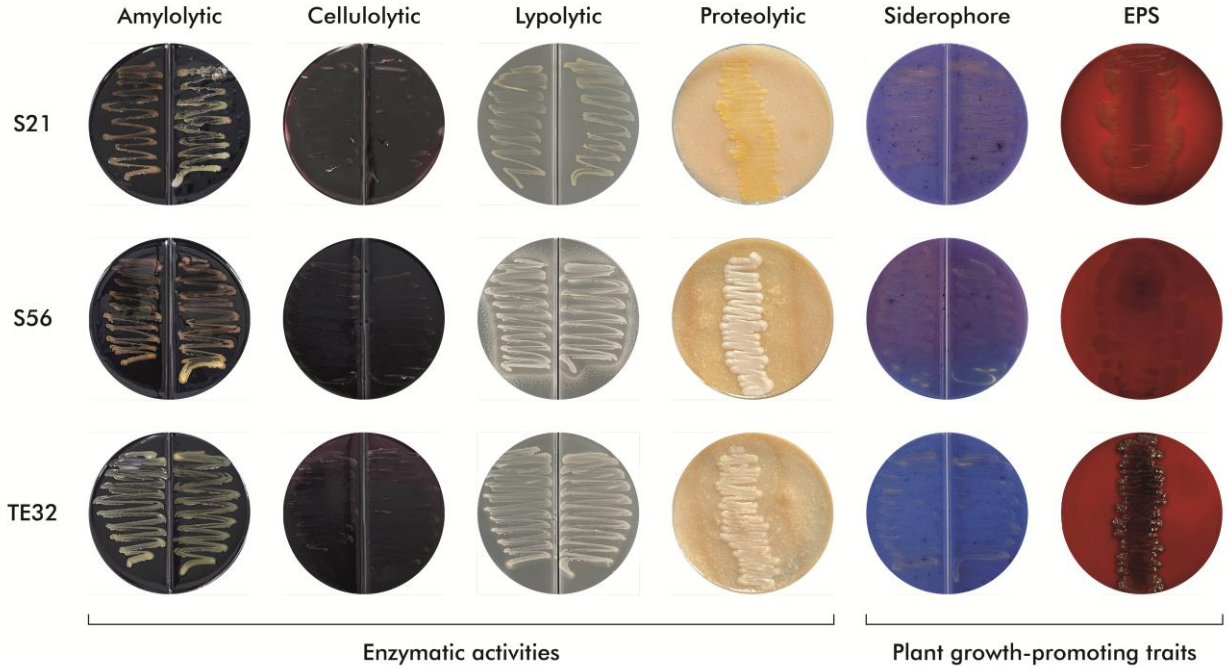


Note: The grey shaded area indicates negligible residual growth, defined as ≤5% of Ctrl. Values within this range were interpreted as near-complete growth inhibition.

Enzymatic, Plant Growth-Promoting, & Biocompatibility Profiles of Microbial Isolates

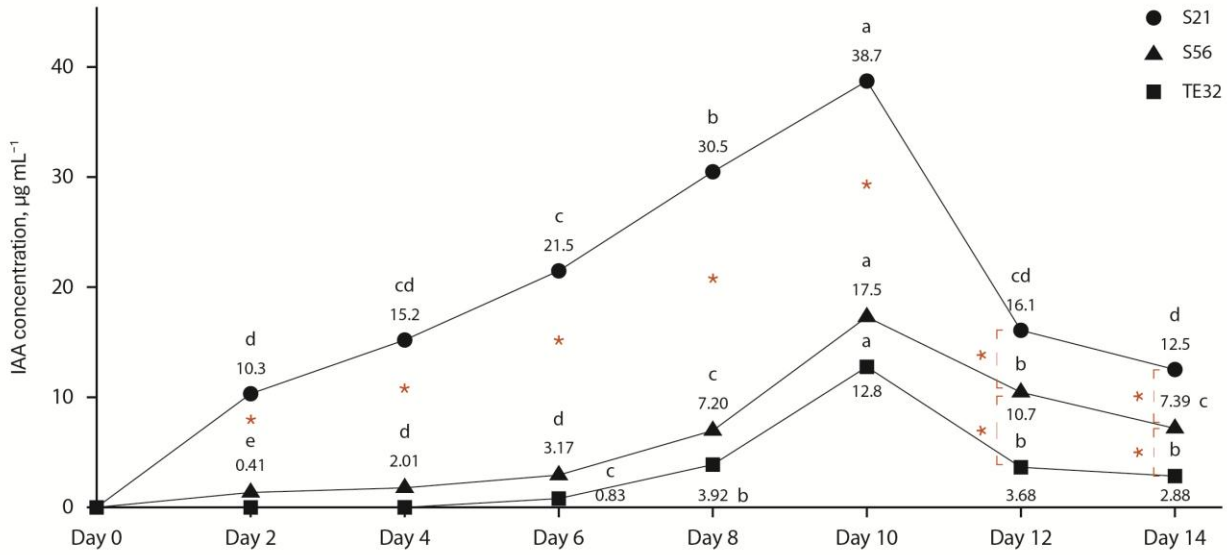
The three selected isolates were characterised qualitatively and quantitatively to establish their enzymatic and plant growth-promoting profiles. The results demonstrated that none of the isolates exhibited cellulolytic activity (Fig. 4). Amylolytic activity was detected only in isolate TE32, lipolytic activity only in S56, whereas proteolytic activity was observed in both TE32 and S56. With respect to siderophore production, a colour change from blue to reddish-purple was observed on the plates inoculated with S21 and S56, indicating positive siderophore production. Extracellular polymeric saccharide (EPS) production was detected exclusively in isolate TE32.

Figure 4
Enzymatic activities and plant-growth promoting traits of selected microbial isolates



Indole-3-acetic acid (IAA) production was detected in all three isolates; however, isolate S21 exhibited markedly superior activity (Fig. 5). IAA synthesis commenced on day 2, and the concentrations produced by S21 remained significantly higher than those of S56 and TE32 throughout the experimental period. IAA production by S56 also began on day 2 but remained low (0.41–3.17 µg mL^{-1}) until day 10. In contrast, isolate TE32 exhibited the weakest IAA-producing capacity, with production commencing only on day 6 and reaching a maximum concentration of 12.8 ± 0.88 µg mL^{-1}. For all three isolates, peak IAA concentrations were recorded on day 10, with the maximum production by S21 being 2.21- and 3.02-fold higher than that of S56 and TE32, respectively.

Figure 5
Indole-3-acetic acid production activity



To determine whether the selected isolates could be co-cultivated for the construction of a microbial consortium, biocompatibility assays were performed. The results demonstrated that all three isolates were mutually compatible.

Conclusion

The isolation of microorganisms from legacy-contaminated soils affected by potentially toxic elements (PTEs), persistent organic pollutants (POPs), or their combination resulted in a collection of 242 microbial strains. The sequential screening strategy, designed to identify isolates with high Zn-solubilising activity and strong tolerance to Ni, Cu, and Zn, enabled the selection of three promising strains: S21, S56, and TE32. Evaluation of their enzymatic activities and plant growth-promoting traits demonstrated complementary functional characteristics, suggesting that, depending on the intended application, the strains may be utilised either as a consortium for immobilisation on biochar surfaces to produce microbe–biochar complexes for subsequent application to contaminated soils to promote plant growth, or individually for the reconditioning of waste-derived biochar through reduction of its metal load. Accordingly, future research will focus on the development of microbe–biochar complexes and their validation under vegetation experiment conditions.

Conflict of interest

Authors confirm that manuscript content was approved prior to publication and declare no conflict of interests.

Funding

The study was performed within the framework of the project AP23490702 «Development of Biochar Decontamination Technology for Sustainable Waste Biomass Conversion into Value-Added Products» (abbreviated as ReChar-M2C) for 2024-2026 supported by Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan.

Data Availability

Data are available from the corresponding author upon reasonable request.

Author Contributions

Conceptualization, A.M.; methodology, N.A., A.A., A.N., and R.B.; software, A.M.; validation, N.A., A.A., A.N., and R.B.; formal analysis, A.M.; investigation, N.A., A.A., A.N., and R.B.; resources, A.M.; data curation, N.A., A.A., and A.B.; writing–original draft preparation, A.M., N.A., A.A., and A.B.; writing–review and editing, A.M. and V.P.; visualization, A.M.; supervision, A.M. and A.B.; project administration, A.M.; funding acquisition, A.M.

References

Khaw-ngern, K., Peuchthonglang, P., Klomkul, L., & Khaw-ngern (2021). A Digital Circular Economy for SDG 11 and SDG 12. *Psychology and Education Journal*, *58*(1), Article 1. https://doi.org/10.17762/pae.v58i1.917

Alexander, D. B., & Zuberer, D. A. (1991). Use of chrome azurol S reagents to evaluate siderophore production by rhizosphere bacteria. *Biology and Fertility of Soils*, *12*(1), 39–45. https://doi.org/10.1007/BF00369386

Ali, B., Wang, X., Saleem, M. H., Sumaira, Hafeez, A., Afridi, M. S., Khan, S., Zaib-Un-Nisa, Ullah, I., Amaral Júnior, A. T. do, Alatawi, A., & Ali, S. (2022). PGPR-Mediated Salt Tolerance in Maize by Modulating Plant Physiology, Antioxidant Defense, Compatible Solutes Accumulation and Bio-Surfactant Producing Genes. *Plants*, *11*(3), Article 3. https://doi.org/10.3390/plants11030345

Althuri, A. & Venkata Mohan, S. (2022). Emerging innovations for sustainable production of bioethanol and other mercantile products from circular economy perspective. *Bioresource Technology*, *363*, 128013. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128013

Amoozegar, M. A., Malekzadeh, F., & Malik, K. A. (2003). Production of amylase by newly isolated moderate halophile, *Halobacillus* sp. Strain MA-2. *Journal of Microbiological Methods*, *52*(3), 353–359. https://doi.org/10.1016/S0167-7012(02)00191-4

Aso, S. N. (2020). Digestate: The Coproduct of Biofuel Production in a Circular Economy, and New Results for Cassava Peeling Residue Digestate. In *Renewable Energy—Technologies and Applications*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.91340

Balouiri, M., Sadiki, M., & Ibnsouda, S. K. (2016). Methods for *in vitro* evaluating antimicrobial activity: A review. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, *6*(2), 71–79. https://doi.org/10.1016/j.jpha.2015.11.005

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

Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, *5*(1), Article 1. https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214

Boubekri, K., Soumare, A., Mardad, I., Lyamlouli, K., Hafidi, M., Ouhdouch, Y., & Kouisni, L. (2021). The Screening of Potassium- and Phosphate-Solubilizing Actinobacteria and the Assessment of Their Ability to Promote Wheat Growth Parameters. *Microorganisms*, *9*(3), Article 3. https://doi.org/10.3390/microorganisms9030470

Brtnicky, M., Datta, R., Holatko, J., Bielska, L., Gusiatin, Z. M., Kucerik, J., Hammerschmiedt, 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

Carder, J. H. (1986). Detection and quantitation of cellulase by Congo red staining of substrates in a cup-plate diffusion assay. *Analytical Biochemistry*, *153*(1), 75–79. https://doi.org/10.1016/0003-2697(86)90063-1

Carrazco-Palafox, J., Rivera-Chavira, B. E., Ramírez-Baca, N., Manzanares-Papayanopoulos, L. I., & Nevárez-Moorillón, G. V. (2018). Improved method for qualitative screening of lipolytic bacterial strains. *MethodsX*, *5*, 68–74. https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.01.004

Carvalho, P., Costa, C. E., Baptista, S. I. L., & Domingues, L. (2021). Yeast cell factories for sustainable whey-to-ethanol valorisation towards a circular economy. *Biofuel Research Journal*, *32*, 1529–1549. https://doi.org/10.18331/BRJ2021.8.4.4

Casarejos, F., Bastos, C. R., Rufin, C., & Frota, M. N. (2018). Rethinking packaging production and consumption vis-à-vis circular economy: A case study of compostable cassava starch-based material. *Journal of Cleaner Production*, *201*, 1019–1028. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.114

Christensen, G. D., Simpson, W. A., Bisno, A. L., & Beachey, E. H. (1982). Adherence of slime-producing strains of Staphylococcus epidermidis to smooth surfaces. *Infection and Immunity*, *37*(1), 318–326. https://doi.org/10.1128/iai.37.1.318-326.1982

Corona, B., Shen, L., Reike, D., Rosales Carreón, J., & Worrell, E. (2019). Towards sustainable development through the circular economy—A review and critical assessment on current circularity metrics. *Resources, Conservation and Recycling*, *151*, 104498. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104498

D'heur, M. (2015). Sustainable Value Chain Management. *Delivering Sustainability, CSR, Sustainability, Ethics & Governance*, 246. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-12142-0

Ding, Y., Liu, Y., Liu, S., Li, Z., Tan, X., Huang, X., Zeng, G., Zhou, L., & Zheng, B. (2016). Biochar to improve soil fertility. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *36*(2), 36. https://doi.org/10.1007/s13593-016-0372-z

dos Santos, E. M. P., Martins, C. C. B., de Oliveira Santos, J. V., da Silva, W. R. C., Silva, S. B. C., Pelagio-Flores, M. A., Galembeck, A., & Cavalcanti, I. M. F. (2021). Silver nanoparticles–chitosan composites activity against resistant bacteria: Tolerance and biofilm inhibition. *Journal of Nanoparticle Research*, *23*(8), 196. https://doi.org/10.1007/s11051-021-05314-1

European Commission & Directorate-General for Research and Innovation. (2012). *Innovating for sustainable growth – A bioeconomy for Europe*. Publications Office. https://doi.org/10.2777/6462

European Commission, Joint Research Centre, Fritsche, U., Brunori, G., Chiaramonti, D., Galanakis, C., Matthews, R., Panoutsou, C., Avraamides, M., Borzacchiello, M., & Stoermer, E. (2021). *Future transitions for the bioeconomy towards sustainable development and a climate-neutral economy – Foresight scenarios for the EU bioeconomy in 2050* (M. Avraamides, M. Borzacchiello, & E. Stoermer, Eds.). Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2760/763277;%20JRC123532

Evangelou, M. W. H., Papazoglou, E. G., Robinson, B. H., & Schulin, R. (2015). Phytomanagement: Phytoremediation and the Production of Biomass for Economic Revenue on Contaminated Land. In A. A. Ansari, S. S. Gill, R. Gill, G. R. Lanza, & L. Newman (Eds.), *Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants, Volume 1* (pp. 115–132). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10395-2_9

Fan, Z., Zhang, Q., Gao, B., Li, M., Liu, C., & Qiu, Y. (2019). Removal of hexavalent chromium by biochar supported nZVI composite: Batch and fixed-bed column evaluations, mechanisms, and secondary contamination prevention. *Chemosphere*, *217*, 85–94. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.009

Fox, A., Gahan, J., Ikoyi, I., Kwapinski, W., O'Sullivan, O., Cotter, P. D., & Schmalenberger, A. (2016). Miscanthus biochar promotes growth of spring barley and shifts bacterial community structures including phosphorus and sulfur mobilizing bacteria. *Pedobiologia*, *59*(4), 195–202. https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2016.07.003

Freeman, D. J., Falkiner, F. R., & Keane, C. T. (1989). New method for detecting slime production by coagulase negative staphylococci. *Journal of Clinical Pathology*, *42*(8), 872–874. https://doi.org/10.1136/jcp.42.8.872

Gang, S., Sharma, S., Saraf, M., Buck, M., & Schumacher, J. (2019). Analysis of Indole-3-acetic Acid (IAA) Production in Klebsiella by LC-MS/MS and the Salkowski Method. *Bio-Protocol*, *9*(9). https://doi.org/10.21769/BioProtoc.3230

GD 52.18.721-2009. (2010). *Arsenic in Soil, Sediment, Biological Material, and Water Samples. Measurement Methodology by Hydride Generation Atomic Absorption Spectrophotometry* [ICS: 13.080]. Federal State Budgetary Institution "All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information - World Data Center." https://meganorm.ru/Data2/1/4293723/4293723444.pdf

George, M. (2022). Unravelling the impact of potentially toxic elements and biochar on soil: A review. *Environmental Challenges*, *8*, 100540. https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100540

GOST 26205-91. (1993). *Soils. Determination of mobile compounds of phosphorus and potassium by Machigin method modified by CRIAAS* [ICS: 13.080.10]. StandardInform. https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=34906267

GOST 26423-85. (2011). *Soils. Methods for determination of specific electric conductivity, pH and solid residue of water extract* (Version Update 8-86) [ICS: 13.080.20]. StandardInform. https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=31534545

Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control.a sedimentological approach. *Water Research*, *14*(8), 975–1001. https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8

Hossain, T. J., Chowdhury, S. I., Mozumder, H. A., Chowdhury, M. N. A., Ali, F., Rahman, N., & Dey, S. (2020). Hydrolytic Exoenzymes Produced by Bacteria Isolated and Identified From the Gastrointestinal Tract of Bombay Duck. *Frontiers in Microbiology*, *11*. https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.02097

Houben, D., Sonnet, P., & Cornelis, J.-T. (2014). Biochar from Miscanthus: A potential silicon fertilizer. *Plant and Soil*, *374*(1), 871–882. https://doi.org/10.1007/s11104-013-1885-8

ISO 18400-203:2018. (2018). *Soil quality—Sampling—Part 203: Investigation of potentially contaminated sites* (Version 1) [ICS: 13.080.05]. https://www.iso.org/standard/65226.html

ISO 18400-206:2018. (2018). *Soil quality—Sampling—Part 206: Collection, handling and storage of soil under aerobic conditions for the assessment of microbiological processes, biomass and diversity in the laboratory* (Version 1) [ICS: 13.080.05]. https://www.iso.org/standard/68249.html

IUSS Working Group WRB. (2022). *World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps* (4th ed.). International Union of Soil Sciences (IUSS). https://www.isric.org/sites/default/files/WRB_fourth_edition_2022-12-18.pdf

Janati, W., Mikou, K., El Ghadraoui, L., & Errachidi, F. (2022). Isolation and characterization of phosphate solubilizing bacteria naturally colonizing legumes rhizosphere in Morocco. *Frontiers in Microbiology*, *13*. https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.958300

Khan, A. H. A., Kiyani, A., Santiago-Herrera, M., Ibáñez, J., Yousaf, S., Iqbal, M., Martel-Martín, S., & Barros, R. (2023). Sustainability of phytoremediation: Post-harvest stratagems and economic opportunities for the produced metals contaminated biomass. *Journal of Environmental Management*, *326*, 116700. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116700

Khan, W.-D., Ramzani, P. M. A., Anjum, S., Abbas, F., Iqbal, M., Yasar, A., Ihsan, M. Z., Anwar, M. N., Baqar, M., Tauqeer, H. M., Virk, Z. A., & Khan, S. A. (2017). Potential of miscanthus biochar to improve sandy soil health, in situ nickel immobilization in soil and nutritional quality of spinach. *Chemosphere*, *185*, 1144–1156. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.097

Khaw-ngern, K., Peuchthonglang, P., Klomkul, L., & Khaw-ngern, C. (2021). The 9Rs Strategies for the Circular Economy 3.0. *Psychology and Education Journal*, *58*(1), Article 1. https://doi.org/10.17762/pae.v58i1.926

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

Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). *World map of the Köppen-Geiger climate classification updated*. *15*, 259–263. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130

Lide, D. R. (2005). Table 14-14. Abundance of elements in the Earth's crust and in the sea. In *CRC Handbook of Chemistry and Physics, Internet Version 2005* (p. 2661). CRC Press. http://www.hbcpnetbase.com

Madigan, M. T., Bender, K. S., Buckley, D. H., Brock, T. D., Sattley, W. M., & Stahl, D. A. (2018). *Brock Biology of Microorganisms* (15th ed.). Pearson.

Mamarasulov, B., Davranov, K., Jahan, M. S., Jabborova, D., Nasif, O., Ansari, M. J., Danish, S., & Datta, R. (2022). Characterization, enzymatic and biochemical properties of endophytic bacterial strains of the medicinal plant *Ajuga turkestanica* (Rgl.) Brig (*Lamiaceae*). *Journal of King Saud University - Science*, *34*(6), 102183. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102183

Mamirova, A., Baubekova, A., Pidlisnyuk, V., Shadenova, E., Djansugurova, L., & Jurjanz, S. (2022). Phytoremediation of Soil Contaminated by Organochlorine Pesticides and Toxic Trace Elements: Prospects and Limitations of Paulownia tomentosa. *Toxics*, *10*(8), Article 8. https://doi.org/10.3390/toxics10080465

Masi, C., Gemechu, G., & Tafesse, M. (2021). Isolation, screening, characterization, and identification of alkaline protease-producing bacteria from leather industry effluent. *Annals of Microbiology*, *71*(1), 24. https://doi.org/10.1186/s13213-021-01631-x

McPherson, M. R., Wang, P., Marsh, E. L., Mitchell, R. B., & Schachtman, D. P. (2018). Isolation and Analysis of Microbial Communities in Soil, Rhizosphere, and Roots in Perennial Grass Experiments. *Journal of Visualized Experiments : JoVE*, (137), 57932. https://doi.org/10.3791/57932

MECR. (2016). *Ministry of the Environment of the Czech Republic. Decree laying down detailed rules for the protection of quality of agricultural land and amending. Decree specifying some details of agricultural land resources protection.* (Decree No. 153/2016). Ministry of the Environment of the Czech Republic (MECR).

Meddeb-Mouelhi, F., Moisan, J. K., & Beauregard, M. (2014). A comparison of plate assay methods for detecting extracellular cellulase and xylanase activity. *Enzyme and Microbial Technology*, *66*, 16–19. https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2014.07.004

MH RK. (2021). *Hygienic standards for the safety of the environment (soil). Order of the Ministry of Health of the Republic of Kazakhstan dated April 21, 2021 No. RK DSM-32. Registered with the Ministry of Justice of the Republic of Kazakhstan on April 22, 2021 No. 22595* (22595).

Mierzwa-Hersztek, M., Gondek, K., Klimkowicz-Pawlas, A., & Baran, A. (2017). Effect of wheat and Miscanthus straw biochars on soil enzymatic activity, ecotoxicity, and plant yield. *International Agrophysics*, *31*(3), 367–375. https://doi.org/10.1515/intag-2016-0063

Mohite, B. (2013). Isolation and characterization of indole acetic acid (IAA) producing bacteria from rhizospheric soil and its effect on plant growth. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *13*(3), 638–649. https://doi.org/10.4067/S0718-95162013005000051

Ntabo, R. M., Nyamache, A. K., Lwande, W., Kabii, J., & Nonoh, J. (2018). Enzymatic Activity of Endophytic Bacterial Isolates from Selected Mangrove Plants in Kenya. *The Open Microbiology Journal*, *12*(1). https://doi.org/10.2174/1874285801812010354

Nurzhanova, A. A., Nurmagambetova, A. S., Zakharov, A., Zhumasheva, Z., & Mamirova, A. (2026). Post-Phytoremediation Feedstock-Derived Biochar in Supporting Miscanthus × giganteus Development on Post-Mining Soils. *Agronomy*, *16*(11), 1115. https://doi.org/10.3390/agronomy16111115

Nurzhanova, A. A., Pidlisnyuk, V., Nurmagambetova, A., Zhumasheva, Z., Naizabayeva, L., & Mamirova, A. (2025). Biochar as a tool to optimise *Miscanthus sinensis* resilience and phytoremediation efficiency: Case study of contamination by mixture of Ni and 4.4′-DDE. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, *7*, 802–818. https://doi.org/10.1016/j.enceco.2025.04.006

Phetcharat, P., & Duangpaeng, A. (2012). Screening of Endophytic Bacteria from Organic Rice Tissue for Indole Acetic Acid Production. *Procedia Engineering, ISEEC*, *32*, 177–183. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1254

Pidlisnyuk, V., Mamirova, A., Newton, R. A., Grycová, B., Klemencová, K., Leštinský, P., Ust'ak, S., & Shapoval, P. (2025). Miscanthus phytotechnology of Cu- or Zn-spiked soils supported by contaminated Miscanthus biochar—Is this a viable option for valorization? *Environmental Science and Pollution Research*, *32*(12), 7737–7759. https://doi.org/10.1007/s11356-025-36097-w

Pidlisnyuk, V., Mamirova, A., Pranaw, K., Shapoval, P. Y., Trögl, J., & Nurzhanova, A. (2020). Potential role of plant growth-promoting bacteria in Miscanthus x giganteus phytotechnology applied to the trace elements contaminated soils. *International Biodeterioration & Biodegradation*, *155*, 105103. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2020.105103

Pidlisnyuk, V., Mamirova, A., Pranaw, K., Stadnik, V., Kuráň, P., Trögl, J., & Shapoval, P. (2022). Miscanthus × giganteus Phytoremediation of Soil Contaminated with Trace Elements as Influenced by the Presence of Plant Growth-Promoting Bacteria. *Agronomy*, *12*(4), Article 4. https://doi.org/10.3390/agronomy12040771

Pidlisnyuk, V., Newton, R. A., Ust'ak, S., Al Souki, K. S., Burdová, H., Trögl, J., Grycová, B., Klemencová, K., Leštinsky, P., & Mamirova, A. (2025). Assessing the potential of different biochars to support *Miscanthus × giganteus* phytoremediation in petroleum hydrocarbons-contaminated soil. *Industrial Crops and Products*, *229*, 120971. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.120971

Porter, M. (1985). *What is Value Chain*. 13.

Priya, A. K., Muruganandam, M., Ali, S. S., & Kornaros, M. (2023). Clean-Up of Heavy Metals from Contaminated Soil by Phytoremediation: A Multidisciplinary and Eco-Friendly Approach. *Toxics*, *11*(5), Article 5. https://doi.org/10.3390/toxics11050422

Rai, P. K., Lee, S. S., Zhang, M., Tsang, Y. F., & Kim, K.-H. (2019). Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management. *Environment International*, *125*, 365–385. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.067

Robb, D. A. (2013). *Metals and Micronutrients: Uptake and Utilization By Plants*. Academic Press.

Saleem, M., Pierce, D., Wang, Y., Sens, D. A., Somji, S., & Garrett, S. H. (2024). Heavy Metal(oid)s Contamination and Potential Ecological Risk Assessment in Agricultural Soils. *Journal of Xenobiotics*, *14*(2), Article 2. https://doi.org/10.3390/jox14020037

Schwyn, B., & Neilands, J. B. (1987). Universal chemical assay for the detection and determination of siderophores. *Analytical Biochemistry*, *160*(1), 47–56. https://doi.org/10.1016/0003-2697(87)90612-9

Shreshtha, K., Prakash, A., Pandey, P. K., Pal, A. K., Singh, J., Tripathi, P., Mitra, D., Jaiswal, D. K., Santos-Villalobos, S. de los, & Tripathi, V. (2025). Isolation and characterization of plant growth promoting rhizobacteria from cacti root under drought condition. *Current Research in Microbial Sciences*, *8*, 100319. https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100319

Siddig, M. M. S., Asabere, S. B., Al-Farraj, A. S., Brevik, E. C., & Sauer, D. (2025). Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in anthropogenically-affected soils of Sudan: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Hazardous Materials Advances*, *17*, 100601. https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100601

Song, U., & Park, H. (2017). Importance of biomass management acts and policies after phytoremediation. *Journal of Ecology and Environment*, *41*(1), 13. https://doi.org/10.1186/s41610-017-0033-4

ST RK 2131-2011. (2012). *Soil quality. Determination of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls. Gaschromatographic method with electron capture detection (MOD)* (Version ISO 10382:2002 (MOD) - GOST R 53217-2008 (MOD)) [ICS: 71.040.50]. https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=31624159&pos=2;-108#pos=2;-108

ST RK 3477-2019. (2019). *Soils. Determination of organic matter by Tyurin method* [ICS: 17.020]. https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=39003906

ST RK ISO 11047-2008. (2009). *Soil quality. Determination of cadmium, chromium, cobalt, copper, lead, manganese, nickel, and zinc in aqua regia extracts of soil. Flame and electrothermal atomic absorption spectrometric methods (IDT)* [ICS: 13.080].

Stephenson, C., & Black, C. R. (2014). One step forward, two steps back: The evolution of phytoremediation into commercial technologies. *Bioscience Horizons: The International Journal of Student Research*, *7*, hzu009. https://doi.org/10.1093/biohorizons/hzu009

Tan, H. W., Pang, Y. L., Lim, S., & Chong, W. C. (2023). A state-of-the-art of phytoremediation approach for sustainable management of heavy metals recovery. *Environmental Technology & Innovation*, *30*, 103043. https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103043

Thavamani, P., Malik, S., Beer, M., Megharaj, M., & Naidu, R. (2012). Microbial activity and diversity in long-term mixed contaminated soils with respect to polyaromatic hydrocarbons and heavy metals. *Journal of Environmental Management*, *99*, 10–17. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.12.030

UN. (2025). *The Sustainable Development Goals Report 2025* (Nos. 978-92-1-107159–7; p. 51). United Nations. https://unstats.un.org/sdgs/report/2025/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2025.pdf

US EPA 3051A. (2007). *Method 3051A (SW-846): Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Oils* (Version Revision 1). US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development.

Velho-Pereira, S., & Kamat, N. M. (2011). Antimicrobial Screening of Actinobacteria using a Modified Cross-Streak Method. *Indian Journal of Pharmaceutical Sciences*, *73*(2), 223–228. https://doi.org/10.4103/0250-474x.91566

Vodyanitskii, Y. N. (2010). Equations for assessing the total contamination of soils with heavy metals and metalloids. *Eurasian Soil Science*, *43*(10), 1184–1188.

Vyborov, S. G., Pavelko, A. I., Shchukin, V. N., & Yankovskaya, E. V. (2004). *Assessment of Soil Pollution Hazard Based on an Integrated Indicator of a Disturbed Geochemical Field*. 195–197.

Wiesmeth, H. (2021). Chapter 2—The circular economy – Understanding the concept. In H. Wiesmeth (Ed.), *Implementing the Circular Economy for Sustainable Development* (pp. 11–18). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821798-6.00002-8

Information about the authors:

Mamirova Aigerim Amanzholovna – PhD, Associate Professor, Research Professor at Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: aigerim.mamirova@mail.com).

Akhmetalina Nargiza Kairatovna – Senior Laboratory Assistant at Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: nargizaakhmetalina@gmail.com).

Asan Aiganym – Laboratory Assistant at K. I. Satpayev Kazakh National Research Technical University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: asanaiganym13@gmail.com).

Baubekova Almagul Serikovna – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher at Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: baubekova.almagul@gmail.com).

Ermekova Nurshat Bekbolatkyzy – Researcher at Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: nurshat.ermekova@gmail.com).

Nurmagambetova Asiya Serikovna – Senior Researcher at the Institute of Plant Biology and Biotechnology (Almaty, Kazakhstan, e-mail: asiyanurm@mail.ru).

Berzhanova Ramza Zhainabekovna – Candidate of Sciences, Associate Professor, Associate Research Professor at Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: ramza05@mail.ru).

Pidlisnyuk Valentina – Doctor of Chemical Sciences, Professor at Jan Evangelista Purkyně University (Ústí nad Labem, Czech Republic, e-mail: Valentyna.Pidlisniuk@ujep.cz).

Авторлар туралы мәлімет:

Мамирова Айгерим Аманжоловна – PhD, доцент, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің профессор-зерттеушісі (Алматы, Қазақстан, e-mail: aigerim.mamirova@mail.com).

Ахметалина Наргиза Кайратовна – Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің аға зертханашысы (Алматы, Қазақстан, e-mail: nargizaakhmetalina@gmail.com).

Асан Айганым – Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университетінің зертханашысы (Алматы, Қазақстан, e-mail: asanaiganym13@gmail.com).

Баубекова Алмагуль Сериковна – биология ғылымдарының кандидаты, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: baubekova.almagul@gmail.com).

Ермекова Нуршат Бекболатқызы – Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: nurshat.ermekova@gmail.com).

Нурмагамбетова Асия Сериковна – Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институтының аға ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: asiyanurm@mail.ru).

Бержанова Рамза Жаинабековна – ғылым кандидаты, доцент, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің доцент-зерттеушісі (Алматы, Қазақстан, e-mail: ramza05@mail.ru).

Pidlisnyuk Valentina – химия ғылымдарының докторы, профессор, Ян Евангелиста Пуркине университетінің профессоры (Усти-над-Лабем, Чехия, e-mail: Valentyna.Pidlisniuk@ujep.cz).

Сведения об авторах:

Мамирова Айгерим Аманжоловна – PhD, доцент, доцент-исследователь Казахского национального университета имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: aigerim.mamirova@mail.com).

Ахметалина Наргиза Кайратовна – старший лаборант Казахского национального университета имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: nargizaakhmetalina@gmail.com).

Асан Айганым – лаборант Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И. Сатпаева (Алматы, Казахстан, e-mail: asanaiganym13@gmail.com).

Баубекова Алмагуль Сериковна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник Казахского национального университета имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: baubekova.almagul@gmail.com).

Ермекова Нуршат Бекболатовна – научный сотрудник Казахского национального университета имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: nurshat.ermekova@gmail.com).

Нурмагамбетова Асия Сериковна – старший научный сотрудник Института биологии и биотехнологии растений (Алматы, Казахстан, e-mail: asiyanurm@mail.ru).

Бержанова Рамза Жаинабековна – кандидат наук, доцент, доцент-исследователь Казахского национального университета имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: ramza05@mail.ru).

Pidlisnyuk Valentina – доктор химических наук, профессор Университета Яна Евангелиста Пуркине (Усти-над-Лабем, Чешская Республика, e-mail: Valentyna.Pidlisniuk@ujep.cz).

Received May 27, 2026
Accepted September 23, 2026

IRSTI 87.21.09; 87.19.03 https://doi.org/10.26577/EJE208830726

A.A. Samadova[1*], H.L. Rafiyeva[1], A.A. Guliyeva[2], F.A. Khalilova[1]

[1]Baku State University, Baku, Azerbaijan
[2]Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry, Baku, Azerbaijan
*e-mail: aytensamadova@bsu.edu.az

ADSORPTION OF COPPER AND ZINC IONS BY NATURAL ZEOLITES IN SOIL AND AQUATIC ECOSYSTEMS AND ASSESSMENT OF THEIR BIOLOGICAL AND ECOLOGICAL IMPACTS

In this research, the potential of modified natural zeolites obtained from the Aydag deposit in Azerbaijan to protect living organisms from the harmful effects of heavy metal ions in soil and aquatic environments was experimentally investigated. The results indicate that zeolites modified with monoethanolamine (MEA) can be used as a highly effective agent to mitigate the impact of copper and zinc ions on living organisms in soil and water ecosystems. The adsorption selectivity was determined as $Cu^{2+} > Zn^{2+}$. MEA-modified zeolites not only facilitate the removal of metal ions but also play a protective role for microorganisms, plants, and aquatic fauna by maintaining the biological and ecological stability of soil and water ecosystems. This sorbent enables the protection of soil microorganisms (Azotobacter, Pseudomonas, Bacillus), earthworms and other soil fauna, as well as aquatic plants and microorganisms (zooplankton, phytoplankton) from toxic metal ions. The binding of metal ions to the sorbent surface and their subsequent release reduce their toxic effects on living organisms, thereby contributing to the maintenance of ecosystem functions, including organic matter decomposition, nitrogen fixation, soil fertility, and the preservation of aquatic biogeography. Thus, MEA-modified Aydag zeolites present a promising approach for reducing heavy metal pollution, restoring soil and water environments, expanding biomonitoring capabilities, and supporting the sustainable management of ecosystems from both ecological and biological perspectives.

Keywords: ecology, soil and aquatic ecosystems, reduction of heavy metal toxicity, zeolite, adsorption, protection of microorganisms.

А.А. Самадова[1*], Х.Л. Рафиева[1], А.А. Гулиева[2], Ф. Халилова[1]

[1]Баку Мемлекеттік университеті, Баку, Әзірбайжан
[2]Катализ және Бейорганикалық химия институты, Баку, Әзірбайжан
*e-mail: aytensamadova@bsu.edu.az

Топырақ және су экожүйелерінде табиғи цеолиттер арқылы мыс пен мырыш иондарының адсорбциясы және олардың биологиялық және экологиялық әсерін бағалау

Бұл зерттеуде Әзірбайжандағы Айдағы кен орнынан алынған модификацияланған табиғи цеолиттердің топырақ және су орталарындағы ауыр металл иондарының зиянды әсерінен тірі ағзаларды қорғау әлеуеті тәжірибелік түрде зерттелді. Нәтижелер моноэтаноламинмен (MEA) модификацияланған цеолиттердің топырақ және су экожүйелеріндегі тірі ағзаларға мыс пен мырыш иондарының әсерін азайту үшін жоғары тиімді құрал ретінде қолданылуы мүмкін екенін көрсетті. Адсорбция селективтілігі $Cu^{2+} > Zn^{2+}$ тәртібімен анықталды. MEA-мен модификацияланған цеолиттер металл иондарын жоюға ғана емес, сонымен қатар топырақ және су экожүйелерінің биологиялық және экологиялық тұрақтылығын сақтай отырып, микроорганизмдерге, өсімдіктерге және су фаунасына қорғаныштық әсер етеді. Бұл сорбент топырақ микроорганизмдерін (Azotobacter, Pseudomonas, Bacillus), жауынқұрттарды және басқа да топырақ фаунасын, сондай-ақ су өсімдіктері мен микроорганизмдерін (зоопланктон, фитопланктон) улы металл иондарынан қорғауды қамтамасыз етеді. Металл иондарының сорбент бетімен байланысуы және олардың кейінгі босап шығуы тірі ағзаларға уытты әсерін төмендетеді, осылайша экожүйе функцияларының сақталуына, соның ішінде органикалық заттардың ыдырауына, азоттың фиксациясына, топырақ құнарлылығына және су биогеографиясының сақталуына ықпал етеді. Осылайша, MEA-мен модификацияланған Айдағ цеолиттері ауыр металдармен ластануды азайту, топырақ пен су орталарын қалпына келтіру, биомониторинг

 © 2026 Al-Farabi Kazakh National University

экологиялық және биологиялық тұрғыдан тұрақты басқаруды қамтамасыз ету үшін перспективалы тәсіл болып табылады.

Түйін сөздер: экология, топырақ және су экожүйелері, ауыр металдардың уыттылығын төмендету, цеолит, адсорбция, микроорганизмдерді қорғау.

А.А. Самадова[1*], Х.Л. Рафиева[1], А.А. Гулиева[2], Ф. Халилова[1]

[1]Бакинский государственный университет, Баку, Азербайджан
[2]Институт катализа и неорганической химии, Баку, Азербайджан
*e-mail: aytensamadova@bsu.edu.az

Адсорбция ионов меди и цинка природными цеолитами в почвенных и водных экосистемах и оценка их биологического и экологического воздействия

В данном исследовании экспериментально изучен потенциал модифицированных природных цеолитов, полученных из Айдагского месторождения в Азербайджане, в защите живых организмов от вредного воздействия ионов тяжёлых металлов в почвенных и водных средах. Полученные результаты показывают, что цеолиты, модифицированные моноэтаноламином (MEA), могут быть использованы в качестве высокоэффективного средства для снижения воздействия ионов меди и цинка на живые организмы в почвенных и водных экосистемах. Селективность адсорбции установлена в следующем порядке: $Cu^{2+} > Zn^{2+}$. Модифицированные MEA цеолиты не только способствуют удалению ионов металлов, но и выполняют защитную функцию для микроорганизмов, растений и водной фауны, поддерживая биологическую и экологическую стабильность почвенных и водных экосистем. Данный сорбент обеспечивает защиту почвенных микроорганизмов (Azotobacter, Pseudomonas, Bacillus), дождевых червей и другой почвенной фауны, а также водных растений и микроорганизмов (зоопланктон, фитопланктон) от токсичных ионов металлов. Связывание ионов металлов с поверхностью сорбента и их последующее высвобождение снижает их токсическое воздействие на живые организмы, способствуя сохранению функций экосистем, включая разложение органического вещества, фиксацию азота, плодородие почвы и сохранение водной биогеографии. Таким образом, цеолиты Айдагского месторождения, модифицированные MEA, представляют собой перспективный подход к снижению загрязнения тяжёлыми металлами, восстановлению почвенной и водной среды, расширению возможностей биомониторинга и обеспечению устойчивого управления экосистемами с экологической и биологической точек зрения.

Ключевые слова: экология, почвенные и водные экосистемы, снижение токсичности тяжёлых металлов, цеолит, адсорбция, защита микроорганизмов.

Introduction

The technologies employed in the processing industry do not ensure complete extraction of metals from raw materials and, in many cases, become a source of industrial pollution with significant ecological and biological impacts. Wastewaters discharged from chemical industry enterprises (Hajiyeva et al., 2020; Tang et al., 2016), mining activities (Miller, 2013), and battery manufacturing facilities (Gottesfeld & Cherry, 2011) are predominantly contaminated with heavy metal ions, which adversely affect aquatic ecosystems, soil microflora, and the life of plants and animals (Afandiyeva & Gadirova, 2025). Typically, high concentrations of metals such as Al, Ca, Fe, Si, Co, Cu, Zn, Mn, V, Ga, and others are observed in processing wastes and wastewaters, making them widespread environmental pollutants.

Typically, high concentrations of metals such as Al, Ca, Fe, Si, Co, Cu, Zn, Mn, V, Ga, and others are observed in processing wastes and the wastewaters generated during their washing, which are recognized as widespread environmental pollutants. These metals may exert adverse effects on soil microorganisms (e.g., *Azotobacter, Nitrosomonas,* and *Pseudomonas*) and soil microflora by disrupting their activity, thereby weakening key processes in soil ecosystems such as biological nitrogen fixation, decomposition of organic matter, and maintenance of soil structure (Hajiyeva et al., 2016). At the same time, heavy metals present in wastewater adversely affect plant root systems by hindering the uptake of water and mineral nutrients and inducing toxic effects in plant tissues and leaves, which in turn negatively impacts the vital activities of soil animals, such as earthworms and other soil invertebrates.

Such contamination disrupts the ecological balance of microorganisms, negatively affects the biogeography of soil and water ecosystems, and may even lead to the decline of certain species (Haciyeva et al., 2018). The recovery of valuable components

from processing wastes is not only economically significant but also of critical biological and ecological importance, as it contributes to the mitigation of environmental risks by preventing the migration of metals into ecosystems and living organisms under the influence of atmospheric factors. (GBD 2019 Colorectal Cancer Collaborators, 2022; Mushak, 1991).

The long-term effects of such contamination degrade the quality of the soil humus layer, reduce microbial diversity, and may disrupt plant life cycles. In addition, metals can migrate into water bodies, exerting toxic effects on fish, zooplankton, and aquatic plants, thereby weakening the stability of aquatic ecosystems.

Currently, large volumes of technical waste that contaminate the environment and local biogeography have accumulated in the area of the Dashkasan Ore Processing and Enrichment Plant in Azerbaijan. These wastes lead to the accumulation of heavy metal ions in soil layers and groundwater sources, which adversely affects the physiological activity and reproduction of soil microorganisms (e.g., *Azotobacter, Pseudomonas,* and *Bacillus*), earthworms, scorpions, and other soil invertebrates, as well as disrupts the life cycles of aquatic plants and organisms, thereby weakening the biological balance of the ecosystem. The accumulation of heavy metals reduces the microbiological activity of soil, slows the decomposition of organic matter, and limits nitrogen fixation, thereby negatively affecting soil fertility and the sustainability of plant life. (Linnik & Nabivanets, 1986).

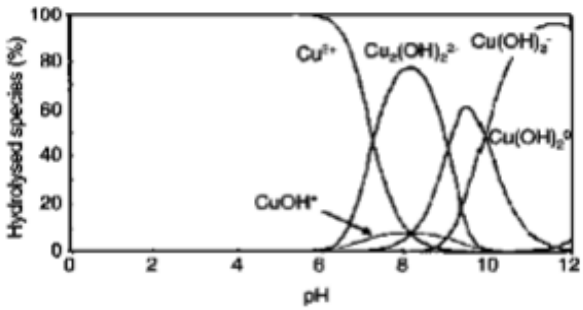
At the same time, these wastes provide potential raw materials for the recovery of certain valuable metals and offer opportunities for ecological and biological remediation. (Hasanova et al., 2025). In our previous studies, we demonstrated the feasibility of recovering metals such as Cu and Zn from iron concentrate wastes using heap leaching with diluted sulfuric acid. This approach is not only economically efficient but also enables the restoration of soil and aquatic ecosystems, the protection of microorganisms and soil fauna, and the safeguarding of aquatic plants and life from toxic metals. (Albayrak et al., 2023). At the highest level of the ecosystem, human health benefits, particularly by providing conditions that support the normalization of cardiovascular system functions, which is especially relevant in the 21st century (Abou Ghayda et al., 2021). Thus, this method contributes to ensuring biological safety and maintaining the functional stability of ecosystems (Geydarov et al., 2016).

İn the solution, the prevailing form of copper primarily depends on hydrolysis processes, the absence of complex formation, and the pH of the medium. These factors play a crucial role in selecting optimal adsorption conditions and in the remediation of contaminated soil and water environments. The distribution of copper ionic forms depending on pH is shown in Figure 1 (Wang & Qin, 2005), which is significant for ecological monitoring and biological safety measures.

In solution, the prevailing form of copper primarily depends on hydrolysis processes, complex formation, and the pH of the medium. These factors play a crucial role not only in selecting optimal adsorption conditions but also in the remediation of contaminated soil and water environments, as well as in preserving the physiological activity of microorganisms (*Azotobacter, Pseudomonas, Bacillus*) and soil fauna.

The distribution of copper ionic forms depending on pH is shown in Figure 1 (Wang & Qin, 2005), and this information is important for ecological monitoring, pollution assessment, and the planning of biological safety measures. As the pH changes, the bioavailability and toxic effects of copper ions on soil microflora, plants, and aquatic organisms also vary, directly influencing ecosystem functional stability and the life cycles of living organisms.

Figure 1
Percentage distribution of copper in ionic forms in solution as a function of pH



In the pH range of 1.5–6.5, copper in solution predominantly exists as Cu^{2+} ions. As a result of hydrolysis, the following aquahydroxo complexes are formed: $[Cu(OH)]^{+}$, $[Cu(OH)_2]^{0}$, $[Cu(OH)_3]^{-}$, $Cu_2(OH)_2^{2-}$, $[Cu(OH)_4]^{2-}$, $[Cu(OH)(H_2O)_3]^{+}$, $[Cu(OH)_3(H_2O)]^{-}$.

At pH ≥ 9, more than 40% of copper is present as $[Cu(OH)_2]^{0}$ and $[CuCO_3]^{0}$.

In mining waters, copper predominantly exists as sulfate salts, so within the pH range of 1–8, the presence of Cu^{2+} and $Cu(OH)^{+}$ ions is more likely.

Hydrolysis and speciation of zinc ions significantly influence their behavior in solutions due to zinc's ability to undergo hydrolysis and form complexes. As a result, mono- and polynuclear hydroxo complexes are formed. For zinc, the following mononuclear complexes are characteristic: $[[Zn(OH)]^{+}$; $[Zn(OH)_2]^{0}$; $[Zn(OH)_8]^{6-}$; $[Zn_2(OH)_2]^{2+}$. Hydroxocomplexes such as $[Zn_2(OH)_6]^{2-}$ make up 2% of the total composition (Linnik & Nabivanets, 1986).

At pH values of 4.6-6.5, zinc is in the form of Zn2+ ions (92.4-99.8%); In the form of Zn(OH)+ (0.2-7.6%), the available ionic form of zinc at pH 2.5-4.5 corresponds to real solutions (92.4-99.5%).

The ratio between the forms of polynuclear hydroxocomplexes depends on the pH of the environment. The most prevalent form in wastewater is $[Zn(OH)]^{+}$ is the least prevalent form, followed by $[Zn(OH)_2]^{0}$. $[ZnCO_3]^{0}$ and $[Zn(HCO_3)]^{+}$ complexes are the most prevalent in aquatic systems in the absence of organic complexing agents. The formation of $[Zn(OH)]^{+}$ hydroxo complexes is also inevitable.

In an acidic medium, in the absence of organic ligands, the Zn^{2+} concentration is 85–97%. At pH 4.6–6.5, zinc occurs as Zn^{2+} ions (92.4–99.8%) and as $Zn(OH)^{+}$ (0.2–7.6%). At pH 2.5–4.5, the available ionic form of zinc accounts for 92.4–99.5% in real solutions.

The distribution balance of zinc ion forms in solution is as shown below:

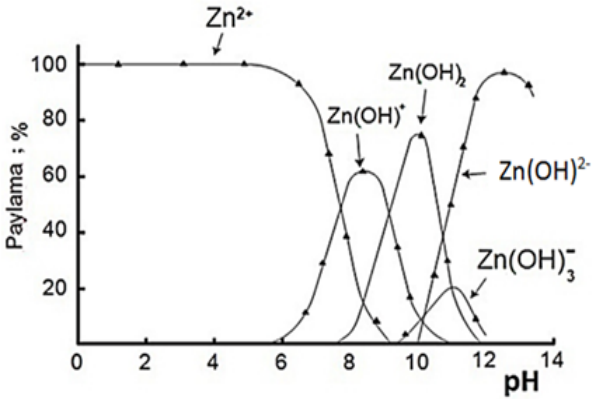
$$C(Zn^{2+}) = [Zn^{2+}] + [Zn(OH)]^{+} + [Zn(OH)_2]^{0} + + [Zn(OH)_3]^{-} + [Zn(OH)_4]^{2-}$$

The distribution of hydrolysis forms calculated according to the hydrolysis constant is as shown in Figure 2 (Hasanova et al., 2025).

Recently, sorbents have been widely used in the world for the purification of industrial wastewater used for technical purposes from waste of various chemical and biological nature,wellas for the purification of chemical and metallurgical wastewater from ions of non-ferrous, heavy and noble metals. Numerous scientific studies have also been conducted to create a technology for purifying organic compounds from wastewater by obtaining sorbents based on tree trunks and waste, using methods of their activation.

Figure 2

Percentage distribution of zinc in ionic forms in solution as a function of pH



In addition, coal-based sorbents are important for the purification of industrial wastewater and the extraction of non-ferrous metal ions (Pan et al., 2009). There have also been many scientific studies on the development of technology for cleaning organic compounds from wastewater by obtaining sorbents based on tree trunks and waste, using methods of their activation. Studies show that the extraction of heavy metal ions from wastewater by simple and inexpensive sorption is more practical and cost-effective (Jia & Lu, 2014). A number of adsorbents, such as activated carbon (Dąbrowski, 2001), clays (El Mouzdahir et al., 2007), polymers (Ovejero et al., 2010) and zeolites (Ekmekyapar et al., 2006) have been proposed and studied for the purification of various wastewaters (Gulieva et al., 2018).

Heap leaching solutions are considered an additional source of valuable metals, and their recovery is important both economically and for the protection of ecosystems. However, many methods such as precipitation, ion exchange, adsorption, and reverse osmosis are expensive and technologically challenging to implement, and some of these methods may also affect the activity of microorganisms in soil and water environments. Zeolites act as selective sorbents for non-ferrous metals (Cd^{2+}, Cu^{2+}, Zn^{2+}) and their application can help reduce heavy metal toxicity in both soil and aquatic ecosystems. The adsorption capacity of zeolites is typically enhanced through modification with acids or alkalis, which allows for the effective capture of metals without harming microbiological activity. (Dąbrowski, 2001).

The monoethanolamine (MEA) molecule contains donor-active nitrogen and oxygen atoms, a feature that allows MEA to act as both a mono- and

polydentate ligand. As a result, it enables the effective adsorption of metal ions such as Cu^{2+} and Zn^{2+} from soil and water environments, while also contributing to the protection of microorganisms and plant life from toxic metals.

Materials and methods

For the study, natural zeolites obtained from the Aydag deposit were used. The zeolites were ground into powder with an average particle size of 75 μm, and their composition was determined using X-ray fluorescence spectroscopy (Phillips Magix Pro) and X-ray diffraction (Phillips X'Pert D993). To enhance the sorbent's capacity for capturing copper (Cu^{2+}) and zinc (Zn^{2+}) ions, it was modified with monoethanolamine (MEA), triethanolamine, methylamine hydroxide, and hydroxylamine hydroxide. This modification was carried out to reduce the toxic effects of metals on soil and aquatic ecosystems and to preserve the activity of microorganisms (*Azotobacter, Pseudomonas, Bacillus*).

Prepared Solutions: In the experiments, 1000 mg/L solutions were prepared using technogenic wastewaters and salts of $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ and $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$. The pH of the solutions was adjusted to a range of 3–4. These solutions are not only a valuable source of metals from an economic perspective but also hold ecological and biological significance due to their potential toxic effects on soil and aquatic biogeography.

Experimental Methods: Adsorption studies were conducted using the batch equilibrium method. An appropriate amount of modified zeolite was added to the solution, and the adsorption process was carried out under continuous stirring. All experiments were performed in triplicate, and the average results were used for calculations.

Adsorption Parameters: The equilibrium adsorption capacity (Q_e, mg/g) and adsorption efficiency (R, %) were calculated using the following equations:

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m}$$

$$R(\%) = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100$$

Here, C_0 and C_e (mg/L) represent the initial and equilibrium concentrations of metal ions, respectively; V (mL) is the solution volume, and m (g) is the sorbent mass.

Investigation of pH Effect: The pH of the solutions was varied within the range of 1.5–6.5, and the prevailing forms of Cu^{2+} and Zn^{2+} ions (Cu^{2+}, $Cu(OH)^+$, Zn^{2+}, $Zn(OH)^+$) and their adsorption efficiency were monitored. These studies are of biological and ecological significance for the protection of soil microflora and aquatic ecosystems from toxic metals.

Adsorption Isotherms and Kinetic Modeling: The adsorption results were modeled using the Langmuir and Freundlich isotherms. The Langmuir model describes monolayer adsorption, while the Freundlich model accounts for empirical adsorption behavior. This approach allows for the evaluation of the sorbent's capacity to capture metal ions and for determining its adsorption efficiency from an ecological and biological perspective.

The application of modified zeolites enables the effective adsorption of copper and zinc ions without disrupting the activity of soil microorganisms, while also preserving the life cycles of aquatic plants and microorganisms. This approach not only facilitates the economic recovery of metal ions but also maintains ecosystem functional stability and minimizes the biological and chemical impacts of contamination in soil and water environments.

Results and discussion

Copper (Cu^{2+}) and zinc (Zn^{2+}) ions were selected to study the adsorption properties of the prepared samples under static conditions. These ions are of interest not only from a technological perspective but also from a biological and ecological standpoint due to their potential toxic effects on soil and aquatic ecosystems. Experiments were conducted to investigate the influence of solution pH, initial concentrations of Cu^{2+} and Zn^{2+} ions, adsorption time, and sorbent reusability on the adsorption capacity of zeolites. This allowed for the determination of optimal adsorption conditions aimed at minimizing the impact of heavy metals on soil microflora, aquatic plants, and microorganisms, while ensuring ecological safety.

Adsorption studies were carried out using the batch equilibrium method. For this purpose, 1000 mg/L solutions of $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ and $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ (pH = 3–4) were prepared in deionized water, and appropriate amounts of zeolite samples were added to specific volumes of the stock solutions. All experiments were performed in triplicate, and the average values were used for calculations. Under standard conditions, the efficiency of the adsorption process

was determined using both FEK spectrophotometric and titrimetric methods. The equilibrium adsorption capacity (Q_e, mg/g) and adsorption efficiency (R, %) were calculated using the following equations:

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m}$$

$$R(\%) = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100$$

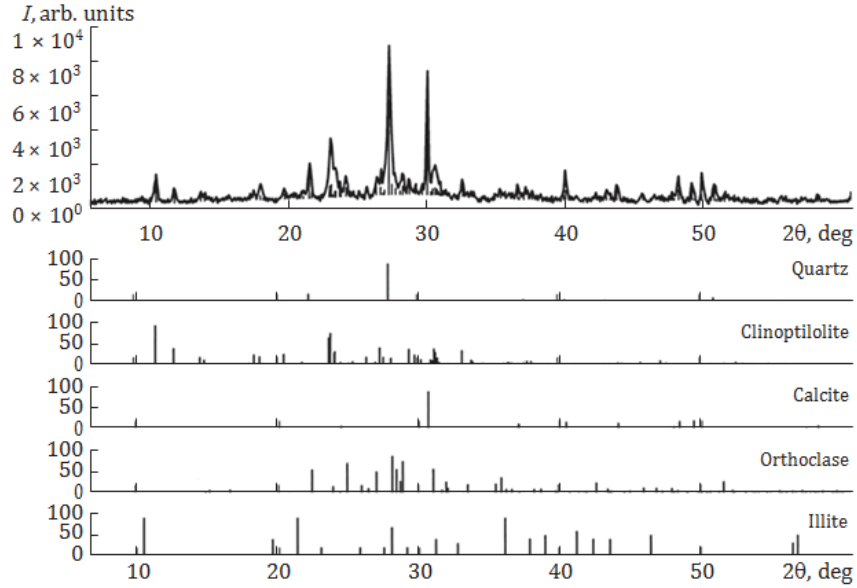
As the sorbent, high-silica zeolites containing an average of 80–85% clinoptilolite were used. The chemical composition (%) of the zeolites employed was as follows:

66.9 SiO_2, 14.2 Al_2O_3, 5.05 CaO, 3.55 Na_2O, 2.18 K_2O, 2.01 Fe_2O_3, 0.57 MgO və 5.54 H_2O.

The sorbent was ground into powder with an average particle size of approximately 75 μm, and its composition was analyzed using a Phillips X'Pert Model D993 diffractometer. The elemental composition was determined by X-ray fluorescence spectroscopy using a Phillips Magix Pro instrument (Gulieva et al., 2018).

The diffraction pattern of the initial natural zeolite from the Aydag deposit is shown in Figure 3.

Figure 3
X-ray diffraction pattern and bar X-ray diffraction pattern of the starting zeolite from the Aidagsk deposit



To determine the optimal pH range, experiments were conducted under static conditions with continuous stirring. Depending on the pH, the ligand groups of the modified zeolites adopt favorable configurations, resulting in maximum adsorption. Since technogenic solutions obtained via heap leaching have varying compositions and acidities, it is important to study the effect of pH on metal ion adsorption. The adsorption behavior varies with solution acidity because it is directly related to the prevailing forms of the ions.

To enhance the adsorption capacity of zeolites, they were modified with various amines (MEA, triethanolamine, methylamine hydroxide, hydroxylamine hydroxide). The adsorption performance of the tested sorbents was compared with that of the highly acidic ion-exchange resin KU-2-8. The results demonstrated that MEA-modified zeolite exhibits higher selectivity for non-ferrous metals compared to other modifications and does not adsorb alkaline soil metals from sulfuric acid solutions. According to the findings, the recovery of copper and zinc increases with the pH of the solution. In highly acidic environments (1 N H_2SO_4), metal adsorption does not occur, indicating that desorption of metal ions is possible when using ion-exchange resins in acidic solutions.

For the MEA-modified zeolite, copper and zinc sorption increased sharply at pH 4.4–5, reaching 99.95% and 100%, respectively. These results

indicate that the MEA-modified zeolite has a high sorption capacity for both metals. The kinetic data for Cu^{2+} and Zn^{2+} sorption by unmodified and MEA-modified zeolites from the Aidag deposit are presented in Figures 4 and 5. At pH 5, the amount adsorbed increased with contact time, reaching maximum values of 95.6 for Cu^{2+} and 94 for Zn^{2+}. Sorption occurred rapidly during the first 15 minutes, and equilibrium was established within 1 hour for all metal ions (Gulieva et al., 2018).

Effect of contact time on Zn^{2+} sorption by modified (a) and natural (b) zeolites (C_{Me²⁺} = 100 mg/L, pH = 6, T = 20 °C, *m* = 1 g, *V* = 0.2).

Figure 4
Dependence of the degree of sorption of Cu2+

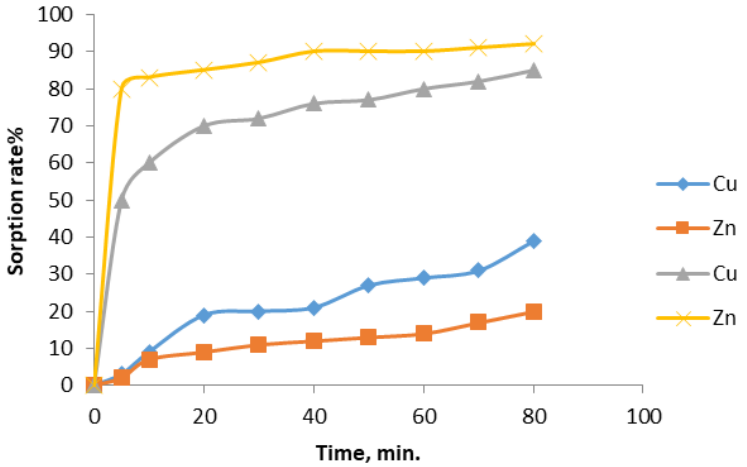
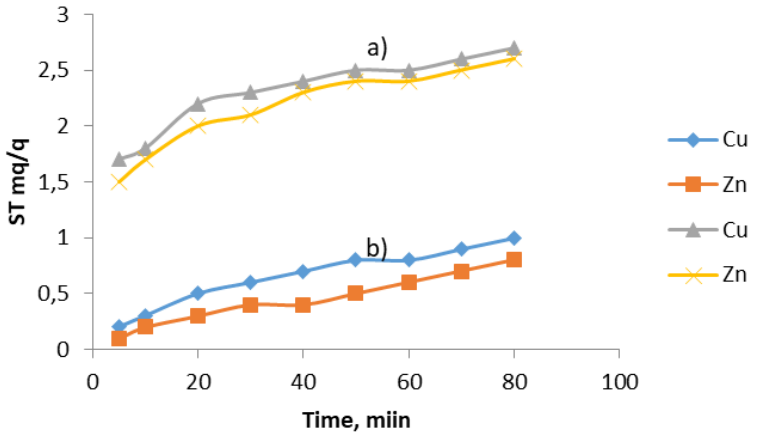


Figure 5
Dependence of the sorption capacity of Cu2+, Zn2+ ions on the contact time of modified (a) and natural zeolites (b). (CMe2+=100 mg/l, pH=6, t=20°S, m=1g, V solution= 200 ml)



The sorption characteristics for each of the studied ions were calculated by the Langmuir (Eq. 3) and Freundlich (Eq. 4) equations. Two isothermal models are the simplest and most frequently used isotherms for the representation of the adsorption of components from the liquid phase by the solid adsorbent surface (Barakat, 2008; Hui et al., 2005). The Langmuir model assumes monolayer adsorption and the Freundlich model assumes empirical adsorption (Boddu et al., 2003). The Langmuir equation was used to describe an adsorption isotherm (Guliyeva et al., 2023).

$$SE = (ST⟧_max\ K_L\ C)/(1+K_L\ C)\ , \qquad (3)$$

STmax is the ultimate limit of adsorption capacity, (mg/g), k is the adsorption equilibrium constant. The Freundlich equation is used in the analysis of experimental results corresponding to the middle part of the adsorption isotherm (Guliyeva et al., 2023).

$$ST = K'Ce1/n \qquad (4)$$

ST is the amount of solute in equilibrium (mg/g), K′ and n are empirical constants, and K′ is the adsorption value when the adsorbent concentration is 1 mg/l.

The obtained equilibrium data on adsorption were reduced to linearly transformed. (Langmuir and Freundlich equations, respectively) (Figs. 6, 7). As follows from the presented plots, the results obtained from the Langmuir and Freundlich models for all studied metal ions correspond to the experimental data.

The Freundlich equation is only valid for the ranges of the initial and medium concentrations. The constants of the Freundlich equation (K ‘, n) were determined graphically (see Fig.6).

The sorption characteristics of metal ion adsorption on the MEA-modified zeolite calculated by the Langmuir and Freundlich equations are presented in Table

Figure 6

Langmuir isotherm for the adsorption of Cu2+, Zn2+ ions

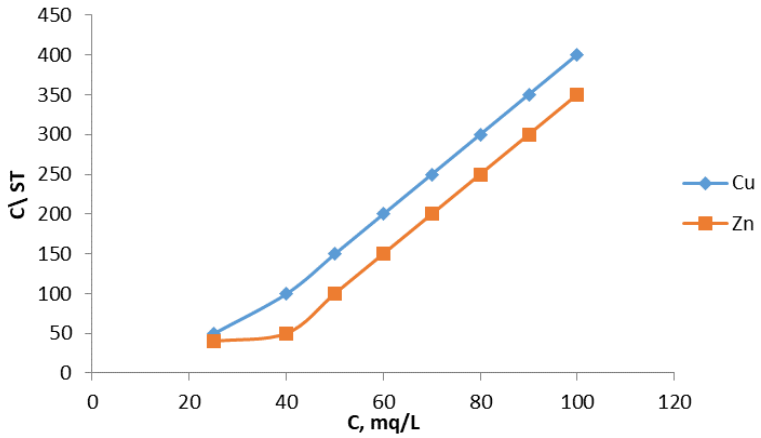
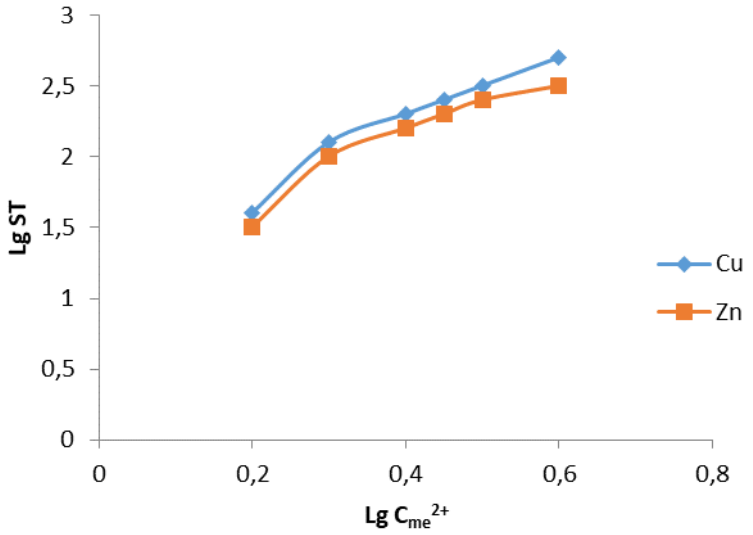


Figure 7

Freundlich isotherm of Cu2+, Zn2+ ions with MEA-modified zeolites at 20°C



Table

Cation	Langmuir equation		Freundlich equation	
	SEmax, mg/g	KL, L/mg	K ‘	N
Cu^{2}+	1.733	0.030	1.52	3.125
Zn^{2}+	2.356	0.013	0.90	2.000

Sorption characteristics calculated using the Lang muir and Freundlich equations (Eqs. (3) and (4), respec- tively) for the adsorption of te metal ions by the modified zeolite.

Conclusion

The study demonstrated the feasibility of purifying copper and zinc from technogenic solutions generated from the old wastes of the Dashkasan Ore Processing and Enrichment Plant using MEA-modified zeolite via adsorption. This approach not only enables the economic recovery of metal ions but also maintains the ecological stability of soil and aquatic ecosystems, supports the activity of soil microorganisms (*Azotobacter, Pseudomonas, Bacillus*) and earthworms, preserves the life cycles of aquatic plants and microorganisms, and thereby minimizes the biological impacts of heavy metal toxicity. At the same time, this method contributes to the restoration of the biological and chemical balance of ecosystems, the reduction of contamination in soil and water environments, and the enhancement of biomonitoring capabilities. This approach is important for ensuring ecological safety and sustainable ecosystem management, as MEA-modified zeolite effectively adsorbs toxic metals, thereby protecting both living organisms and the environment.

The application of modified zeolite allows for the high-level recovery of all valuable metals. This approach is significant not only from an economic perspective but also for the protection of soil and aquatic ecosystems, as the adsorption behavior of Cu^{2+} and Zn^{2+} ions from both model and technogenic solutions under static and dynamic conditions has been studied. This has enabled the minimization of the toxic effects of heavy metals on soil microorganisms (*Azotobacter, Pseudomonas, Bacillus*), earthworms, aquatic plants, and microorganisms. The modification of natural zeolites with MEA enhances their selectivity for non-ferrous metal ions (Cu^{2+}, Zn^{2+}), thereby preventing metal accumulation in ecosystems and protecting the life activities of organisms. The adsorption mechanism of non-ferrous metals by natural zeolites modified with complexing agents has been established: in MEA-modified zeolites, adsorption occurs through the formation of surface complexes between the modifier and the metal ions, followed by desorption, in which the metal ions are released back into the solution upon complex decomposition. This process reduces the bioavailability of toxic metals and contributes to the restoration of ecological balance in soil and water environments.

References

Abou Ghayda, R., Park, D. D.-Y., Lee, J. Y., Kim, J. Y., Lee, K. H., Hong, S. H., Yang, J. W., Kim, J. S., Jeong, G. H., Kronbichler, A., Koyanagi, A., Jacob, L., Oh, H., Li, H., Yang, J. M., Kim, M. S., Lee, S. W., Yon, D. K., Shin, J. I., & Smith, L. (2021). Body mass index and mortality in patients with cardiovascular disease: An umbrella review of meta-analyses. *European Review for Medical and Pharmacological Sciences, 25*(1), 273–286. https://doi.org/10.26355/eurrev_202101_24393

Afandiyeva, L. M., & Gadirova, E. M. (2025). Ecological assessment of some water resources of Karabakh. *Processes of Petrochemistry and Oil Refining, 26*(3), 943–953.

Albayrak, L., Turksoy, V., Khalilov, R., & Eftekhari, A. (2023). Investigation of heavy metal exposure and trace element levels in acute exacerbation of COPD. *Journal of King Saud University – Science, 35*(1), Article 102422. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102422

Barakat, M. A. (2008). Adsorption of heavy metals from aqueous solutions on synthetic zeolite. *Research Journal of Environmental Sciences, 2*(1), 13–22. https://doi.org/10.3923/rjes.2008.13.22

Boddu, V. M., Abburi, K., Talbott, I. L., & Smith, E. D. (2003). Removal of hexavalent chromium from wastewater using a new composite chitosan biosorbent. *Environmental Science & Technology, 37*, 4449–4456.

Dąbrowski, A. (2001). Adsorption—from theory to practice. *Advances in Colloid and Interface Science, 93*, 135–224.

Ekmekyapar, F., Aslan, A., Bayhan, Y. K., & Cakici, A. (2006). Biosorption of copper(II) by nonliving lichen biomass of Cladonia rangiformis Hoffm. *Journal of Hazardous Materials, 137*(1), 293–298. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.02.003

El Mouzdahir, Y., Elmchaouri, A., Mahboub, R., ElAnssari, A., Gil, A., & Korili, S. A. (2007). Interaction of stevensite with Cd^{2+} and Pb^{2+} in aqueous dispersions. *Applied Clay Science, 35*(1–2), 47–58. https://doi.org/10.1016/j.clay.2006.08.002

GBD 2019 Colorectal Cancer Collaborators. (2022). Global, regional, and national burden of colorectal cancer and its risk factors, 1990–2019: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet Gastroenterology & Hepatology, 7*(7), 627–647. https://doi.org/10.1016/S2468-1253(22)00044-9

Geydarov, A., Kashkay, Ch. M., Guliyeva, A. A., & Huseynova, A. B. (2016). Recovery of precious metals from Dashkesan mineral tailings by combined methods. *Azerbaijan Chemical Journal*, (3), 121–129.

Gottesfeld, P., & Cherry, C. R. (2011). Lead emissions from solar photovoltaic energy systems in China and India. *Energy Policy, 39*(9), 4939–4946.

Gulieva, A. A., Geidarov, A. A., Makhmudov, M. K., & Kasumova, N. M. (2018). Sorption recovery of cobalt, copper, zinc, and manganese ions from technical solutions by modified natural zeolites. *Russian Metallurgy (Metally), 2018*(7), 605–613. https://doi.org/10.1134/S0036029518070054

Guliyeva, A. A., Abbasov, S. S., Agayeva, N. A., Nurullaev, H. K., Abbasova, N. I., Heydarov, A. A., & Ahmedov, V. M. (2023). Efficiency of graphite carbon nitride in the sorption of iron (Fe^{2+}) and copper (Cu^{2+}) ions from aqueous solution. *Azerbaijan Chemical Journal*, (2), 123–130.

Haciyeva, S. R., Quliyeva, N. Q., Samadova, A. A., & Mustafayev, I. I. (2018). Kinetics of gas generation during radiation-chemical transformation of oil degraded in aqueous medium. *Chemical Problems*, (2), 264–270.

Hajiyeva, S., Aliyeva, T., & Yusifova, M. (2020). The ecological state of Baoyuk Shor lake of Azerbaijan. *Environmental Monitoring and Assessment, 192*(12). https://doi.org/10.1007/s10661-020-08762-9

Hajiyeva, S. R., Guliyeva, N. G., & Samedova, A. A. (2016). Radiolysis of oil fraction of petroleum degraded on water surface. *Chemical Problems*, (2), 164–168.

Hajiyeva, S. R., Mustafayev, I. I., & Samadova, A. A. (2025). Eco-chemical study of drinking water pollution (case of Okhchu River). *Processes of Petrochemistry and Oil Refining, 26*(3), 716–740. https://doi.org/10.62972/1726-4685.2025.3.716

Hasanova, G., Babashli, A., & Akhundova, N. (2025). The role of microorganisms isolated from some river waters of Azerbaijan in bioremedition. *Journal of Ecological Engineering, 26*(4), 323–333.

Hui, K. S., Chao, C. Y., & Kot, S. C. (2005). Removal of mixed heavy metal ions in waste water by zeolite 4A and residual products from recycled coal fly ash. *Journal of Hazardous Materials, 127*, 89–101.

Jia, W., & Lu, S. (2014). Few-layered graphene oxides as superior adsorbents for the removal of Pb(II) ions from aqueous solutions. *Korean Journal of Chemical Engineering, 31*, 1265–1270.

Linnik, P. N., & Nabivanets, B. I. (1986). *Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах*. Гидрометеоиздат.

Miller, J. R. (2013). Forensic assessment of metal contaminated rivers in the 21st century using geochemical and isotopic tracers. *Minerals, 3*(2), 192–246.

Mushak, P. (1991). Gastro-intestinal absorption of lead in children and adults: Overview of biological and biophysico-chemical aspects. *Chemical Speciation & Bioavailability, 3*(3–4), 87–104.

Ovejero, G., Romero, M. D., Díaz, I., Mestanza, M., & Díez, E. (2010). Bentonite as an alternative adsorbent for the purification of styrene monomer: Adsorption kinetics, equilibrium and process design. *Adsorption Science & Technology, 28*(2), 101–123. https://doi.org/10.1260/0263-6174.28.2.101

Pan, B., Pan, B., Zhang, W., Lv, L., Zhang, Q., & Zheng, S. (2009). Development of polymeric and polymer-based hybrid adsorbents for pollutants removal from waters. *Chemical Engineering Journal, 151*(1–3), 19–29. https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.02.036

Tang, S., Zhang, H., & Lee, H. K. (2016). Advances in sample extraction. *Analytical Chemistry, 88*(1), 228–249. https://doi.org/10.1021/acs.analchem.5b04040

Wang, X.-S., & Qin, Y. (2005). Equilibrium sorption isotherms for Cu^{2+} on rice bran. *Process Biochemistry, 40*(2), 677–680. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.01.043

Information about the authors:

Samadova Aytan Aftandil – PhD in Chemistry, part-time lecturer at the Department of Ecological Chemistry, Baku State University (Baku, Azerbaijan, e-mail: aytensamadova@bsu.edu.az).

Rafiyeva Hijran Latif – PhD in Chemistry, senior lecturer at the Department of Ecological Chemistry, Baku State University (Baku, Azerbaijan, e-mail: hicran_chem@mail.ru).

Quliyeva Aybəniz Qurban – PhD in Chemistry, Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry (Baku, Azerbaijan, e-mail: aybeniz.quliyeva72@mail.ru).

Khalilova Fargana Akif – PhD in Chemistry, lecturer at the Department of Analytical Chemistry, Baku State University (Baku, Azerbaijan, e-mail: ferqana_28@mail.ru).

Авторлар туралы мәлімет:

Самедова Айтан Афтандилқызы – химия ғылымдары бойынша философия докторы (PhD), экологиялық химия кафедрасының сағаттық оқытушысы, Baku State University (Баку, Әзірбайжан, e-mail: aytensamadova@bsu.edu.az).

Рафиева Хиджран Латифқызы – химия ғылымдары бойынша философия докторы (PhD), экологиялық химия кафедрасының аға оқытушысы, Baku State University (Баку, Әзірбайжан, e-mail: hicran_chem@mail.ru).

Гулиева Айбениз Курбанқызы – химия ғылымдары бойынша философия докторы (PhD), Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry (Баку, Әзірбайжан, e-mail: aybeniz.quliyeva72@mail.ru).

Халилова Фаргана Акифқызы – химия ғылымдары бойынша философия докторы (PhD), аналитикалық химия кафедрасының оқытушысы, Baku State University (Баку, Әзірбайжан, e-mail: ferqana_28@mail.ru).

Сведения об авторах:

Самедова Айтан Афтандил кызы – доктор философии по химии, почасовой преподаватель кафедры экологической химии, Baku State University (Баку, Азербайджан, e-mail: aytensamadova@bsu.edu.az).

Рафиева Хиджран Латиф кызы – доктор философии по химии, старший преподаватель кафедры экологической химии, Baku State University (Баку, Азербайджан, e-mail: hicran_chem@mail.ru).

Гулиева Айбениз Курбан кызы – доктор философии по химии, Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry (Баку, Азербайджан, e-mail: aybeniz.quliyeva72@mail.ru).

Халилова Фаргана Акиф кызы – доктор философии по химии, преподаватель кафедры аналитической химии, Baku State University (Баку, Азербайджан, e-mail: ferqana_28@mail.ru).

Received April 09, 2026
Accepted September 27, 2026

2-бөлім

ҚОРШАҒАН ОРТА ЛАСТАУШЫЛАРЫНЫҢ БИОТАҒА ЖӘНЕ ТҰРҒЫНДАР ДЕНСАУЛЫҒЫНА ӘСЕРІН БАҒАЛАУ

Section 2

ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL POLLUTION ON BIOTA AND HEALTH

Раздел 2

ОЦЕНКА ДЕЙСТВИЯ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА БИОТУ И ЗДОРОВЬЕ НАСЕЛЕНИЯ

IRSTI 34.35.33 https://doi.org/10.26577/EJE208830826

A.M. Tlenshieva[1,2]*, D.D. Kozhakhmetova[1], D. Chekimbayeva[1]

[1]Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
[2]Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan
*e-mail: rshynmuratkyzy@gmail.com

INTEGRATED HYDROCHEMICAL AND BIOCHEMICAL EVALUATION OF ENVIRONMENTAL POLLUTION IN LAKE BALKHASH

Lake Balkhash is one of the largest inland water bodies in Central Asia. The regional water supply plays an important role in fisheries and biodiversity conservation. In recent decades, the lake has been subjected to intense anthropogenic impact due to industrial activities, agricultural runoff, and hydrological changes. This has led to an increase in pollution by pollutants. This study presents a comprehensive assessment of heavy metal contamination in surface waters, bottom sediments, and commercial fish species in the northern part of Lake Balkhash (Karaganda region), combining chemical analysis with biochemical biomarkers of oxidative stress from fish liver. Surface water and sediment samples were collected in the Torangalyk Bay near the Balkhash mining and metallurgical complex and in the Bertys Bay near the city of Balkhash. The results revealed significant excess of permissible concentrations of Cu, Co, Pb, Ni, Cr and Zn in surface waters, with the highest levels recorded near the Balkhash mining and metallurgical complex and Bertys Bay. At all study sites, the concentration of heavy metals in bottom sediments exceeded the permissible limits, indicating long-term accumulation. Elevated levels of Cu, Co, Pb and Ni were found in fish tissue, especially in the gills and liver. Biochemical analysis revealed increased lipid peroxidation and decreased activity of antioxidant enzymes in fish taken from contaminated areas, indicating severe oxidative stress. The results of the research confirm that industrial pollution poses a significant threat to the ecological health of Lake Balkhash and its ichthyofauna.

Keywords: Lake Balkhash, heavy metals, fish, oxidative stress, malondialdehyde, superoxide dismutase, catalase.

А.М. Тленшиева[1,2]*, Д.Д. Қожахметова[1], Д. Чекимбаева[1]

[1]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан
[2]Қ.И. Сәтпаев атындағы Қазақ ұлттық ғылыми-зерттеу техникалық университеті, Алматы, Қазақстан
*e-mail: rshynmuratkyzy@gmail.com

Балқаш көліндегі қоршаған ортаның ластануын кешенді гидрохимиялық және биохимиялық бағалау

Балқаш көлі – Орталық Азиядағы ең ірі ішкі су айдындарының бірі. Аймақтық сумен жабдықтау балық шаруашылығында және биоәртүрлілікті сақтауда маңызды рөл атқарады. Соңғы онжылдықтарда көл өнеркәсіптік қызметке, ауылшаруашылық ағындарына және гидрологиялық өзгерістерге байланысты қарқынды антропогендік әсерге ұшырады. Бұл ластаушы заттармен ластанудың артуына әкелді. Бұл зерттеу Балқаш көлінің солтүстік бөлігіндегі (Қарағанды облысы) жер үсті суларындағы, түбіндегі шөгінділердегі және коммерциялық балық түрлеріндегі ауыр металдардың ластануын кешенді бағалауды ұсынады, химиялық талдауды балық бауырынан тотығу стрессінің биохимиялық биомаркерлерімен біріктіреді. Балқаш тау-кен металлургиялық кешенінің маңындағы Торанғалық шығанағында және Балқаш қаласының маңындағы Бертыс шығанағында жер үсті сулары мен шөгінділердің үлгілері алынды. Нәтижелер жер үсті суларында Cu, Co, Pb, Ni, Cr және Zn рұқсат етілген концентрацияларының айтарлықтай асып кеткенін көрсетті, ең жоғары деңгей Балқаш тау-кен металлургиялық кешені мен Бертыс шығанағы маңында тіркелді. Барлық зерттеу орындарында түптік шөгінділердегі ауыр металдардың концентрациясы рұқсат етілген шектен асып кетті, бұл ұзақ мерзімді жинақталуды көрсетеді. Балық тінінде, әсіресе желбезектер мен бауырда Cu, Co, Pb және Ni деңгейінің жоғарылағаны анықталды. Биохимиялық талдау ластанған жерлерден алынған балықтарда липидтердің асқын тотығуының жоғарылауын және антиоксидантты ферменттердің белсенділігінің төмендеуін анықтады, бұл ауыр тотығу стрессін көрсетеді.

 © 2026 Al-Farabi Kazakh National University

ластанудың Балқаш көлінің және оның ихтиофаунасының экологиялық денсаулығына айтарлықтай қауіп төндіретінін растайды.

Түйін сөздер: Балқаш көлі, ауыр металдар, балық, тотығу стресі, малониальдегид, супероксиддисмутаза, каталаза.

А.М. Тленшиева[1,2]*, Д.Д. Кожахметова[1], Д. Чекимбаева[1]

[1]Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан
[2]Казахский национальный научно-технический университет им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан
*e-mail: rshynmuratkyzy@gmail.com

Комплексная гидрохимическая и биохимическая оценка загрязнения окружающей среды в озере Балхаш

Озеро Балхаш – один из крупнейших внутренних водоемов Центральной Азии. Региональное водоснабжение играет важную роль в рыболовстве и сохранении биоразнообразия. В последние десятилетия озеро подвергается интенсивному антропогенному воздействию из-за промышленной деятельности, сельскохозяйственных стоков и гидрологических изменений. Это привело к увеличению загрязнения. В данном исследовании представлена комплексная оценка загрязнения тяжелыми металлами поверхностных вод, донных отложений и промысловых видов рыб в северной части озера Балхаш (Карагандинская область), сочетающая химический анализ с биохимическими биомаркерами окислительного стресса в печени рыб. Пробы поверхностных вод и отложений были отобраны в заливе Торангалык вблизи Балхашского горно-металлургического комплекса и в заливе Бертыс вблизи города Балхаш. Результаты показали значительное превышение допустимых концентраций Cu, Co, Pb, Ni, Cr и Zn в поверхностных водах, при этом самые высокие уровни были зафиксированы вблизи Балхашского горно-металлургического комплекса и залива Бертыс. На всех участках исследования концентрация тяжелых металлов в донных отложениях превышала допустимые пределы, что указывает на долговременное накопление. Повышенные уровни Cu, Co, Pb и Ni были обнаружены в тканях рыб, особенно в жабрах и печени. Биохимический анализ выявил повышенное перекисное окисление липидов и снижение активности антиоксидантных ферментов у рыб, взятых из загрязненных районов, что указывает на сильный окислительный стресс. Результаты исследования подтверждают, что промышленное загрязнение представляет собой значительную угрозу для экологического здоровья озера Балхаш и его ихтиофауны.

Ключевые слова: озеро Балхаш, тяжелые металлы, рыба, окислительный стресс, малоновый диальдегид, супероксиддисмутаза, каталаза.

Introduction

Currently, hydrogeological and environmental problems are very pressing for one of the largest reservoirs of Kazakhstan – Lake Balkhash. As is known, these problems are associated with a decrease in the water level in the lake as a result of irrational use of the waters of the transboundary Ile River, which is the main source of hydroresources, as well as with significant pollution by wastewater from industrial enterprises and farms (Burlybaev et al., 2009; Smolyar et al., 2007). Until recently, Lake Balkhash (413 thousand sq. km.) was the main reservoir for drinking and domestic water supply, the basis for the development of the fisheries industry of Kazakhstan (Aleynik et al., 2011). However, due to accumulated problems: the discharge of industrial and agricultural wastewater into the lake, significant shallowing as a result of uncontrolled water intake both in China and Kazakhstan, the ecological state of the reservoir leaves much to be desired (Sultanova et al., 2012). The waters of Lake Balkhash are polluted by various pollutants: heavy metals, pesticides, radionuclides, oil products (Ministry of Ecology, Geology and Natural Resources of Kazakhstan, 2019; Nurtazin et al., 2016). From the water, they settle to the bottom and, accumulating in sediments, enter the bodies of the reservoir's inhabitants through the food chain (Amirgaliev et al., 2012; Lopareva et al., 2016). The lake, once unique in its ichthyological composition, is currently irrevocably losing its biodiversity. Previously, Lake Balkhash was home to more than twenty species of fish, six of which were native: the Ili and Balkhash marinka, Balkhash perch, spotted and one-colored sloth, and Balkhash minnow, which are now very rare to catch. Of the introduced species, carp, barbel, eastern bream, Aral barbel, Siberian dace, carp, tench, pike-perch, catfish, osman, and crucian carp have disappeared. Catches of commercial fish, such as carp, pike-perch, asp, and bream, are becoming increasingly rare. Due to their diet and life in the aquatic environment, fish are particularly vulnerable and susceptible to severe pollution, as they cannot

escape the harmful effects of pollutants (Canli et al., 2018; Mansour et al., 2023). Fish, compared to invertebrates, are more sensitive to many toxicants and are a convenient object for assessing the state of the ecosystem. Many researchers have noted a decline in the number of native and valuable fish species, as well as other aquatic organisms in Lake Balkhash (Canli et al., 2018; Kumar et al., 2023). Due to pollution of the aquatic environment, fish are constantly exposed to toxic substances, which leads to metabolic disorders that can manifest themselves in changes in various biochemical parameters of organs. Heavy metals are also known to cause oxidative stress by mediating free reactive oxygen species (Balali-Mood et al., 2021). Fish accumulate pollutants primarily in their fatty tissues, such as the liver, and the effect becomes apparent when the concentration in such tissues reaches a threshold level (Wang et al., 2011). However, this accumulation depends on their intake, storage, and excretion from the body (Aralova et al., 2016; Moldakhanova et al., 2023). Thus, the state of fish biodiversity reflects the ecological state of the reservoir.

Materials and methods

Study area and objects of study

The samples were collected along the route from Almaty to the northern shore of Lake Balkhash:

1. Torangalyk Bay near the village of the same name near the city of Balkhash (620 km from Almaty, coordinates: 46°76′35″ N 74°83′72″ E) (Figures 1-2). There are no industrial enterprises in the village of Torangalyk, so the coastline in this area is popular with Kazakhstan and is home to recreation centers and tourist attractions. Vacationers swim and fish in the lake.

2. Lake Balkhash near the Balkhash Mining and Metallurgical Plant (BMMK) of Kazakhmys Corporation (630 km from Almaty, coordinates: 46°82′54″ N 74°95′43″ E) (Figures 3-4). The Balkhash site of Kazakhmys Corporation has six main industrial facilities and auxiliary workshops, including three mines, one processing plant, one copper smelter, and one thermal power plant.

3. Bertys Bay, the city of Balkhash (635 km from Almaty, coordinates: 46°80′06″ N 75°03′46″ E) (Figures 5-6). The city of Balkhash is a major industrial region in Central Kazakhstan with a population of over 87,662. The city is located on the southern, flat outskirts of the Kazakh Uplands, with a gentle slope toward the lake. Over 400 enterprises are located within the city, including the Balkhashtsvetmet metallurgical plant and mining organizations.

During the field trips, juveniles of common species were collected: asp (Aspius aspius), roach (Rutilus rutilus), and carp (Cyprinus carpio). A total of 60 adult specimens were collected. For bioassays of water and sediment collected during expeditions to the northern part of Lake Balkhash (Aktogay District, Karaganda Region), water and sediment samples from sampling sites: Torangalyk Bay, the bay near the Balkhash Mining and Metallurgical Plant, Bertys Bay, and the city of Balkhash served as incubation media.

Figure 1

Map of material collection in the Torangalyk Bay near the city of Balkhash (620 km from Almaty, coordinates: 46°76′35″ N 74°83′72″ E)

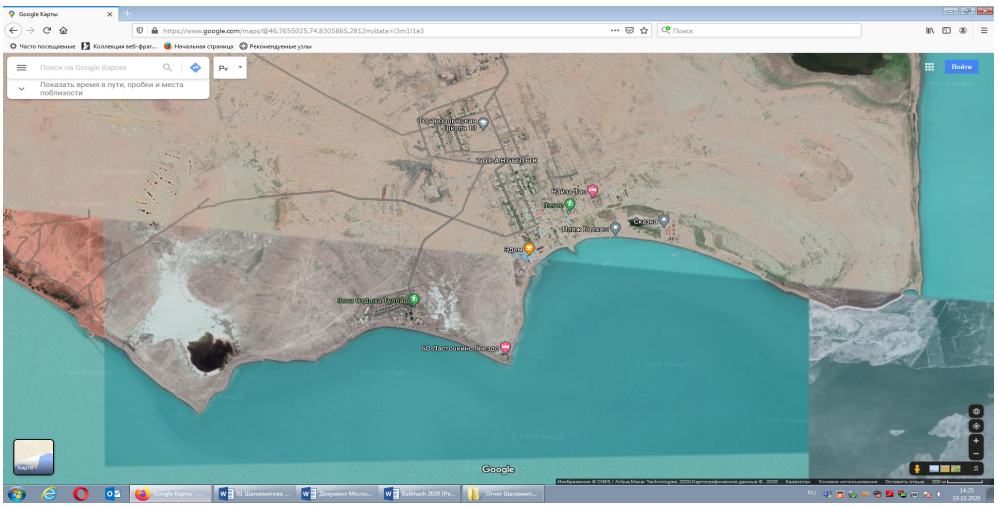


Figure 2
Torangalyk Bay, altitude = 335 mBS, water temperature = 24.5°C; pH = 8.65-8.68; mineralization 1015-1016 mg/l. The soil is sandy and rocky-sandy



Figure 3
Map of material collection in the Bertys Bay near the Balkhash copper smelter of the Kazakhmys Corporation (630 km from Almaty, coordinates: 46°82'54" N 74°95'43" E)

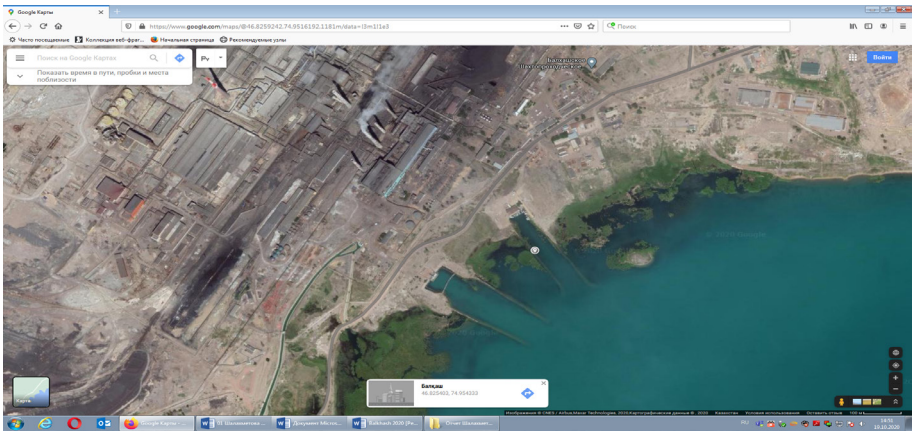


Figure 4
Bertys Bay near the Balkhash copper smelter of Kazakhmys Corporation: water temperature = 24.4o C; pH = 8.67-8.72; mineralization 1062-1065 mg/l. The soil is sandy



Figure 5
Map of material collection in Bertys Bay, the city of Balkhash (635 km from Almaty, coordinates: 46°80'06" N 75°03'46" E).

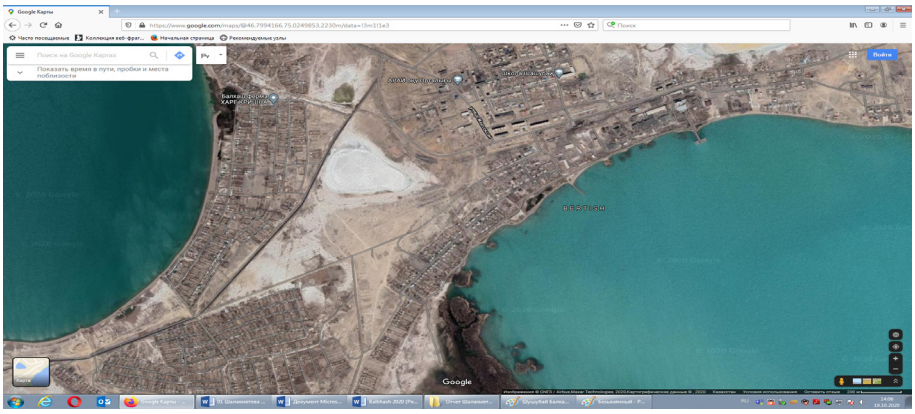


Figure 6
Bertys Bay, Balkhash city: water t=24.4 oC; pH= 8.67-8.72; mineralization 1062-1065 mg/l. The soil is sandy



Water and sediment collection methods

Surface water samples were collected, preserved, and stored at 30 control points in the northern part of Lake Balkhash in accordance with international standards and approved GOSTs (GOST 31861-2012, 2012; International Organization for Standardization, 1982). Water samples were collected at a depth of 0.5-1.0 m. Chemically resistant, clean 1-5 liter plastic containers were used as samplers. Water samples were stored and transported to the laboratory at a low temperature of 0°C in cooler bags. Before storage and preservation, algae were removed from the water through a fine-pored sieve. Before collecting water and sediment samples, a number of water parameters were determined using the following instruments: temperature, total mineralization (salts dissolved in water), and electrical conductivity were measured using a portable TDS&EC meter (Barry Century, China); pH was measured using a PH-009(I) portable pH meter (Barry Century, China); oxidation-reduction potential was measured using an ORP169E portable ORP meter (Barry Century, China); and dissolved oxygen content was measured using a DO-pen type portable DO meter (Alvin Instrument, China).

Figure 7
Collection of material at control points (northern part of Lake Balkhash) by project participants



At the same 30 survey points, also in accordance with international standards and approved GOSTs (Alam et al., 2001; De Smet et al., 2001), bottom sediments were sampled at a depth of 1 to 2 meters using grabs, grapnels, and stratimeters (tubes of various diameters). Depending on the pollutants analyzed and the properties of the bottom sediments, various preservatives (acids) were added to the samples before storage. The bottom sediment samples were stored refrigerated (from 0 to -3°C).

Methods for chemical analysis of water, sediments, and fish organs for heavy metal content

The most important indicator of the quality of the habitat of aquatic organisms is the purity of surface waters and bottom sediments for heavy metal content (Łuczyńska et al., 2018). Therefore, all collected water and sediment samples were analyzed for heavy metals in accordance with practical guidelines and GOST standards. Heavy metal content was determined after appropriate sample preparation using an MGA-915 MD atomic absorption spectrophotometer (St. Petersburg) (Bao et al., 2020; Chatta et al., 2016; Nishita et al., 2023).

In addition to chemical analysis of water and sediment samples, physicochemical analysis was performed on samples of various fish and amphibian tissues and organs (gills, lungs, muscles, and liver) brought back from the expedition. The collected fish and amphibian tissue and organ samples were stored in a freezer according to GOST 7631-85 after delivery from the expedition. Heavy metal content was determined in biological samples using atomic absorption spectrophotometry, using the above-mentioned instrument. To determine heavy metal concentrations, organ and tissue pieces were weighed and dried at room temperature. The organ pieces were placed in a fluoroplastic beaker containing a mixture of 2 ml of concentrated HNO3 and 1.5 ml of concentrated HClO4. The fluoroplastic beaker was then placed in a hermetically sealed steel beaker, which was then placed in a drying oven for 3

hours at 105°C. After cooling, the resulting solution was poured into a test tube, bringing the volume to 10 ml with distilled water (Chopra et al., 2020; Kumar et al., 2020).

High metal concentrations were measured using an MGA-915 MD atomic absorption spectrophotometer (St. Petersburg) in atomic absorption mode at wavelengths corresponding to each metal being studied.

The metal content was expressed as μg/g wet tissue using formula (1):

$$C = \gamma Vk/P \quad (1)$$

where C is the metal content; γ is the concentration; V is the solution volume, ml; k is the dilution factor, a multiple of 10; P is the tissue weight, g.

Method for determining malondialdehyde content

The thiobarbituric acid method (Abuid et al., 2021) was used to determine malondialdehyde content in the supernatant of animal liver homogenate. Tissue pieces were thawed for 5 minutes at room temperature, then placed in a cold 0.05 M Tris-HCl buffer (pH 7) supplemented with 0.1 M KCl and 0.9 mM EDTA. A 10% homogenate was then prepared using a Potter homogenizer. 0.5 ml of 0.1 M potassium phosphate buffer pH 7.4 was added to 2 ml of supernatant, and 1 ml of 30% trichloroacetic acid solution was added to the mixture, followed by thorough mixing. The samples were then centrifuged for 12 minutes at 4000 rpm.

To 2.0 ml of supernatant, 1.0 ml of 0.8% thiobarbituric acid solution was added, and the tubes were placed in a boiling water bath for 10 minutes. The samples were then cooled to room temperature, and their optical density was measured at 535 nm against a control sample (negative control) using an Apel PD-303UV digital spectrophotometer (Apel, Japan). The control sample was prepared similarly to the test samples, but with an equal volume of 0.1 M potassium phosphate buffer, pH 7.4, added instead of the biological material.

The malondialdehyde content was calculated using formula (2) and expressed as nmol per milligram of protein in the liver homogenate supernatant:

$$A/Cx16{,}83 \quad (2)$$

where A is the optical density of the test sample; C is the protein concentration of the liver homogenate supernatant (mg/ml).

Superoxide dismutase activity determination method

The method is based on the quantitative measurement of red formazan. It is formed by the reduction of nitroblue tetrazolium and superoxide radicals generated by xanthine oxidase. A 50% inhibition of this system corresponds to 1 arbitrary unit of enzyme activity (Coimbra et al., 2024).

SOD activity was determined by treating liver pieces with a 2:1 mixture of ethanol and chloroform cooled to 4°C. They were then triturated with a glass rod containing 600 mg of KH2PO4 for 15 minutes. The resulting homogenate was centrifuged at 12,000 g. Enzyme activity was determined in the supernatant. To do this, 10 μl of the supernatant was added to a 200 μl substrate solution containing xanthine and tetrazolium salt, and the reaction was initiated by adding 20 μl of xanthine oxidase. The reaction was incubated for 20 minutes in the dark at room temperature. The optical density of the samples was then measured using a Stat fax-2100 plate spectrophotometer at a wavelength of 450 nm.

SOD activity was calculated by determining the percentage inhibition (T%) of the nitroblue tetrazolium reduction reaction in the test sample. 50% inhibition of this system corresponds to 1 arbitrary unit of enzyme activity.

Catalase activity determination method

H. Luck's method (Cobanoglu, 2022) was used to determine catalase activity. The maximum absorption value of hydrogen peroxide solution is in the ultraviolet region of the spectrum at a wavelength of 230–240 nm. Under the influence of catalase, H2O2 decomposes, causing the optical density of the solution to decrease over time. This process occurs proportionally to the decrease in hydrogen peroxide concentration. Accounting for the time and difference in extinction changes allows one to calculate the catalase activity in the sample. For this purpose, 3 ml of a 1.25 x 10–2 M hydrogen peroxide solution in 1/15 M phosphate buffer was placed in a cuvette, and the reaction was initiated by adding 0.02 ml of previously centrifuged liver hemolysate to the solution. The time (t) required for the optical density of the test solution to decrease from 0.45 to 0.4 at a wavelength of 240 nm was then calculated. The amount of catalase enzyme that destroys half of the hydrogen peroxide in 100 seconds was taken as a conventional unit for calculations. The number of conventional units was recalculated taking into account the dilution per 1 g of liver.

Statistical analysis

Statistical analysis was performed using IBM SPSS 25 statistics (IBM Inc., Chicago, USA). The means and standard deviations of means of the data were calculated. Homogeneity of variance was tested using Levene's test, one-way analysis of variance and Tukey's HSD test were used to evaluate the significance of differences in multiple comparisons. The significance level was set at $p < 0.05$.

Results and their discussion

Hydrochemical analysis of water from the northern part of Lake Balkhash

The results of the chemical analysis of surface water collected during field trips to the northern part of Lake Balkhash in the Aktogay district of the Karaganda region are presented in Table 1. The following heavy metals were detected in the surface water samples: lead (Pb), chromium (Cr), cobalt (Co), manganese (Mn), nickel (Ni), cadmium (Cd), copper (Cu), zinc (Zn), and iron (Fe) in varying concentrations. The concentrations of heavy metals such as Mn, Cd, and Fe did not exceed the maximum permissible concentrations for fishery waters, but all other metals (Cu, Pb, Zn, Co, Ni, and Cr) exceeded sanitary standards by several times. Especially the excess of the content of these HM was observed in the waters of Lake Balkhash near the BKMK and the bay near the city of Balkhash, which is apparently associated with the influence of industrial and other enterprises. If, for example, the content of Zn, Cr, Ni, Pb, Cu and Co in the surface waters of the Torangalyk Bay, where there are no large industrial enterprises nearby, exceeded the MAC by, respectively: 1.1; 1.7; 1.9; 2.8; 3.7 and 7.9 times. In the surface waters of Lake Balkhash near the BMMC, the MAC for Zn, Cr, Ni, Pb, Cu and Co exceeded the sanitary level by, respectively: 3.6; 3.5; 3.2; 6.2; 13.6 and 8.2 times. From this numerical series it is evident that in the surface waters of Lake Balkhash near the BMMC the content of Cu is also significant and exceeds the MAC by 13.6 times. In the surface waters of Bertys Bay near the town of Balkhash, excess MACs for the above-mentioned heavy metals were also detected. Concentrations of Zn, Ni, Pb, Cu, and Co in Bertys Bay near the town of Balkhash exceeded sanitary standards for fishery waters by 2.9; 3.9; 4.4; 5.9; 10.5, and 6.9 times, respectively.

These results show that the MACs for heavy metals are exceeded in the following order: Cu > Co > Pb > Ni > Cr > Zn. A similar trend was observed in the bays and estuaries of Lake Balkhash (Zhambyl Region) in 2019. Apparently, the production activities of the Balkhash Mining and Metallurgical Plant have a negative impact on ecosystems in both the northern and western parts of Lake Balkhash. As is well known, emissions from the Balkhash Mining and Metallurgical Plant are a significant factor affecting the overall ecology of the Ili-Balkhash Basin. It has been established that since the early 1990s, the volume of emissions from Balkhash Non-Ferrous Metals Plant has amounted to 280,000–320,000 tons per year, while 76 tons of copper, 68 tons of zinc, and 66 tons of lead have settled on the bottom of Lake Balkhash (Ge et al., 2024). The volume of emitted pollutants nearly doubles each year. Harmful substances also enter the lake through groundwater, leaks in the tailings pond, and during dust storms, which are frequent in this region.

Chemical analysis of sediments from the northern part of Lake Balkhash

The results of the chemical analysis of bottom sediments collected during field trips to the northern part of Lake Balkhash (Aktogay district, Karaganda region) are presented in Table 2. It is evident that, compared to surface waters (Table 2), the content of all the studied heavy metals in the bottom sediments exceeds the maximum permissible concentrations. For example, in the bottom sediments of Torangalyk Bay, the heavy metal content increases in the order Cu > Zn > Co > Pb > Fe > Ni > Cr > Mn > Cd, which corresponds to exceeding the maximum permissible concentrations for soils by: 9.5; 6.3; 5.8; 5.5; 4.6; 4.0; 3.5; 1.2, and 1.1 times. In the bottom sediments of Lake Balkhash near the Bashkir Mining and Metallurgical Plant, the concentration of heavy metals significantly exceeded the MAC and pollution levels in the sediments of the Torangalyk Bay. Moreover, the excess of the MAC for heavy metals at the studied control points in the bay near the Bashkir Mining and Metallurgical Plant was as follows: Cu by 20.8 times, Zn by 18.6 times, Co by 15.7 times, Pb by 12.9 times, Fe by 11.9 times, Ni by 10.7 times, Cr by 8.5 times, Mn by 6.8 times, and Cd by 1.2 times. It is alarming that in the bottom sediments of Bertys Bay near the town of Balkhash, practically next to the town beach, the concentrations of the studied heavy metals also significantly exceeded the maximum permissible concentrations (MPCs): Cu by 14.6, Zn by 10.2, Co by 9.9, Pb by 8.9, Fe by 7.8, Ni by 5.9, Cr by 4.5, Mn by 3.8, and Cd by 1.1 times.

Thus, at all the points studied, the concentrations of heavy metals in the bottom sediments ex-

Table 1

Content of heavy metals in surface waters of Lake Balkhash (Aktogay district, Karaganda region)

HM	Pb	Cr	Co	Mn	Ni	Cd	Cu	Zn	Fe
MPc, mg/L (for fishery waters)	0,006	0,02	0,01	0,01	0,01	0,005	0,001	0,01	0,1
Hazard class	II	III	III	IV	III	II	III	III	IV
Torangalik Bay	0,0168 ± 0,0003	0,0344 ± 0,0008	0,0393± 0,0009	0,0044 ± 0,0009	0,0324 ± 0,0015	0,0018 ± 0,0005	0,0037 ± 0,0005	0,0112 ± 0,0009	0,0364 ± 0,0009
> MPC	>2,80	>1,70	>3,93		>1,94		>3, 70	>1,10	
BGMK	0,0375 ± 0,0015	0,0708 ± 0,0009	0,0823 ± 0,0011	0,0059 ± 0,0008	0,0325 ± 0,0008	0,0042± 0,0010	0,01364 ± 0,0009	0,0362 ± 0,0010	0,0645 ± 0,0012
> MPC	>6,23	>3,54	>8,23		>3,25		>13,64	>3,62	
Bertys Bay	0,0354 ± 0,0009	0,0392 ± 0,0009	0,0690 ± 0,0011	0,0060 ± 0,0012	0,00444 ± 0,0010	0,0039 ± 0,0007	0,01053 ± 0,0012	0,0294 ± 0,0010	0,0480 ± 0,0009
> MPC	>5,90	>3,92	>6,90		>4,44		>10,53	>2,94	

Table 2

Content of heavy metals in bottom sediments of Lake Balkhash (Aktogay district, Karaganda region)

HM	Pb	Cr	Co	Mn	Ni	Cd	Cu	Zn	Fe
MPC, mg/kg (for soils)	32,0	6,0	5,0	1500,0	4,0	0,5	3,0	23,0	1000,0
Hazard class	II	III	III	IV	III	II	III	I	IV
Torangalik Bay	176,26 ± 5,32	21,20 ± 1,32	29,24 ± 1,95	1800,20 ± 25,80	16,23 ± 1,34	0,55 ± 0,04	28,50 ± 1,98	149.22 ± 4,76	4624,5 ± 88,5
> MPC	>5,5	>3,5	>5,8	>1,2	>4,0	>1,1	>9,5	>6,3	>4,6
BGMK	412,80 ± 5,99	51,20 ± 3,20	78,52 ± 3,42	10200,0 ± 120,4	42,44 ± 1,03	0,64 ± 0,05	68,44 ± 3,42	427,80 ± 8,26	11900,4 ± 118,6
> MPC	>12,9	>8,5	>15,7	> 6,8	>10,7	1,2	>20,8	>18,6	>11,9
Bertys Bay	284,82 ± 9,60	27,00 ± 2,50	49,55 ± 3,85	5700,3 ± 12,82	23,57 ± 1,43	0,55 ± 0,07	43,80 ± 2,50	234,40 ± 5,60	7800,4 ± 90,8
> MPC	> 8,9	>4.5	>9,9	> 3,8	>5,9	>1,1	>14,6	>10,2	>7,8

ceeded the maximum permissible concentrations for soils. Particularly significant excesses were noted in the bay of Lake Balkhash near the Bashkir Mining and Metallurgical Plant (BMMC) facilities. Apparently, the observed excess of the MPCs for the studied metals in surface waters may be related not only to dust storms and smoke pollution from industrial enterprises, but also to the release of accumulated heavy metals from the bottom sediments via currents. The accumulation of heavy metals in water and sediments is known to pose a great danger to aquatic organisms and humans.

Heavy metal content in fish organs and tissues from bays and a cove in the northern part of lake Balkhash

As established before, the concentrations of a number of heavy metals exceeded the MAC in surface waters and bottom sediments in the northern part of Lake Balkhash (Aktogay District, Karaganda Region). Therefore, these metals were specifically determined in the organs and tissues of aquatic organisms (fish). The average content of the abovementioned heavy metals was determined in gills, muscles, and liver—organs that accumulate trace elements and pollutants to a greater extent. Since we were unable to catch bitterlings in the northern part of Lake Balkhash, heavy metal determinations were performed in the organs of commercial fish such as carp, asp, and roach. The results of determining the average HM content in fish tissues and organs are presented in Table 3. The table shows that the average Cu content in the organs of asp, roach, and carp exceeded the MAC standards by 3.2 to 6.9 times, especially in the bay of Lake Balkhash near the Bashkir Hydrometallurgical Plant and Bertys Bay near the city of Balkhash. In asp and carp, Cu accumulated most in the gills and liver and to a lesser extent in the muscles. In asp, roach, and carp, Cu accumulated most in the gills and liver and to a lesser extent in the muscles. In the studied organs of asp, roach, and carp, the excess of Co content ranged from 2.3 to 13.8 MAC. Moreover, like Cu, this HM accumulated most in the gills and liver, especially in fish from Lake Balkhash near the Bashkir Hydrometallurgical Plant and Bertys Bay (Balkhash). The average Co content in the organs of asp and roach from Lake Balkhash near the Bashkir Mining and Metallurgical Plant exceeded the permissible limits by 4.7 to 12.7 times, and in Bertys Bay (Balkhash City) by 4.0 to 9.2 times. Pb content in the gills and muscles of asp and roach from biotopes in the northern part of Lake Balkhash exceeded the MAC by 2.2 to 6.9 times, and in carp by 2.0 to 5.8 times. In the studied organs of asp, roach, and carp, Ni exceeded sanitary standards by 1.6 to 6.7 times, with the metal content being lowest in the muscles. The average Ni content in the gills and liver of asp, roach, and carp exceeded the MAC by 2.5 to 8.24 times. Thus, the highest accumulation of the studied HMs: Cu, Co, Pb, and Ni, was observed in the gills and liver of asp and carp from Torangalyk Bay, Bertys Bay (Balkhash Mountains), and Lake Balkhash (near the Bashkir Mineral Resources Complex). Roach had lower levels of these HMs in their gills and liver, but they still exceeded the maximum concentrations accepted by GOST (Table 3).

MDA Content, SOD Activity, and Catalase Activity in the Liver of Juvenile Asp (Aspius aspius), Roach (Rutilus rutilus), and Carp (Cyprinus carpio) from Biotopes in the Northern Part of Lake Balkhash

The results of a study of the liver biochemical parameters of juvenile commercial fish species from the northern part of Lake Balkhash (Aktogay District, Karaganda Region) are shown in Figures 8–10. Figure 8 shows that the livers of juvenile asp, roach, and carp from Torangalyk Bay had the lowest MDA content. The MDA content in the livers of juvenile asp from Bertys Bay (Balkhash City) was 1.5 times higher, while that of juvenile asp from Lake Balkhash (near the Bashkir Mining and Metallurgical Complex) was 2 times higher than that in the livers of juvenile asp from Torangalyk Bay. A similar increase in liver MDA levels was found in juvenile roach from the Bertys Bay (Balkhash Mountains) and Lake Balkhash (near the Bashkir Hydrometallurgical Complex), where this indicator was also 1.4 and 1.9 times higher, respectively. Liver MDA levels in juvenile carp from Torangalyk Bay were also the lowest, while those from Bertys Bay (Balkhash Mountains) and Lake Balkhash (near the Bashkir Hydrometallurgical Complex) were 1.4 and 2.1 times higher, respectively.

Biochemical analysis of liver samples also revealed decreased activity of antioxidant enzymes in juveniles of background fish species caught in Lake Balkhash (Karaganda Region). As Figure 9 shows, relatively high SOD activity was observed in the livers of juvenile asp, roach, and carp caught from Torangalyk Bay. In juvenile asp from Bertys Bay (Balkhash Mountains), SOD activity in the liver was reduced by 1.6 times compared to that in juveniles from Torangalyk Bay. SOD activity in juvenile asp from Lake Balkhash (near the Bashkir Hydrometal-

Table 3

Content of heavy metals in organs and tissues of fish from Lake Balkhash (Aktogay district, Karaganda region)

Research points	View	*Aspius aspius*				*Rutilus rutilus*				*Cyprinus carpio*			
	HM	Cu	Co	Pb	Ni	Cu	Co	Pb	Ni	Cu	Co	Pb	Ni
	MPC mcg/g*	10,0	0,5	1,0	0,5	10,0	0,5	1,0	0,5	10,0	0,5	1,0	0,5
Torangalik Bay	gills	48,40± 2,35	1,68± 0,23	2,65± 0,45	1,80± 0,05	38,43± 2,33	1,44± 0,12	3,67± 0,22	1,26± 0,09	45,34± 2,22	1,99± 0,08	1,99± 0,11	1,90± 0,09
	muscle	19,86± 0,08	1,23± 0,06	2,86± 0,16	1,52± 0,08	16,90± 1,12	1,16± 0,08	2,20± 0,11	1,12± 0,06	20,15± 2,15	1,28± 0,05	2,63± 0,16	0,82± 0,05
	liver	52,24± 4,66	2,80± 0,34	4,50± 0,32	1,90± 0,09	50,66± 2,26	2,43± 0,34	4,42± 0,25	1,48± 0,10	56,75± 5,55	2,99± 0,09	2,90± 0,11	2,52± 0,09
BGMK	gills	58,65± 6,40	3,62± 0,10	5,99± 0,18	2,90± 0,07	42,88± 2,39	2,86± 0,34	4,76± 0,19	2,55± 0,10	56,90± 4,50	3,98± 0,05	5,49± 0,18	2,98± 0,09
	muscle	36,20± 5,06	2,44± 0,18	3,90± 0,25	2,50± 0,16	30,42± 4,32	2,34± 0,09	2,99± 0,32	1,98± 0,07	36,24± 4,16	2,82± 0,09	3,86± 0,15	1.82± 0,04
	Liver	69,34± 5,32	6,35± 0,15	6,90± 0,50	3,34± 0,11	58,68± 6,05	4,95± 0,10	6,18± 0,56	2,65± 0,07	66,99± 4,32	6,29± 0,13	5,76± 0,23	4,12± 0,12
Bertys Bay	gills	54,88± 5,12	2,96± 0,08	4,65± 0,17	2,45± 0,12	40,65± 1,45	2,85± 0,09	3,56± 0,18	2,36± 0,09	50,09± 1,80	2,99± 0,08	4,40± 0,20	2,56± 0,06
	muscle	30,22± 2,60	2,00± 0,15	3,12± 0,15	2,16± 0,20	22,45± 1,65	2,25± 0,07	2,54± 0,26	1,45± 0,20	32,50± 1,95	2,05± 0,09	2,62± 0,14	1,78± 0,09
	liver	59,96± 3,22	4,59± 0,15	5,96± 0,21	2,65± 0,15	52,35± 3,55	3,28± 0,12	4,77± 0,19	2,11± 0,19	60,02± 4,32	3,89± 0,09	3,25± 0,15	3,08± 0,04

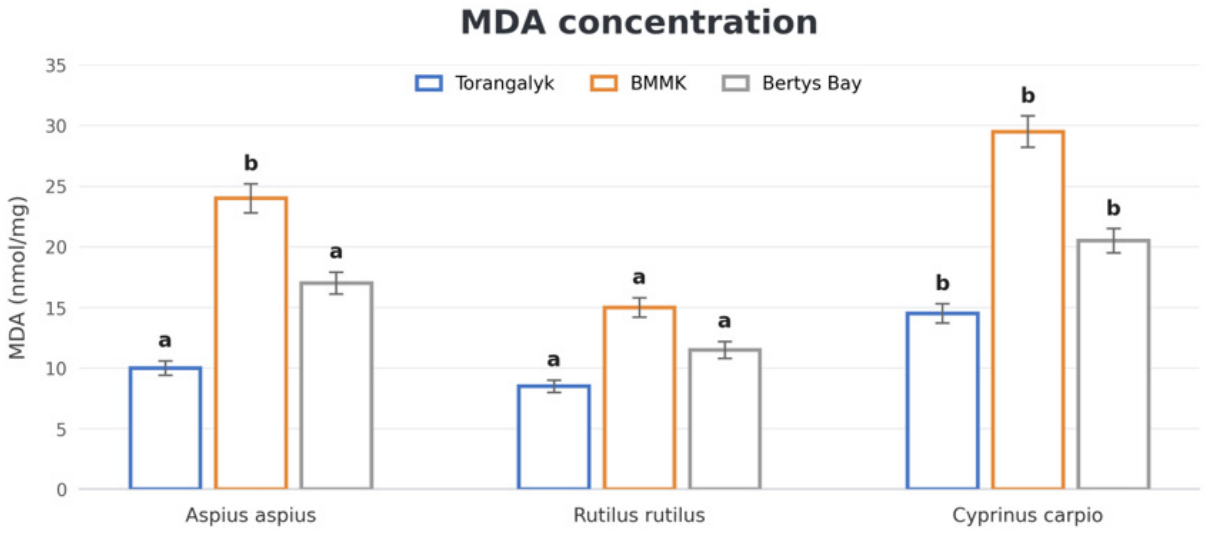
*Note: *MPV in raw fish*

lurgical Complex) was the most reduced – by 1.9 times. Among roach, the highest level of SOD activity was also recorded in juveniles from Torangalyk Bay. Compared to this biotope, SOD activity in juvenile roach from Bertys Bay (Balkhash Mountains) and Lake Balkhash (near the Bashkir Hydrometallurgical Complex) was 1.5 and 1.8 times lower, respectively. The most significant changes were observed in the liver of juvenile carp. A 1.7- and 2.2-fold decrease in SOD activity was noted in the liver of juvenile carp from Bertys Bay (Balkhash Mountains) and Lake Balkhash (near the Bashkir Hydrometallurgical Complex), respectively. A similar pattern was observed when studying catalase activity in the liver of the studied fish species. Figure 10 shows that juvenile fish from Torangalyk Bay demonstrated higher activity of this enzyme compared to the other two sites in Lake Balkhash (Karaganda Region). A 1.5-fold decrease in catalase activity was observed in juvenile asp from Bertys Bay (Balkhash City) compared to the enzyme activity in juveniles from Torangalyk Bay. Compared to the same site, the decrease in catalase activity in juvenile asp from Lake Balkhash (near the Bashkir Hydrometallurgical Complex) was 1.7 times. Catalase activity in the liver of juvenile roach from Bertys Bay (Balkhash City) and Lake Balkhash (near the Bashkir Hydrometallurgical Complex) was 1.4 and 1.5 times lower compared to the enzyme activity in juveniles from Torangalyk Bay, respectively. In juvenile carp from Bertys Bay (Balkhash Mountains) and Lake Balkhash (near the Bashkir Mining and Metallurgical Complex), suppressed catalase activity was also observed, 1.6- and 1.8-fold, respectively, compared to this value in the liver of juvenile carp from Torangalyk Bay.

Thus, biochemical analyses revealed that the livers of juvenile asp, roach, and carp caught in various biotopes in the northern part of Lake Balkhash (Karaganda Region), as well as juvenile commercial fish caught in the southwestern Balkhash region (Almaty and Zhambyl Regions), exhibited activation of lipid peroxidation processes, as evidenced by the accumulation of malondialdehyde, as well as suppression of antioxidant enzymes. This may indicate increased oxidative stress in the studied fish species under conditions of water and sediment pollution with heavy metals. Moreover, the most pronounced changes were observed in the liver of juvenile carp.

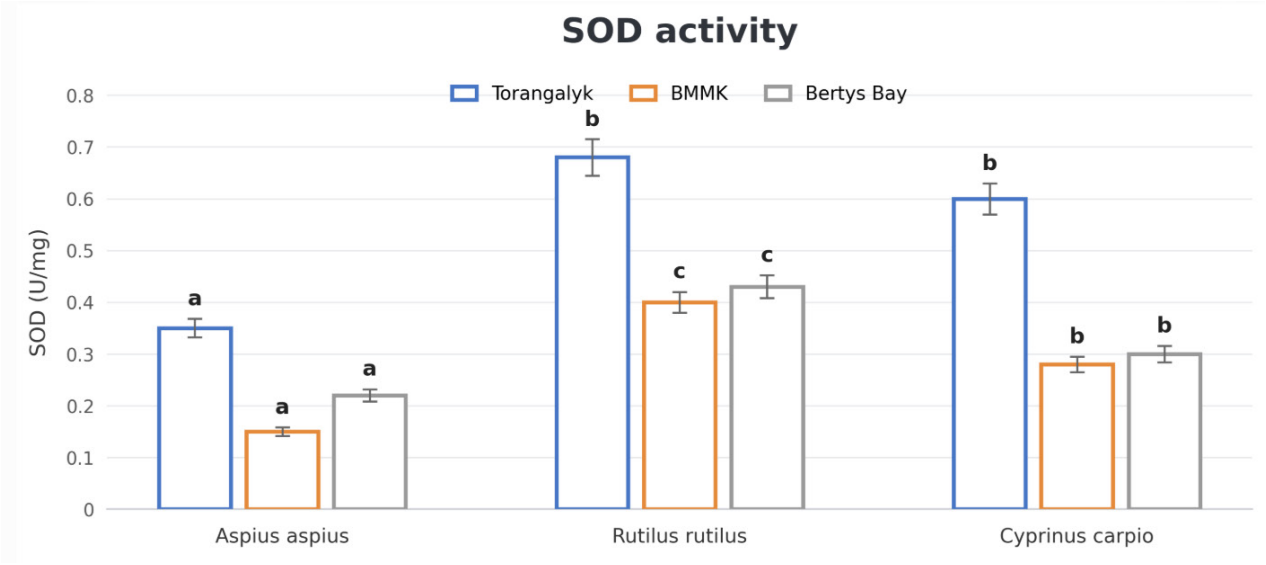
Figure 8

MDA content in the liver of juvenile asp (Aspius aspius), roach (Rutilus rutilus) and carp (Cyprinus carpio) from biotopes of the northern part of Lake Balkhash (Karaganda region)



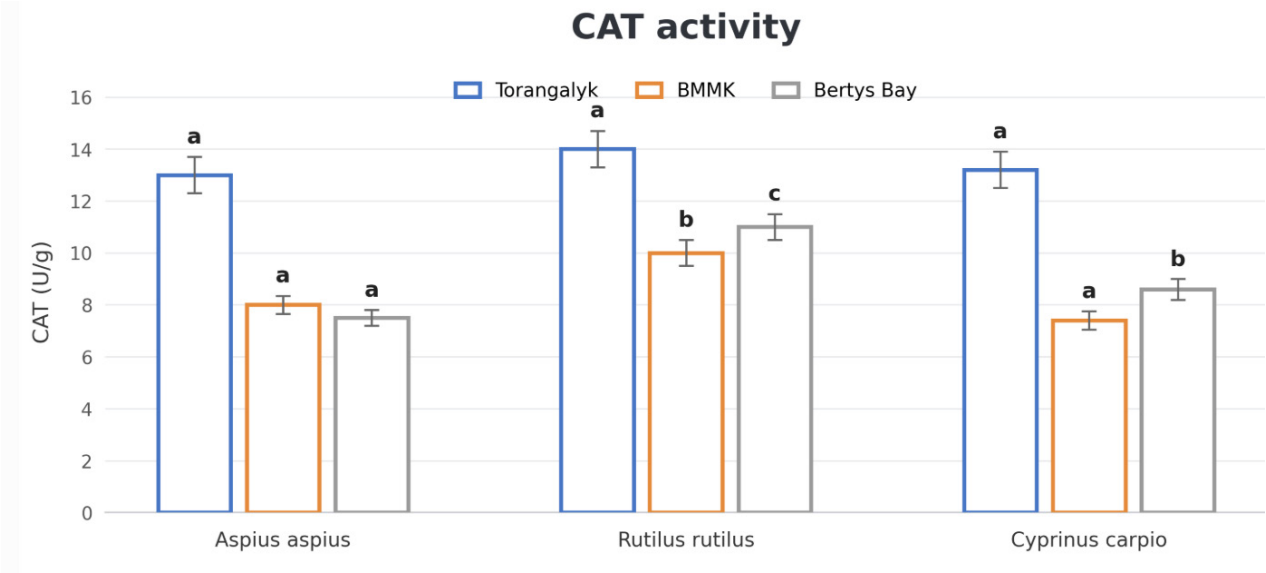
Tukey's HSD test was used to evaluate the significance of differences in multiple comparisons. The significance level was set at $p < 0.05$

Figure 9
SOD activity in the liver of juvenile asp (Aspius aspius), roach (Rutilus rutilus) and carp (Cyprinus carpio) from biotopes of the northern part of Lake Balkhash (Karaganda region)



Tukey's HSD test was used to evaluate the significance of differences in multiple comparisons. The significance level was set at $p < 0.05$

Figure 10
Catalase activity in the liver of juvenile asp (Aspius aspius), roach (Rutilus rutilus) and carp (Cyprinus carpio) from biotopes of the northern part of Lake Balkhash (Karaganda region)



Tukey's HSD test was used to evaluate the significance of differences in multiple comparisons. The significance level was set at $p < 0.0$

The results of the present study demonstrate a high level of anthropogenic pressure on the northern part of Lake Balkhash, as evidenced by elevated concentrations of heavy metals in surface waters, bottom sediments, and fish tissues of vital organs. The most pronounced contamination was recorded in areas adjacent to the Balkhash Mining and Metallurgical Complex, as well as in Bertys Bay near the city of Balkhash, confirming the dominant role of industrial activity as the primary source of metal inputs into the regional aquatic ecosystem. The observed pattern of heavy metal distribution in surface waters (Cu > Co > Pb > Ni > Cr > Zn) is consistent with previous investigations conducted within the Ili–Balkhash basin, which identified copper smelting and mining enterprises as the main contributors to environmental contamination (Abd El-Ghany et al., 2025). Although the concentrations of certain metals in the water column did not consistently exceed maximum permissible limits, their substantial accumulation in bottom sediments indicates chronic environmental contamination and long-term retention of pollutants in the aquatic ecosystem and in aquatic organisms (Zhang et al., 2026). Bottom sediments act both as sinks and secondary sources of heavy metals, releasing them back into the water column under changing physicochemical conditions and thereby increasing their bioavailability to aquatic organisms (Singh et al., 2022). Analysis of fish tissues revealed considerable bioaccumulation of Cu, Co, Pb, and Ni, with the highest concentrations detected in the gills and liver. This distribution reflects the physiological roles of these organs: gills are directly exposed to dissolved contaminants, whereas the liver serves as the primary organ for detoxification and metal sequestration (Gashkina, 2024). Lower metal concentrations in muscle tissue agree with findings from other freshwater ecosystems; however, even these levels exceeded sanitary and hygienic standards in some cases, posing a potential risk to human health through fish consumption (Abass, 2024). Biochemical responses in fish liver provided further evidence of toxic stress induced by heavy metal exposure. Elevated malondialdehyde levels indicate enhanced lipid peroxidation and membrane damage, while reduced activities of superoxide dismutase and catalase suggest depletion or inhibition of the antioxidant defense system. Such oxidative imbalance is a well-documented mechanism of heavy metal toxicity and may disrupt metabolic processes, growth, and survival of fish (Petrova et al., 2025). Among the studied species, the most pronounced biochemical alterations were observed in common carp, which may be attributed to species-specific differences in metal uptake, metabolic capacity, and habitat preferences (El-Bahy et al., 2025).

Overall, the combined chemical and biochemical evidence indicate that heavy metal contamination in the northern part of Lake Balkhash has reached levels capable of inducing sublethal physiological stress in fish populations. Chronic oxidative and genotoxic stress may lead to deterioration of fish health, reduced reproductive potential, and loss of biodiversity, which is consistent with the long-term decline of native and commercially valuable fish species observed in the lake over recent decades. These findings emphasize the urgent need for enhanced environmental monitoring, stricter regulation of industrial emissions, and the implementation of remediation measures to preserve the ecological integrity of Lake Balkhash and ensure the sustainable use of its aquatic resources.

Conclusion

As a result of the study, samples of surface water and sediments, eggs, juveniles, and adults of common fish species were collected and analyzed in Torangalyk, Lake Balkhash near the Bashkir Mining and Metallurgical Combine (BMMC), and Bertys Bay near the city of Balkhash. Bioassay of the main pollutants (heavy metals) in Lake Balkhash (Karaganda Region) revealed that surface waters exceeded the MAC for fishery waters in the following order: Cu > Co > Pb > Ni > Cr > Zn, and sediments exceeded the MAC for Cu > Zn > Co > Pb > Fe > Ni > Cr > Mn > Cd. Moreover, near the BMMC, both water and sediments showed the highest concentrations. Bioassay of polluted waters and sediments revealed their embryotoxic effects in the following order: Lake Balkhash near the BMMC < Bertys Bay < Torangalyk Bay. Significant accumulations and excesses of MAC levels for Cu, Co, Pb, and Ni were detected in the gills and liver of asp and carp from Lake Balkhash near the Bashkir Mining and Metallurgical Plant (BMMC) and Bertys Bay. These HMs accumulated more in the muscles and liver of the fish, with a greater concentration in the marsh frog. These accumulations are due to the activation of lipid peroxidation processes and a decrease in the activity of antioxidant enzymes. The decrease and appearance of reactive radicals may likely be the cause of their death. Cytogenetic analysis revealed increased chromosomal instability in fish from impacted sites (Bertys Bay and BMMC) compared to

the control site (Torangalyk Bay). The frequency of aberrant cells and chromatid-type aberrations was significantly higher in affected populations, and polyploid cells were occasionally observed. These findings indicate genotoxic stress associated with heavy metal contamination, complementing the observed biochemical and toxicological effects.

Funding This research has been funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP26101681)

Ethics Statement This is a review study. No ethical approval is required.

Conflicts of Interest The author declares no conflicts of interest.

Data Availability Statement Data sharing is not applicable to this article, as no datasets were generated or analyzed during the current study.

Author contributions

Tlenshieva A.: conceived of the presented idea, developed the theory, performed the computations. Kozhakhmetova D. and Checimbayeva D.:verified the analytical methods. All authors discussed the results and contributed to the final manuscript.

References

Abass, N. Y. (2024). The influence of heavy metals on cytotoxicity in Tilapia zillii. *Aquaculture International, 32*, 9079–9098. https://doi.org/10.1007/s10499-024-01604-2

Abd El-Ghany, N. M., El-Sayed, A. M., Mohamed, A. F., & Abdel-Khalek, M. A. (2025). Impact of heavy metal pollution: bioaccumulation, oxidative stress, and histopathological alterations in freshwater fish. *Environmental Science and Pollution Research, 32*, 12567–12580. https://doi.org/10.1007/s11356-025-16245-1

Abuid, N. J., Urdaneta, M. E., Gattas-Asfura, K. M., Zientek, C., Silgo, C. I., Torres, J. A., Otto, K. J., & Stabler, C. L. (2021). Engineering the multi-enzymatic activity of cerium oxide nanoparticle coatings for the antioxidant protection of implants. *Advanced NanoBiomed Research, 1*(8), Article 2100016. https://doi.org/10.1002/anbr.202100016

Alam, M., Tanaka, A., Stagnitti, F., Allinson, G., & Maekawa, T. (2001). Observations on the effects of caged carp culture on water and sediment metal concentrations in Lake Kasumigaura, Japan. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 48*, 107–115. https://doi.org/10.1006/eesa.2000.1989

Aleynik, A. Yu., & Nazarenko, O. B. (2011). Vodnye resursy Kazakhstana: kharakteristika i problemy. In *Materials of the XVII All-Russian Scientific-Technical Conference* (pp. 255–257).

Amirgaliev, N. A., & Ismukhanova, L. T. (2012). Bioaccumulation of heavy metals in fish tissues of Kapshagai Reservoir. *Vestnik KazNU. Seriya ekologicheskaya, 1(33)*, 30–32.

Aralova, D., Toderich, K., Jarihani, A., Gafurov, D., Gismatulina, L., & Osunmadewa, B. A. (2016). Environmental resilience of rangeland ecosystems: assessment of drought indices and vegetation trends in arid and semi-arid zones of Central Asia. *Earth Resources and Environmental Remote Sensing, 10005*, 2242563. https://doi.org/10.1117/12.2242563

Balali-Mood, M., Naseri, K., Tahergorabi, Z., Khazdair, M. R., & Sadeghi, M. (2021). Toxic mechanisms of five heavy metals: mercury, lead, chromium, cadmium, and arsenic. *Frontiers in Pharmacology, 12*, Article 643972. https://doi.org/10.3389/fphar.2021.643972

Bao, Y., Huang, W., Hu, X., & Yin, D. (2020). Distribution of 31 endocrine-disrupting compounds in Taihu Lake and application of the fish plasma model. *Environmental Sciences Europe, 32(1)*, 1–16. https://doi.org/10.1186/s12302-020-00347-0

Burlybaev, M. Zh., & Dostay, Zh.D. (2009). *Sovremennoe ekologicheskoe sostoyanie ekosistem Ile-Balkashskogo basseyna*.

Canli, E. G., Dogan, A., & Canli, M. (2018). Serum biomarker levels alter following nanoparticle (Al_2O_3, CuO, TiO_2) exposures in freshwater fish (Oreochromis niloticus). *Environmental Toxicology and Pharmacology, 62*, 181–187. https://doi.org/10.1016/j.etap.2018.07.009

Chatta, A., Khan, M., Mirza, Z., & Ali, A. (2016). Heavy metal (cadmium, lead, and chromium) contamination in farmed fish: a potential risk for consumers' health. *Turkish Journal of Zoology, 40(2)*, 248–256. https://doi.org/10.3906/zoo-1506-1

Chopra, S., & Kumar, D. (2020). Ibuprofen as an emerging organic contaminant in the environment: distribution and remediation. *Heliyon, 6*, e04087. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04087

Cobanoglu, H. (2022). Assessment of genetic damage induced by gadolinium-based radiocontrast agents. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 70*, Article 126914. https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2021.126914

Coimbra, S., Rocha, S., Sousa, N. R., Catarino, C., Belo, L., Bronze-da-Rocha, E., Valente, M. J., & Santos-Silva, A. (2024). Toxicity mechanisms of gadolinium and gadolinium-based contrast agents: A review. *International Journal of Molecular Sciences, 25*(7), Article 4071. https://doi.org/10.3390/ijms25074071

De Smet, H., De Wachter, B., Lobinski, R., & Blust, R. (2001). Dynamics of (Cd, Zn)-metallothioneins in gills, liver, and kidney of common carp (Cyprinus carpio) during cadmium exposure. *Aquatic Toxicology, 52*, 269–281. https://doi.org/10.1016/S0166-445X(00)00136-3

El-Bahy, M., Ramadan, S., & Ahmed, H. (2025). Genotoxicity and oxidative stress assessment in Nile tilapia (Oreochromis niloticus) exposed to heavy metals. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 22*, 873.

Gashkina, N. A. (2024). Metal toxicity: Effects on energy metabolism in fish. *International Journal of Molecular Sciences, 25*(9), Article 5015. https://doi.org/10.3390/ijms25095015

Ge, T., Wang, Y., Han, Y., Bao, X., & Lu, C. (2024). Exploring the updated roles of ferroptosis in liver diseases: mechanisms, regulators, and therapeutic implications. *Cell Biochemistry and Biophysics, 82*, 1611–1629. https://doi.org/10.1007/s12013-024-01611-3

GOST 31861-2012. (2012). *Voda. Obshchie trebovaniya k otboru prob* [Water: General requirements for sampling]. Intergovernmental standard.

International Organization for Standardization. (1982). *Water quality—Sampling—Part 1: Guidance on the design of sampling programmes* (ISO Standard No. 5667-1:1982).

Kumar, A., Saxena, P., & Kisku, G. C. (2023). Heavy metal contamination of surface water and bed sediment quality for ecological risk assessment of Gomti River, India. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. https://doi.org/10.1007/s00477-023-02345-x

Kumar, V., Katyal, D., & Nayak, S. (2020). Removal of heavy metals and radionuclides from water using nanomaterials: current scenario and future prospects. *Environmental Science and Pollution Research, 27*, 41199–41224. https://doi.org/10.1007/s11356-020-10348-4

Lopareva, T. Ya., Sharipova, O. A., & Petrushenko, L. V. (2016). Accumulation of toxicants in muscle tissue of fish in water bodies of Kazakhstan. *Vestnik AGTU. Seriya: Rybnoe khozyaystvo, 2*, 115–122.

Łuczyńska, J., Paszczyk, B., & Łuczyński, M. J. (2018). Fish as a bioindicator of heavy metal pollution in the aquatic ecosystem of Pluszne Lake, Poland, and risk assessment for consumer health. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 153*, 60–67. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.01.057

Mansour, A. T., Orabi, S. H., Ramah, A., Amen, R. M., Mahboub, H. H., & Hamed, H. S. (2023). Exposure to oxyfluorfen-induced hematobiochemical alterations, oxidative stress, genotoxicity, and disruption of sex hormones in male African catfish and the potential to confront by Chlorella vulgaris. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, 267*, Article 109583. https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2023.109583

Ministry of Ecology, Geology and Natural Resources of Kazakhstan. (2019). *Environmental status bulletin of the Republic of Kazakhstan* (Issue 1(25)).

Moldakhanova, N., Alimkulov, S., & Smagulov, Z. (2023). Analysis of changes in the ecological space of the Ili River delta due to reduced flow. *Evergreen, 10*, 29–35. https://doi.org/10.5109/6781031

Nishita, N., Deeksha, K., Navish, K., Pawan, K. R., Sudhir, G. W., Arivalagan, P., Suresh, G., & Kuan, S. H. (2023). Emerging micropollutants in aquatic ecosystems and nanotechnology-based removal alternatives: a review. *Chemosphere, 341*, Article 139945. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139945

Nurtazin, S. T., Salmurzayuly, R., Tivis, N., Baibagysov, A. M., Iklasov, M. K., Mukhitdinov, A. M., & Mirasbek, E. A. (2016). Causes and trends of ecosystem transformation in the Ili River delta. *Vestnik KazNU. Seriya ekologicheskaya, 1(46)*, 90–104.

Petrova, T., Ivanov, S., & Dimitrov, P. (2025). Biomarker-based assessment of heavy metal exposure in Danube fish species. *Water, 10*, 445.

Singh, R., Kumar, P., & Verma, A. (2022). Effects of heavy metals on fish physiology: a comprehensive review. *Aquatic Toxicology, 241*, Article 106024.

Smolyar, V. A., & Mustafayev, S. T. (2007). *Gidrogeologiya basseyna ozera Balkhash*. Ғылым.

Sultanova, B. M., Rachkovskaya, E. I., Ivashchenko, A. A., & Berezovikov, N. N. (2012). Biological diversity of the projected Ile-Balkhash nature reserve. *Vestnik KazNU. Seriya ekologicheskaya, 1(33)*, 230–233.

Wang, Z. X., Chen, J. Q., Chai, L. Y., Yang, Z. H., Huang, S. H., & Zheng, Y. (2011). Environmental impact and site-specific human health risks of chromium in the vicinity of a ferro alloy manufacturer, China. *Journal of Hazardous Materials, 190*, 980–985. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.04.039

Zhang, Y., Li, J., Wang, X., & Chen, H. (2026). Oxidative stress and antioxidant biomarker responses in fish exposed to heavy metals: a review. *Environmental Toxicology and Pharmacology, 92*, Article 104249. https://doi.org/10.1016/j.etap.2026.104249

Авторлар туралы мәлімет:

Тленшиева Аршын Мұратқызы – PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті; Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан (e-mail: arshynmuratkyzy@gmail.com).

Кожахметова Диана Дарханқызы – әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің Биология және биотехнология факультеті, Экология және биоалуантүрлілік тұрақтылығы институтының кіші ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан (e-mail: ddiyeol@gmail.com).

Чекимбаева Дарина Талгатовна – биология ғылымдарының магистрі, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің Биология және биотехнология факультеті, Экология және биоалуантүрлілік тұрақтылығы институтының кіші ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан (e-mail: chekimbayevad@gmail.com).

Information about the authors:

Arshyn Tlenshieva – PhD, Al-Farabi Kazakh National University; K.I. Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan (e-mail: arshynmuratkyzy@gmail.com).

Diana Kozhakhmetova – Faculty of Biology and Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University; Junior Researcher, Institute for Sustainability of Ecology and Biodiversity, Almaty, Kazakhstan (e-mail: ddiyeol@gmail.com).

Darina Chekimbayeva – Master of Biological Sciences, Faculty of Biology and Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University; Junior Researcher, Institute for Sustainability of Ecology and Biodiversity, Almaty, Kazakhstan (e-mail: chekimbayevad@gmail.com).

Сведения об авторах:

Тленшиева Аршын Мураткызы – PhD, Казахский национальный университет имени аль-Фараби; Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан (e-mail: arshynmuratkyzy@gmail.com).

Кожахметова Диана Дархановна – факультет биологии и биотехнологии, Казахский национальный университет имени аль-Фараби; младший научный сотрудник Института устойчивости экологии и биоразнообразия, Алматы, Казахстан (e-mail: ddiyeol@gmail.com).

Чекимбаева Дарина Талгатовна – магистр биологических наук, факультет биологии и биотехнологии, Казахский национальный университет имени аль-Фараби; младший научный сотрудник Института устойчивости экологии и биоразнообразия, Алматы, Казахстан (e-mail: chekimbayevad@gmail.com).

Келіп түсті: 04 сәуір 2026 жыл
Қабылданды: 25 қыркүйек 2026 жыл

ҒТАМР 34.47.51 https://doi.org/10.26577/EJE208830926

Р.Р. Халматова*, Е.Р. Мамедова, А.В. Ловинская, Ш.М. Ыргынбаева, Т.М. Шалахметова, С.Ж. Колумбаева

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан
*e-mail: renata.ren2003@gmail.com

ПЭТ МИКРОПЛАСТИГІНІҢ СҮЗІЛГЕН СУЛЫ СЫҒЫНДЫЛАРЫНЫҢ АРПА (*HORDEUM VULGARE L.*) ӨСІМДІГІНІҢ ЕРТЕ ӨНУ КЕЗЕҢДЕРІНЕ ФИТОТОКСИКАЛЫҚ ӘСЕРІ

Полиэтилентерефталат (ПЭТ) микропластигі өсімдіктерге, әсіресе онтогенездің алғашқы кезеңдерінде, жағымсыз әсер етуі мүмкін ең көп таралған антропогендік қоршаған орта ластаушы заттарының бірі болып саналады. Бұл зерттеудің мақсаты – сығынды алу шарттарына, фракция мөлшеріне және микропластиктердің концентрациясына байланысты *Hordeum vulgare* L. тұқымдарының өнуіне ПЭТ әсерін бағалау. Экстракттар ПЭТ фракцияларынан <1 мм, 1–2 мм және 2–3 мм 0,1 және 1,0 г/л концентрациясында үш режимде дайындалды: «ыстық су», «салқын су», «салқын су + шейкер». Шартты уақыт өткеннен кейін үлгілер сүзіліп, алынған сығындылар арпа тұқымдарын өңдеу үшін пайдаланылды. Жұмыс барысында дәндердің өну дәрежесі, өну жылдамдығы және өну үйлесімділігі, сондай-ақ, сығындылардың pH мәні бағаланды. Тұқымдарға ең көп жағымсыз әсер ыстық су жағдайында алынған экстракттармен көрсетілетіні, ал шайқағышсыз салқын су жағдайында алынған экстракттар көп жағдайда теріс бақылаудан статистикалық тұрғыдан айтарлықтай ерекшеленбейтіні анықталды. Біржақты дисперсиялық талдауға сәйкес, өну дәрежесінде ($F = 14{,}46$; $p < 0{,}001$), өну жылдамдығында ($F = 16{,}46$; $p < 0{,}001$) және өну үйлесімділігінде ($F = 14{,}59$; $p < 0{,}001$) топтар аралық айырмашылықтар анықталды. Барлық зерттелген көрсеткіштер бойынша үш жақты дисперсиялық талдау экстракт дайындау түрінің, ПЭТ фракциясының мөлшерінің, сондай-ақ олардың өзара әрекеттесуінің статистикалық тұрғыдан маңызды әсер ететінін, ал экстракттардың концентрациясы өздігінен айтарлықтай әсер етпейтінін көрсетті. Корреляциялық талдау экстракттардың pH мәні мен өну дәрежесі, өну жылдамдығы және өну үйлесімділігі арасында статистикалық тұрғыдан маңызды теріс байланысты анықтады. Алынған нәтижелер ПЭТ-тің бұл жүйеге фитотоксикалық әсері, ең алдымен, сүзілген сулы сығындыны алу шарттарымен және микропластикалық фракцияның өлшемімен анықталатынын көрсетеді.

Түйін сөздер: полиэтилентерефталат микропластигі, арпа тұқымдары, өну дәрежесі, өну жылдамдығы, өну үйлесімділігі.

R.R. Khalmatova*, E.R. Mamedova, A.V. Lovinskaya,
Sh.M. Yrgynbayeva, T.M. Shalakhmetova, S.Zh. Kolumbayeva
Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
*e-mail: renata.ren2003@gmail.com

Phytotoxic effects of filtered aqueous extracts of pet microplastics on the early germination stages of barley (*Hordeum vulgare* l.)

Polyethylene terephthalate (PET) microplastic is regarded as one of the most widespread anthropogenic environmental pollutants capable of exerting adverse effects on plants, particularly at the early stages of ontogenesis. The aim of the present study was to assess the effects of PET on the germination of *Hordeum vulgare* L. seeds depending on the extraction conditions, particle size fraction, and microplastic concentration. Extracts were prepared from PET fractions of <1 mm, 1–2 mm, and 2–3 mm at concentrations of 0.1 and 1.0 g/L under three treatment conditions: “hot water,” “cold water,” and “cold water + shaker.” After incubation, the samples were filtered, and the resulting extracts were used to treat barley seeds. Germination percentage, germination rate, and germination uniformity were evaluated, along with the pH of the extracts. The extracts obtained under hot-water conditions were found to exert the most adverse effects on the seeds, whereas extracts prepared in cold water without shaking, in most cases, did not differ statistically significantly from the negative control. One-way analysis of variance revealed significant intergroup differences in germination percentage ($F = 14.46$; $p < 0.001$), germination rate ($F = 16.46$; $p < 0.001$), and germination uniformity ($F = 14.59$; $p < 0.001$). Three-way ANOVA showed that the method of extract preparation, PET fraction size, and their interaction had

 © 2026 Al-Farabi Kazakh National University

statistically significant effects on all studied parameters, whereas extract concentration did not produce an independent significant effect. Correlation analysis revealed a statistically significant negative relationship between extract pH and germination percentage, germination rate, and germination uniformity. The obtained results indicate that the phytotoxic effect of PET in this system is determined primarily by the conditions under which the filtered aqueous extract is formed and by the size of the microplastic fraction.

Keywords: polyethylene terephthalate microplastic, barley seeds, germination percentage, germination rate, germination uniformity.

Р.Р. Халматова*, Е.Р. Мамедова, А.В. Ловинская,
Ш.М. Ыргынбаева, Т.М. Шалахметова, С.Ж. Колумбаева
Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы Казахстан
*e-mail: renata.ren2003@gmail.com

Фитотоксическое действие фильтрованных водных вытяжек ПЭТ-микропластика на ранние этапы прорастания ячменя (*Hordeum vulgare L.*)

Микропластик полиэтилентерефталата (ПЭТ) рассматривается как один из наиболее распространённых антропогенных загрязнителей окружающей среды, способных оказывать неблагоприятное воздействие на растения, особенно на ранних этапах онтогенеза. Целью настоящего исследования была оценка влияния ПЭТ на прорастание семян *Hordeum vulgare* L. в зависимости от условий получения вытяжки, размера фракции и концентрации микропластика. Вытяжки готовили из ПЭТ-фракций <1 мм, 1–2 мм и 2–3 мм в концентрациях 0,1 и 1,0 г/л в трёх режимах: «горячая вода», «холодная вода», «холодная вода + шейкер». После выдерживания образцы фильтровали, и полученными вытяжками обрабатывали семена ячменя. Оценивали всхожесть, скорость и дружность прорастания, а также pH вытяжек. Установлено, что наиболее неблагоприятное действие на семена оказывали вытяжки, полученные в условиях горячей воды, тогда как вытяжки, полученные в условиях холодной воды без шейкера, в большинстве случаев статистически значимо не отличались от отрицательного контроля. По данным однофакторного дисперсионного анализа выявлены достоверные межгрупповые различия по всхожести ($F = 14{,}46$; $p < 0{,}001$), скорости прорастания ($F = 16{,}46$; $p < 0{,}001$) и дружности прорастания ($F = 14{,}59$; $p < 0{,}001$). Трёхфакторный дисперсионный анализ показал, что статистически значимое влияние на все исследованные показатели оказывали тип получения вытяжки и размер фракции ПЭТ, а также их взаимодействие, тогда как концентрация вытяжек не давала самостоятельного значимого эффекта. Корреляционный анализ выявил статистически значимую отрицательную связь pH вытяжек со всхожестью, скоростью и дружностью прорастания. Полученные результаты свидетельствуют о том, что фитотоксический эффект ПЭТ в данной системе определяется, прежде всего, условиями формирования фильтрованной водной вытяжки и размером фракции микропластика.

Ключевые слова: микропластик полиэтилентерефталата, семена ячменя, всхожесть, скорость прорастания, дружность прорастания.

Кіріспе

Қазіргі таңда қоршаған ортаның пластикалық қалдықтармен ластануы ең өзекті экологиялық мәселелердің бірі болып табылады. Пластик өндірісі мен тұтынылуы әлемдік деңгейде тұрақты өсімді көрсетіп, 2020 жылы 435 миллион тоннаға жетті, ал пластик өндірісі, пайдалануы және қалдықтардың пайда болуы 2040 жылға қарай шамамен 70%-ға артады деп болжануда (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2024). Пластикалық қалдықтардың қарқынды өсуі және тиімді жою жүйесінің болмауы – қоршаған ортада пластиктер мөлшерінің айтарлықтай артуына, уақыт өте келе олардың ыдырау нәтижесінде өлшемі 5 мм-ден кіші бөлшектердің – микропластиктердің пайда болуына әкеледі (Tang & Li, 2024).

Микропластиктер өнеркәсіпте арнайы өндірілетін бастапқы бөлшектер (мысалы, микрогранулалар) немесе физикалық және химиялық факторлардың, атап айтқанда ультракүлгін сәулелену мен тотығудың әсерінен ірі пластикалық өнімдердің фрагментациясы нәтижесінде пайда болуы мүмкін. Ластаушы зат ретінде микропластиктер қоршаған ортаның әртүрлі компоненттерінде: су көздерінде, атмосфералық ауада және топырақта кездеседі және олардың микробөлшектері мөлшері мен массасына қарай айтарлықтай қашықтыққа тасымалдануы мүмкін. Микропластиктер біркелкі ластаушы емес, олардың шығу тегі, өлшемі, пішіні және химиялық

құрамы әртүрлі: полиэтилен, полипропилен, полистирол және полиэтилентерефталат сияқты полимерлердің күрделі және алуан түрлі заттар класы. Сонымен қатар, пластик қалдықтарының құрамында көбінесе пластификаторлар, түрақтандырғыштар және бояғыштар сияқты әртүрлі қоспалар болады, олар ауыр металдар мен тұрақты органикалық қосылыстар сияқты қоршаған ортаның ластаушы заттарын адсорбциялау қабілетіне ие (Rochman et al., 2019; Zhao et al., 2025). Қазіргі уақытта микропластиктердің тірі организмдерге улы әсерін көрсететін айтарлықтай деректер көптеп кездеседі.

Микропластиктің әсер ету дәрежесін анықтайтын негізгі факторлардың бірі – бөлшектердің мөлшері. Кішірек полиэтилен бөлшектерінің (1–50 мкм) үлкен бөлшектермен салыстырғанда тотығу стрессін жоғарылатуы, ДНҚ зақымдануы және апоптоздық процестердің белсендірілуі сияқты айқын уытты әсері мен өсуді тежейтін қасиеті көрсетілген. Сонымен қатар, ұсақ бөлшектерде жоғары ену қабілеті мен жоғары реактивті бетінің болуы – олардың тіндерге ену қабілетін жоғарылатады. Ірі бөлшектер, керісінше, негізінен беткі құрылымдарда жинақталады (Bobori et al., 2022; Xu et al., 2026).

Микропластиктердің топырақта жинақталуы және олардың шаруашылық маңызы бар өсімдіктерге, жалпы экожүйенің жұмысына ықтимал әсері ерекше алаңдаушылық тудырады. Микропластиктердің өсімдіктерге теріс әсері – өсу жылдамдығын төмендетумен, тұқымның өнуін тежеумен, тотығу стрессінің индукциясымен және тамыр жүйесінің жұмысының механикалық бұзылуымен сипатталатындығы анықталған (Tang, 2020). Сонымен қатар, микропластиктердің өсімдіктерге әсері хлорофилл мөлшерінің, липидтік құрамының, фотосинтездік тиімділіктің және балдырлардың өсу қарқынының өзгеруіне әкелуі мүмкін (Daniel Tang, 2024; Iheanacho et al., 2020).

Микропластиктердің ішінде полиэтилентерефталат (ПЭТ) тамақ өнімдерімен жанасатын қаптама материалдарын өндіруде кеңінен қолданылады. Қоршаған орта жағдайында ПЭТ экожүйелерге еніп, өсімдіктермен әрекеттесіп, олардың физиологиялық күйіне әсер ете алады. Жоғары тығыздықты полиэтилен және полиэстер сияқты басқа да полимерлермен салыстырғанда ПЭТ микропластиктерінің өсімдіктерге әсері онша айқын емес екені көрсетілген. Фотосинтездік пигменттердің жалпы мөлшерінің төмендетуіне және тотығу стресс деңгейінің жоғарылатуына қарамастан, ПЭТ өсімдік биіктігі, жапырақ саны және биомассасы сияқты морфологиялық және физиологиялық параметрлерінде онша маңызды өзгерістер тудырмайды, бұл салыстырмалы түрде әлсіз фитотоксикалық әсерді көрсетеді (Ahmad и др., 2025). Фотосинтездейтін микроорганизмдерде де осындай әсерлер байқалады: ПЭТ микробалдырлардың өсуін тежеуге, хлорофилл мөлшерінің өзгеруіне және реактивті оттегі түрлерінің әлсіз түзілуіне әсер етіп қана қоймай, сондай-ақ жасушалардың бетіне адсорбцияланып, механикалық зақым келтіруге қабілетті (Pencik et al., 2023).

Қысқа мерзімді тәжірибелер көрсеткендей (7 күн бойы 0,1 г/л), *Raphanus sativus* және *Daucus carota* өсімдіктерінде биомасса мен қоректік заттардың сіңуінде айтарлықтай өзгерістер байқалмаған. Дегенмен, хлорофилл мөлшерінің төмендеуі және малон диальдегид деңгейінің жоғарылауы сияқты стресстің физиологиялық белгілері байқалған, бұл тіпті айқын морфологиялық өзгерістер болмаса да тотығу стрессінің дамуын көрсетеді (Shorobi & Park, 2025).

ПЭТ микропластигінің әсері туралы қосымша деректер су өсімдіктеріндегі ұзақ мерзімді тәжірибелер барысында алынды. Қысқа мерзімді әсер ету кезінде (3 тәулік) фотосинтездің ең көп тежелуі ұсақ ПЭТ бөлшектерінің (<200 мкм) әсерінен байқалатыны, ал ұзақ мерзімді әсер ету кезінде (10 үрпаққа дейін) ірі ПЭТ бөлшектері (300-500 мкм) өсу мен фотосинтездік белсенділіктің неғұрлым айқын басылуын тудыратыны көрсетілген. Бұл ретте осы түрдегі микропластиктің созылмалы әсері хлоропластардың таралуының бұзылуына және *Lemna minor* өсімдігіндегі физиологиялық процестердің түрақты тежелуіне әкеледі, бұл токсикалық әсердің кумулятивті және өлшемге тәуелді сипатын көрсетеді (Cui et al., 2023).

Сондай-ақ, полиэтилентерефталат микропластигінің фитотоксикалық әсерінің мөлшерге тәуелді сипаты бар екені көрсетілген. ПЭТ микробөлшектері концентрациясының артуы (50-1000 мг/л) *Cicer arietinum* тұқымдарының өнгіштігін айтарлықтай төмендетті, бұл тотығу стресінің күшеюімен қатар жүрді. Бұл ретте биохимиялық көрсеткіштердің өзгеруі сызықтық емес сипатқа ие болды: пигменттер мен көмірсулардың мөлшері белгілі бір әсер ету деңгейіне дейін өсті, ал концентрацияның одан әрі артуы айқын стресстік әсерлерге әкелді. Әсіресе, ПЭТ-микропластиктің жоғары дозаларында *Allium cepa* тамыр жасушаларында цитогенетикалық

бұзылулар, оның ішінде хромосомалық аберрациялар анықталған, бұл осы түрдегі микропластиктің ықтимал генотоксикалығын көрсетеді (Mondal et al., 2022).

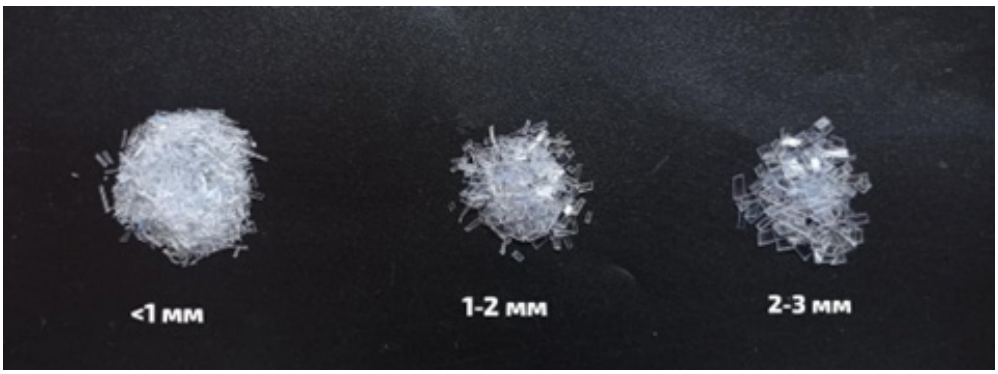
Сонымен қатар, микропластиктің әсер етуінің молекулярлық механизмдерін зерттеу ПЭТ-тің тотығу стресін дамытуын және соның салдарынан ДНҚ зақымдануын индукциялауға қабілетті екенін көрсетеді (Alzaben et al., 2023; Wang et al., 2025). ПЭТ бөлшектері организмде жиналып, қабыну реакцияларын тудыруы мүмкін екендігі, ал ұзақ уақыт әсер еткенде, генотоксикалық өзгерістер мен канцерогенезге байланысты процестердің белсендірілуін тудыратыны көрсетілген (Gutiérrez-García et al., 2025; Kim et al., 2025).

Ғылыми әдебиеттерге жүргізілген талдаулар негізінде, микропластиктер бөлшектердің мөлшеріне, олардың концентрациясына, химиялық табиғатына және әсер ету ұзақтығына байланысты ағзаға түрліше әсер ететін күрделі әрі көпфакторлы ластаушы зат деп қорытындылауға болады. Бірқатар жағдайларда полиэтилентерефталат басқа полимерлермен салыстырғанда фитотоксикалық әсерінің азырақ байқалуымен сипатталғанымен, оның тотығу стресін және физиологиялық бұзылуларды тудыру қабілеті ағзалар үшін ықтимал қауіптілікті көрсетеді. Сонымен бірге, микропластиктердің фитотоксикалық қасиетін зерттеуге арналған жұмыстардың көптігіне қарамастан, әртүрлі экстракция жағдайларында қалыптасатын ПЭТ-тің сүзілген сулы сығындыларының әсері жеткіліксіз зерттелген. Осыған байланысты, тұқымдардың токсиндерге биологиялық жауабын қалыптастыруда сығынды алу тәсілінің, фракция мөлшерінің және ПЭТ концентрациясының рөлін бағалау ерекше қызығушылық тудырады. Осы зерттеудің мақсаты – экологиялық мониторингте кеңінен қолданылатын тест-объект – арпа тұқымының өнуінің бастапқы кезеңдерінде полиэтилентерефталат микропластигінің фитотоксикалық әсерін зерттеу болып табылды.

Материалдар мен әдістер

Сынақ нысаны ретінде арпа тұқымдары (*Hordeum vulgare* L.) пайдаланылды, олар ПЭТ микропластиктерінің сүзілген сығындыларымен өңделді. Үш бөлшек өлшемінің фракциялары үшін (<1 мм, 1–2 мм, 2–3 мм) ПЭТ микропластиктерінің фитотоксикалық әсері 0,1 және 1,0 г/л концентрацияларында бағаланды (1-сурет).

1-сурет
ПЭТ микропластиктерінің пайдаланылған фракциялары



Экстракттар үш режимде дайындалды:

1) «ыстық су» – зерттелетін фракциялар мен концентрациялардағы микропластиктерге ыстық (100°C) дистилденген су құйылып, бөлме температурасында күн астында 30 күн түрғызылды;

2) «салқын су» – зерттелетін фракциялар мен концентрациялардағы микропластиктерге дистилденген су құйылып, бөлме температурасында күн астында 30 күн түрғызылды;

3) «салқын су + шейкер» – зерттелетін фракциялар мен концентрациялардағы микропластиктерге дистилденген су құйылып, микропластигі бар колбалар 25°C температурада 30 күн бойы 100 айн/мин жылдамдықпен үздіксіз араластыра отырып, термошайқағышқа салынды.

30 күннен кейін барлық суспензия нүсқалары дәке арқылы сүзіліп, алынған сығындылар тәжірибеде қолданылды. Арпа тұқымдары 4 сағат бойы әртүрлі ПЭТ микропластикалық экстракттарымен өңделді, содан кейін тұқымдар Петри ыдыстарына отырғызылып, 25°C температурада өну үшін термостатқа орналастырылды. ПЭТ микропластиктерінің сүзілген сулы сығындыларының фитотоксикалық әсері келесі параметрлер бойынша бағаланды: өну дәрежесі, өну жылдамдығы, өну үйлесімділігі. Өну дәрежесі отырғызылған тұқымдардың жалпы санынан өнген тұқымдардың пайыздық үлесі ретінде анықталды. Өнген тұқымдар өну басталғаннан кейінгі алғашқы үш күн ішінде күн сайын есептелді. Өну жылдамдығы алғашқы үш күнде күн сайын өнетін тұқымдардың орташа санының қосындысы ретінде анықталды. Өну үйлесімділігі алғашқы 24 сағатта өнген тұқымдар санын соңғы бақылау кезеңіне (72 сағат) өнген тұқымдардың жалпы санына бөлу арқылы есептелді.

Теріс бақылау ретінде дистильденген су, ал оң бақылау ретінде 20 мг/л концентрациясындағы $CuSO_4$ ерітіндісі пайдаланылды (Singh et al., 2007).

Алынған тәжірибелік нәтижелерді статистикалық өңдеу үшін келесі бағдарламалық жиынтық пайдаланылды: Microsoft Excel («Деректерді талдау» қосымшасы), StatPlus және WinPepi. Әрбір эксперименттік топта зерттелген көрсеткіштердің орташа арифметикалық мәндері, сондай-ақ орташа мәннің стандартты қателіктері (SEM) анықталды. Әрбір эксперименттік зерттеудегі топтар арасындағы айырмашылықтардың статистикалық маңыздылығы тәуелсіз үлгілер үшін Уэлчтің t-тестін пайдаланып, көптік салыстыру қателігін бақылау үшін Холм түзетуімен бағаланды. Айырмашылықтар $p \leq 0,05$ маңыздылық деңгейінде статистикалық тұрғыдан маңызды деп саналды. Тартылыстың, ПЭТ фракциясының өлшемінің, ПЭТ концентрациясының және олардың өзара әрекеттесуінің әсерін бағалау үшін үш жақты дисперсиялық талдау (ANOVA type II) қолданылды. Өсу көрсеткіштері мен pH арасындағы байланысты анықтау үшін Пирсон корреляция коэффициентін (r) есептеу арқылы корреляциялық талдау жүргізілді.

Нәтижелер және оларды талқылау

Зерттеуде әртүрлі экстракция жағдайларында алынған ПЭТ микропластигінің сүзілген сулы сығындыларының арпа тұқымдарының өну жылдамдығына әсері зерттелді (1-кесте). Жалпы алғанда, өну мәндері 36,45-тен 97,31%-ға дейінгі аралықта болды, бұл – биологиялық әсердің сығынды алу жағдайларына, ПЭТ бөлшектерінің мөлшеріне және концентрациясына айқын тәуелділігін көрсетеді.

1-кесте

ПЭТ микропластиктерінің әртүрлі сүзілген сулы сығындыларының арпа тұқымдарының өнуіне әсері

Микропластик түрі	Тәжірибелік нүсқа/үлгі дайындау тәртібі	pH	Өну дәрежесі	Өну жылдамдығы	Өну үйлесімділігі
	Теріс бақылау (dH_2O)	5,0	71,33 ± 6,43	34,33 ± 2,73	94,62 ± 7,16
	Оң бақылау ($CuSO_4$, 20 мг/л)	3,3	67,33 ± 8,33	30,72 ± 5,44	85,32 ± 19,76
ПЭТ, <1 мм, 0,1 г/л	Ыстық су	5,4	36,67 ± 7,57	14,50 ± 2,78*•	58,73 ± 7,65
	Салқын су	5,4	61,33 ± 4,62	29,39 ± 3,43	91,96 ± 9,06
	Салқын су + шайқағыш	5,2	97,31 ± 3,05	44,56 ± 1,40	86,82 ± 0,71
ПЭТ, <1 мм, 1,0 г/л	Ыстық су	5,4	45,14 ± 5,53	16,67 ± 2,77*	55,24 ± 0,96
	Салқын су	4,9	57,33 ± 2,31	27,67 ± 2,52	92,86 ± 12,37
	Салқын су + шайқағыш	5,0	84,60 ± 6,02	36,94 ± 3,71	76,72 ± 6,55

Кестенің жалғасы

Микропластик түрі	Тәжірибелік нұсқа/үлгі дайындау тәртібі	pH	Өну дәрежесі	Өну жылдамдығы	Өну үйлесімділігі
ПЭТ, 1-2 мм, 0,1 г/л	Ыстық су	5,1	50,88 ± 2,96	19,50 ± 2,75*	49,81 ± 4,70*
	Салқын су	4,9	82,67 ± 6,43	36,17 ± 3,56*	79,87 ± 4,81
	Салқын су + шайқағыш	5,2	46,34 ± 1,44	15,44 ± 2,90	39,13 ± 23,01
ПЭТ, 1-2 мм, 1,0 г/л	Ыстық су	5,3	52,80 ± 5,33	19,50 ± 5,45	44,44 ± 12,56
	Салқын су	4,7	67,53 ± 1,00	32,56 ± 1,95	90,48 ± 10,03
	Салқын су + шайқағыш	5,2	58,16 ± 6,03	21,50 ± 1,53	45,10 ± 11,80
ПЭТ, 2-3 мм, 0,1 г/л	Ыстық су	5,1	41,20 ± 11,04	15,00 ± 4,21	48,49 ± 4,46*
	Салқын су	4,8	68,26 ± 13,64	32,33 ± 6,74	91,02 ± 3,79
	Салқын су + шайқағыш	5,2	45,66 ± 16,26	15,94 ± 6,69	42,74 ± 6,10*
ПЭТ, 2-3 мм, 1,0 г/л	Ыстық су	5,2	52,14 ± 3,61	19,58 ± 1,65*	47,70 ± 3,13*
	Салқын су	4,6	63,33 ± 12,70	29,39 ± 7,54	87,58 ± 10,94
	Салқын су + шайқағыш	5,8	36,45 ± 1,66	12,78 ± 1,69*	38,16 ± 8,16*

*Ескерту: * $p<0,05$ – сумен салыстырғанда*
• $p<0,05$ – CuSO4-пен салыстырғанда

Концентрациясы 0,1 г/л болатын <1 мм ПЭТ нұсқасы үшін ең қолайсыз нәтижелер «ыстық су» режимінде алынды. Бұл жағдайда өу дәрежесі теріс бақылауға қарағанда 1,95 есеге, ал оң бақылаумен салыстырғанда 1,84 есеге төмен болды, алайда айырмашылық статистикалық түрғыдан маңызды болмады. Өну жылдамдығы дистилденген судан 2,37 есеге ($p<0,05$) төмен және $CuSO_4$-тен 2,12 есеге ($p<0,05$) төмен болды. Өну үйлесімділігі теріс бақылаудан 1,61 есеге, ал оң бақылаудан 1,45 есеге төмен болды, алайда бұл айырмашылық статистикалық түрғыдан маңызды болмады. «Салқын су» режимінде көрсеткіштер аралық орынды алды. Өну дәрежесі судан 1,16 есеге төмен және $CuSO_4$-тен 1,10 есеге төмен болды; өну жылдамдығы – судан 1,17 есеге төмен және $CuSO_4$-тен 1,05 есеге төмен, ал өні үйлесімділігі іс жүзінде бақылауға сәйкес келіп, судан тек 1,03 есеге ерекшеленді, ал $CuSO_4$-тен 1,08 есеге асып түсті; статистикалық маңызды айырмашылықтар табылған жоқ. Керісінше, барлық зерттелген нұсқалардың ішінде ең маңызды нәтижелер «салқын су+шейкер» режимінде көрсетілді: өну дәрежесі судан 1,36 есеге және $CuSO_4$-тен 1,45 есеге жоғары болды; өну жылдамдығы судан 1,30 есеге және $CuSO_4$-тен 1,45 есеге жоғары болды; өну үйлесімділігі судан 1,09 есеге төмен, бірақ $CuSO_4$-тен 1,02 есеге жоғары болды. Алайда, барлық үш көрсеткіш бойынша бақылаулардан статистикалық маңызды айырмашылықтар анықталмады. Осылайша, <1,0 мм ПЭТ және 0,1 г/л концентрация үшін ең токсикалық әсер «ыстық су» режимінде, ал ең қолайлы әсер «салқын су+шейкер» режимінде анықталды.

Бөлшектерінің мөлшері <1 мм және концентрациясы 1,0 г/л болатын ПЭТ нұсқасы үшін жалпы тенденция сақталды. «Ыстық су» режимінде өнгіштік судан 1,58 есеге төмен және $CuSO_4$-тен 1,49 есеге төмен болды, статистикалық маңыздылық анықталмады. Өну жылдамдығы теріс бақылаудан 2,06 есеге ($p<0,05$) төмен және оң бақылаудан 1,84 есеге төмен болды. Өну үйлесімділігі судан 1,71 есеге төмен және $CuSO_4$-тен 1,54 есеге төмен болды, бұл да статистикалық түрғыдан маңызды емес. «Салқын су» режимінде өну дәрежесі судан 1,24 есеге, ал $CuSO_4$-тен 1,17 есеге төмен, өну жылдамдығы судан 1,24

есеге төмен және $CuSO_4$-тен 1,11 есеге төмен болды, ал өну үйлесімділігі іс жүзінде теріс бақылауға сәйкес келіп, оң бақылаудан 1,09 есеге асып түсті. «Салқын су+шейкер» режимінде көрсеткіштер айтарлықтай жақсарды: өну дәрежесі судан 1,19 есеге жоғары және $CuSO_4$-тен 1,26 есеге жоғары болды; өну жылдамдығы судан 1,08 есеге жоғары және $CuSO_4$-тен 1,20 есеге жоғары болды; өну үйлесімділігі, керісінше, бақылаулардан біршама төмендеп, судан 1,23 есеге, ал $CuSO_4$-тен 1,11 есеге төмен болды. Барлық көрсеткіш бойынша бақылаулармен статистикалық маңызды айырмашылықтар орнатылмады. Бұл жағдайда да статистикалық маңызды тежеуші әсер тек ыстық экстракция кезіндегі өну жылдамдығы бойынша тіркелді.

Бөлшектерінің мөлшері 1-2 мм және концентрациясы 0,1 г/л болатын ПЭТ нүсқасы үшін әртүрлі режимде дайындалған сығындылардың әсері қарама-қайшы болды. «Ыстық су» режимінде өну дәрежесі судан 1,40 есеге төмен және $CuSO_4$-тен 1,32 есеге төмен болды, статистикалық маңыздылық анықталмады. Өну жылдамдығы судан 1,76 есеге ($p<0,05$) төмен және $CuSO_4$-тен 1,58 есеге төмен болды. Өну үйлесімділігі судан 1,90 есеге ($p<0,05$) төмен және $CuSO_4$-тен 1,71 есеге төмен болды. «Салқын су» режимінде өну дәрежесі судан 1,16 есеге, ал $CuSO_4$-тен 1,23 есеге жоғары болды; өну жылдамдығы судан 1,05 есеге және $CuSO_4$-тен 1,18 есеге жоғары болды; өну үйлесімділігі судан 1,18 есеге төмен және $CuSO_4$-тен 1,07 есеге төмен болды. Өзгерістердің қолайлы бағыттылығына қарамастан, осы нүсқада бақылаулардан статистикалық маңызды айырмашылықтар анықталмады. «Салқын су+шейкер» режимінде көрсеткіштер біркелкі болмады: өну дәрежесі судан 1,54 есеге төмен, өну жылдамдығы судан 2,22 есеге ($p<0,05$) төмен, өну үйлесімділігі теріс бақылаудан 2,42 есеге төмен болды. Демек, бөлшектерінің мөлшері 1-2 мм ПЭТ үшін 0,1 г/л концентрациясында «ыстық су» және «салқын су+шейкер» режимдері физиологиялық параметрлердің тежелуімен қатар жүрді.

Бөлшектерінің мөлшері 1-2 мм және концентрациясы 1,0 г/л болатын ПЭТ нүсқасы үшін «ыстық су» режимінде өну дәрежесі судан 1,35 есеге төмен және $CuSO_4$-тен 1,28 есеге төмен болды. Өну жылдамдығы судан 1,76 есеге төмен және $CuSO_4$-тен 1,58 есеге төмен болды. Өну үйлесімділігі теріс бақылаудан 2,13 есеге, ал оң бақылаудан 1,92 есеге төмен болды. Айқын сандық төмендеуге қарамастан, барлық көрсеткіштер бойынша статистикалық маңызды айырмашылықтар орнатылмады. «Салқын су» режимінде көрсеткіштердің толық дерлік қалыпқа келуі байқалды: барлық үш көрсеткіш су нүсқасының көрсеткіштеріне жақын болды және статистикалық маңызды айырмашылықтар анықталған жоқ. «Салқын су+шейкер» режимінде сумен салыстырғанда өну дәрежесі бойынша 1,23 есеге, өну жылдамдығы бойынша 1,60 есеге және өну үйлесімділігі бойынша 2,10 есеге төмен болды. Алайда, барлық көрсеткіштер бойынша статистикалық маңызды айырмашылықтар орнатылмады. Осылайша, бөлшектерінің мөлшері 1-2 мм және концентрациясы 1,0 г/л болатын ПЭТ үшін жағымсыз әсер орташа болды және ол негізінен «ыстық су» және «салқын су+шейкер» режимдері нүсқаларында көрінді, ал «салқын су» режимінде оның әсері жойылды.

Бөлшектерінің мөлшері 2-3 мм және концентрациясы 0,1 г/л болатын ПЭТ нүсқасы үшін «ыстық су» режимінде өну дәрежесі судан 1,73 есеге төмен және $CuSO_4$-тен 1,63 есеге төмен болды. Өну жылдамдығы судан 2,29 есеге төмен және $CuSO_4$-тен 2,05 есеге төмен болды. Өну үйлесімділігі теріс бақылаудан 1,95 есеге ($p<0,05$) төмен, ал оң бақылаудан 1,76 есеге төмен болды. «Салқын су» режимінде көрсеткіштер айтарлықтай жақсарып, бақылауларға жақын болды, статистикалық маңызды айырмашылықтар анықталмады. «Салқын су+шейкер» режимінде көрсеткіштер төмен болды және сумен салыстырғанда өну дәрежесі бойынша 1,56 есеге, өну жылдамдығы бойынша 2,15 есеге және өну үйлесімділігі бойынша 2,21 есеге ($p<0,05$) төмендегені анықталды. Осылайша, төмен концентрациядағы 2-3 мм ірі ПЭТ фракциясы үшін негізгі сезімтал көрсеткіш – өну үйлесімділігі болды, оның көрсеткіші «ыстық су» және «салқын су + шейкер» режимдерінде күрт төмендеді.

Бөлшектерінің мөлшері 2-3 мм және концентрациясы 1,0 г/л болатын ПЭТ нүсқасы үшін қолайсыз әсер айқын көрінді. «Ыстық су» режимінде өну дәрежесі судан 1,37 есеге төмен және $CuSO_4$-тен 1,29 есеге төмен болды. Өну жылдамдығы теріс бақылаудан 1,75 есеге ($p<0,05$) және оң бақылаудан 1,57 есеге төмен болды. Өну үйлесімділігі судан 1,98 есеге ($p<0,05$) төмен және $CuSO_4$-тен 1,79 есеге төмен болды. «Салқын су» режимінде көрсеткіштер айтарлықтай жақсарды және олар бақылау мәндеріне жақын болды, статистикалық маңызды айырма-

шылықтар анықталмады. «Салқын су+шейкер» режимі бүкіл зерттеу нұсқалары үшін ең қолайсыз әсерлердің бірі болды: өну дәрежесі судан 1,96 есеге төмен; өну жылдамдығы судан 2,69 есеге ($p<0,05$) төмен; өну үйлесімділігі теріс бақылаудан 2,48 есеге ($p<0,05$) төмен болды. Осылайша, бөлшектерінің мөлшері 2-3 мм және концентрациясы 1,0 г/л ПЭТ үшін «ыстық су» және әсіресе, «салқын су+шейкер» режимдерінде ең айқын тежеуші әсер байқалды, ал «салқын су» режимінде көрсеткіштер бақылаумен салыстырмалы деңгейде біркелкі болды.

Жалпы алғанда, әрбір ПЭТ нұсқасы бойынша талдау микропластиктің сулы сығындыларының әсер етуі кезіндегі ең төмен көрсеткіштер өну жылдамдығы мен өну үйлесімділігіне тән болғанын көрсетеді, ал өну дәрежесі бірқатар жағдайларда азырақ сезімтал болып қалды. Ең қолайсыз әсерлер көбінесе «ыстық су» режимінде байқалды, ал ірі фракциялар үшін, әсіресе 2-3 мм, айқын тежелу «салқын су+шейкер» режимінде де жиі сақталды. Керісінше, «салқын су» режимінде ПЭТ нұсқаларының көрсеткіштері статистикалық маңызды айырмашылықтарсыз, теріс бақылауға жақын мәндерді көрсетті. Демек, бұл арпаның өнуіне арналған тестте фитотоксикалық әсердің көрініу дәрежесін бөлшектердің мөлшері мен ПЭТ концентрациясы ғана емес, сонымен қатар, сулы сығындыны дайындау тәсілі де анықтайтынын көрсетеді.

Сығындыларды дайындау тәсілінің әсерін жалпылама бағалау үшін бір факторлы дисперсиялық талдау (one-way ANOVA) жүргізілді, онда үш эксперименттік сызба салыстырылды: ыстық су, салқын су+шейкер және салқын су. Талдау өну дәрежесі, өну жылдамдығы және өну үйлесімділігі үшін жеке орындалды.

Сығындыны дайындау түрі барлық зерттелген параметрлерге статистикалық маңызды әсер ететіні көрсетілді. Өну дәрежесі үшін эксперименттер арасында сенімді айырмашылықтар анықталды ($F = 8,15$; $p <0,001$). Орташа мәндер «ыстық су» (46,77%) < «салқын су+шейкер» (61,42%) < «салқын су» (66,74%) реттілігімен өсті. Post-hoc талдауы «ыстық су» сериясы «салқын су + шейкер» ($p <0,05$) және «салқын су» ($p <0,001$) режимдерінен статистикалық түрғыдан маңызды ерекшеленетінін көрсетті, ал екі салқын режим арасында статистикалық маңызды айырмашылықтар анықталған жоқ.

Өну жылдамдығы үшін топ аралық айырмашылықтар одан да айқын болды: $F = 13,33$ ($p<0,001$). Орташа мәндер «ыстық су» режиміндегі 17,57-ден «салқын су+шейкер» режимінде 24,53-ке дейін және «салқын су» режимінде 31,25-ке дейін біртіндеп өсті. Барлық үш тәжірибелік сызба бір-бірінен статистикалық түрғыдан маңызды ерекшеліктерімен сипатталды: «ыстық су» «салқын су+шейкерден» ($p<0,05$) және «салқын судан» ($p<0,001$), ал шейкер – салқын судан ($p <0,05$) ерекшеленді.

Ең айқын топ аралық айырмашылықтар өну үйлесімділігі үшін тіркелді: $F = 39,11$ ($p<0,001$). Өну үйлесімділігінің орташа мәндері «ыстық су» сериясы үшін 50,58%-ды, «салқын су+шейкер» сериясы үшін 54,78%-ды және «салқын су» сериясы үшін 88,96%-ды құрады. Post-hoc талдауы сынама дайындаудың «салқын су» режимі «ыстық су» нұсқасынан да, «салқын су + шейкер» нұсқасынан да (екі жағдайда да $p < 0,001$) статистикалық түрғыдан маңызды ерекшеленетінін көрсетті, ал «ыстық су» мен «салқын су+шейкер» арасында статистикалық маңызды айырмашылықтар анықталмады.

Демек, бір факторлы дисперсиялық талдау зерттелген үш нұсқаның ішінде ең қолайсызы «ыстық су» режимі болғанын, аралық орынды «салқын су+шейкер» режимі, ал бейтарап орынды – «салқын су» режимі алғанын көрсетеді.

Өну көрсеткіштерінің құбылмалылығына жекелеген тәжірибелік факторлардың үлесін бағалау үшін үш факторлы дисперсиялық талдау (ANOVA) жүргізілді. Талдауға тек ПЭТ-нұсқалары енгізілді. Факторлар ретінде мыналар қарастырылды: сығынды алу түрі («ыстық су», «салқын су», «салқын су+шейкер» режимдері), микропластик фракциясының мөлшері (<1 мм, 1–2 мм, 2–3 мм) және концентрация (0,1 және 1,0 г/л). Талдау барлық үш көрсеткіш үшін сығынды алу түрі мен фракция мөлшері ең үлкен маңызға ие болғанын, ал концентрация дербес фактор ретінде статистикалық маңызды әсер етпегенін анықтады. Өну дәрежесі үшін сығынды түрі ($F(2,37) = 34,24$; $p<0,001$), фракция мөлшері ($F(2,37) = 12,64$; $p<0,001$), сығынды түрі × фракция өзара әрекеттесуі ($F(4,37) = 35,45$; $p<0,001$), сондай-ақ сығынды түрі × концентрация өзара әрекеттесуі ($F(2,37) = 5,08$; $p<0,05$) және үш факторлы өзара әрекеттесу ($F(4,37) = 3,12$; $p<0,05$) статистикалық маңызды болды. Бұл өну дәрежесінің неғұрлым күрделі факторлық құрылымын көрсетеді, мұнда концентрация өзін тек басқа факторлармен байланыста ғана көрсетеді.

Өну жылдамдығы үшін сығынды түрі ($F(2,37) = 54,50$; $p<0,001$), фракция мөлшері ($F(2,37) = 15,70$; $p<0,001$) және олардың өзара әрекеттесуі ($F(4,37) = 33,74$; $p<0,001$) статистикалық түрғыдан маңызды болды. Концентрацияның және оның қатысуымен болатын өзара әрекеттесулердің әсері статистикалық маңызды болған жоқ.

Өну үйлесімділігі үшін де сығынды түрі ($F(2,37) = 93,25$; $p<0,001$), фракция мөлшері ($F(2,37) = 23,60$; $p<0,001$) және сығынды түрі × фракция өзара әрекеттесуі ($F(4,37) = 8,90$; $p<0,001$) маңызды болып шықты. Концентрация негізгі фактор ретінде де, өзара әрекеттесулер құрамында да статистикалық маңызды үлес көрсетпеді.

Жалпы алғанда, үш факторлы ANOVA ПЭТ-тің қатысуымен жүргізілген тәжірибелерде арпаның өнуі ең алдымен сулы сығындыны алу жағдайларымен және микропластик фракциясының мөлшерімен анықталатынын, ал 0,1-1 г/л диапазонындағы концентрация екінші дәрежелі рөл атқаратынын көрсетті. Ең күрделі факторлық құрылым өну дәрежесіне тән болды, ал өну жылдамдығы мен өну үйлесімділігі үшін негізгі маңызға сығынды түрі, фракция және олардың өзара әрекеттесуі ие болды.

ПЭТ сулы сығындыларының pH мәні мен арпаның өну көрсеткіштері арасындағы байланысты бағалау үшін корреляциялық талдау жүргізілді. Талдау сығынды алудың үш түрін, микропластиктің үш фракциясын және екі концентрацияны қамтитын 18 ПЭТ-нұсқасы бойынша орындалды. pH барлық үш биологиялық көрсеткішпен: өну дәрежесімен ($r = -0.500$; $p < 0,05$), өну жылдамдығымен ($r = -0.558$; $p < 0,05$) және өну үйлесімділігімен ($r = -0.616$; $p < 0,01$) статистикалық түрғыдан маңызды теріс корреляцияланғаны анықталды. Зерттеу нәтижелері бойынша, ең айқын байланыс pH пен өну үйлесімділігі арасында байқалды.

Алынған нәтижелер осы тәжірибелік жүйеде ПЭТ-тің фитотоксикалық әсері тұқымдардың микропластик бөлшектерімен тікелей жанасуымен емес, ең алдымен сүзілген сулы сығындының құрамымен анықталатынын көрсетеді. Тұқымдарды өңдеу алдында сығындылар дәке арқылы сүзілгендіктен, өну дәрежесі, өну жылдамдығы мен өну үйлесімділігінде байқалатын өзгерістер негізінен, ПЭТ-тен сулы фазаға өткен еритін компоненттердің әсер етуінің және осыған байланысты ортаның химиялық қасиеттеріндегі өзгерістердің нәтижесі ретінде түсіндірілуі керек. Бұл өсімдіктер үшін микропластиктің уыттылығы тек бөлшектерге ғана емес, сонымен қатар сүзінділерге – шайылатын заттарға, оның ішінде пластик қоспаларға және құрамындағы қосылыстарға байланысты болуы мүмкіндігін көрсететін заманауи шолулармен жақсы үйлеседі (Y. Li et al., 2024; Qiu et al., 2024).

Біздің жұмысымыздағы ең айқын тежеуші әсер сынама дайындаудың «ыстық су» режиміне тән болды. Дәл осы топта теріс бақылаумен (дистилденген сумен) салыстырғанда өну жылдамдығы мен өну үйлесімділігі, ал бірқатар нұсқаларда өну дәрежесінің де төмендеуі жиі байқалды. ПЭТ-ті суда қыздыру төмен молекулалық қосылыстардың, синтездің қалдық реагенттерінің және полимердің ескіру өнімдерінің ерітіндіге өтуін біршама күшейтеді. Демек, дәл осы сүзіндінің химиялық құрамы биологиялық әсердің негізгі көзі болуы мүмкін (Y. Li et al., 2024; Qiu et al., 2024).

Нәтиженің маңыздылығы, «ыстық су» режимінде өну жылдамдығы мен өну үйлесімділігінің пластик ерітінділерінің әсерінен тежелуі, ал өну дәрежесінің онша сезімтал болмауы. Бұл өнудің ерте кинетикалық параметрлері өнген тұқымдардың соңғы пайызына қарағанда сублетальды стресстің сезімтал көрсеткіштері деген жалпы түсінікке сәйкес келеді. Өсімдіктерге микро- және нанопластиктердің әсері туралы шолуларда микропластиктер және олармен байланысты химиялық компоненттер тұқымдардың бөртіп ісінуін, ферменттік жүйелердің белсенділігін және ұрықтың ерте өсуін тежей алатыны, бұл ең алдымен өну қарқыны мен синхрондылығының төмендеуінен көрініс табатыны атап өтіледі (Khan et al., 2024; Y. Li et al., 2024).

«Салқын су + шайқағыш» үлгісін дайындау режимі аралық орынды иеленді, бірақ нәтижелері біртекті болмады. Нұсқалардың бір бөлігі, әсіресе фракция мөлшері <1 мм және концентрациясы 0,1 г/л ПЭТ үшін, өңделмеген бақылау тұқымдарына қарағанда өну дәрежесі мен өну жылдамдығының жоғары мәндері байқалды, ал үлкен фракциялар үшін жеке көрсеткіштердің статистикалық түрғыдан айтарлықтай нашарлауы тіркелді. Бұл көп бағыттылық әдебиетте сипатталған өсімдіктердің микропластиктерге контекст-тәуелді және сызықтық емес реакциясына жақсы сәйкес келеді, мұнда әсер полимердің, бөлшектер мөлшерінің, концентрацияның және экспозиция жағдайларының үйлесіміне

байланысты болады, ал төмен дозаларда кейде бейтарап немесе әлсіз ынталандырушы әсерлер болуы мүмкін (Lozano et al., 2022; Wong & Taylor, 2025; Železnikar et al., 2025).

Бейтарап нәтижелер сынама дайындаудың «салқын су» режимінде алынды, мұнда барлық ПЭТ-нұсқалары өну дәрежесі, өну жылдамдығы және өну үйлесімділігі бойынша теріс бақылаудан статистикалық маңызды ерекшеленбеді. Бұл – араластырусыз салқын экстракция кезінде ПЭТ суға биологиялық белсенді заттарды айтарлықтай аз бөлгенін, немесе осы заттардың құрамы арпа тұқымдары үшін азырақ уытты болғанын болжауға мүмкіндік береді. Әсер ету сүзілген сығынды арқылы жүргендіктен, сығынды дайындау шарттары полимер компоненттерінің белсенді шайылуына ықпал етпесе, ПЭТ-тің өзі міндетті түрде айқын фитотоксикалық реакция тудырмайдыдеп болжауға болады. Бұл болжам әдебиет деректерімен сәйкес келеді, онда әсердің экспозициялық ортаға және тест жүйелерін дайындау әдістемесіне қатты тәуелділігі атап өтіледі. (Pu & Seifert, 2026; Qiu et al., 2024).

Үш факторлы дисперсиялық талдау сығынды түрінен (сынама дайындау режимі) басқа, барлық үш биологиялық көрсеткіш үшін статистикалық маңызды фактор ПЭТ фракциясының мөлшері мен «сығынды түрі × фракция» өзара әрекеттесуі болғанын көрсетті. Кішігірім бөлшектердің меншікті беткі ауданы үлкенірек, сондықтан, үлкен фрагменттерге қарағанда қосылыстардың бөліну кинетикасына басқаша әсер етуі мүмкін. Демек, бөлшектердің мөлшерін өсімдіктердің биологиялық жауабының негізгі модификаторларының бірі ретінде қарастыруға болады (X. Li et al., 2023; Y. Li et al., 2024; Y. Zhang et al., 2025).

0,1-1,0 г/л диапазонындағы ПЭТ концентрациясы сығынды түрі мен фракциямен салыстырғанда, өну жылдамдығына да, өну үйлесімділігіне де дербес статистикалық маңызды әсер көрсетпеді, ал өну дәрежесі үшін әсері тек өзара әрекеттесулер құрамында ғана көрінді. Мұны таңдалған доза диапазонында нұсқалар арасындағы айырмашылықтар ПЭТ мөлшерімен емес, температураның, араластырудың және фракция мөлшерінің берілген үйлесімінде түзілген сүзінді түрімен анықталғанын көрсететін шама ретінде түсіндіруге болады. Өсімдіктерге микропластиктердің әсерін зерттеу бойынша жасалған жұмыстарда дозалық әсер көбінесе, бейсызық болатыны, ал концентрациялар арасындағы айырмашылықтар пластик түрінің, бөлшектер мөлшерінің немесе әсер ету жағдайларының ықпалынан әлсізірек болуы мүмкін екендігі атап көрсетіледі (Wong & Taylor, 2025; M. Zhang et al., 2025; Y. Zhang et al., 2025).

Корреляциялық талдау бұл көріністі толықтырады: өсу көрсеткіштері мен pH арасында теріс корреляциялық байланыс статистикалық маңызды мәнге ие болды. Мұнда pH қоршаған орта құрамындағы өзгерістерді көрсететін химиялық өзгерістердің интегралды көрсеткіші ретінде әрекет етуі ықтимал. Микропластиктердің фитотоксикалық әсерлеріне шолулар, қоршаған ортаның қасиеттері мен шайылатын заттардың құрамы өну мен өсудің алғашқы сатыларын айтарлықтай өзгерте алатынын да атап өтеді (Khan et al., 2024; Qiu et al., 2024).

ПЭТ-нұсқаларын $CuSO_4$ оң бақылауымен салыстыру сығындылардың бір бөлігі, әсіресе «ыстық су» режимінде, классикалық уытты заттың әсеріне ұқсас немесе одан да айқын әсерлер тудыратыны анықталды. Бұл әдістемелік тұрғыдан маңызды, өйткені, сүзілген ПЭТ сығындыларын алдын-ала әлсіз стрессор ретінде қарастыруға болмайтынын көрсетеді. Белгілі бір экстракция жағдайларында олар айқын биологиялық жауап қалыптастыруға қабілетті. Бұл пластик шайындылардың уыттылығы туралы заманауи деректерге сәйкес келеді және бөлшектердің уытты әсерін немесе фильтраттың уыттылығын бірге қарастыру қажеттілігін көрсетеді (Y. Li et al., 2024; Macan et al., 2024).

Біздің зерттеуімізде ең сезімтал көрсеткіш – өну үйлесімділігі болғаны ерекше назар аударуға тұрарлық. Дисперсиялық талдауда F-критерийінің максималды мәндері, ал pH-пен корреляциялық талдауда – ең тығыз теріс байланыс дәл осы көрсеткіш үшін алынды. Бұл сүзілген ПЭТ сығындылары ең алдымен, өнудің негізінде жатқан физиологиялық процестердің синхрондылығын, содан кейін тұқымдардың түпкілікті өміршеңдігін бұзғанын көрсетеді. Өсімдіктер мен микропластиктер бойынша жүргізілген жұмыстар дамудың ерте кезеңдері, соның ішінде, өну кинетикасы мен бастапқы өну жылдамдығы көбінесе, пластмассалар мен олардың шайылып кететін компоненттерінен туындайтын химиялық стресске ең сезімтал екенін көрсетеді (Khan et al., 2024; X. Li et al., 2023; Lozano et al., 2022).

Жалпы алғанда, біздің зерттеуіміздің нәтижелері «ПЭТ-су-арпа тұқымы» жүйесіндегі ше-

шуші фактор жай ғана микропластиктің болуы емес, сүзілген сулы сығындыны қалыптастыру режимі екенін көрсетеді. Ең қолайсыз әсерлер ыстық экстракция кезінде, аралық әсерлер – шейкердегі салқын су кезінде, ал ең жеңіл әсерлер – араластырусыз салқын су кезінде байқалды. Бұл ПЭТ-тің фитотоксикалық әсерін бағалау кезінде полимердің өзіндік сипаттамаларын ғана емес, сонымен қатар сығынды алу жағдайларын да ескеру қажет екенін білдіреді, өйткені, тұқымдарға әсер ететін ерітіндінің химиялық профилін дәл солар қалыптастырады.

Қорытынды

Осы зерттеуде ПЭТ-микропластиктің сүзілген сулы сығындыларының *Hordeum vulgare* L. өсімдігінің ерте өну кезеңдеріне әсерінің кешенді бағалауы жүргізілді. Тұқымдардың микропластикалық бөлшектермен тікелей жанасуын зерттейтін зерттеулерден айырмашылығы, бұл тәжірибелік жүйеде тұқымдар сүзілген сулы сығындымен өңделді, бұл негізінен, ПЭТ-тен сулы фазаға ауысқан еритін компоненттердің әсерін бағалауға мүмкіндік берді. Алынған нәтижелер биологиялық әсердің айқындығы – ең алдымен, сығындыны алу жағдайларымен анықталатынын көрсетті. Арпа тұқымдарына «ыстық су» режимінде алынған сығындылар ең қолайсыз әсер етті, ал араластырусыз салқын су жағдайында дайындалған сығындылар ең жеңіл әсермен сипатталды. Сынама дайындаудың «салқын су+шейкер» режимі аралық орынды алды және әсерге жауаптың жоғары құбылмалылығымен ерекшеленді, бұл механикалық араластыру кезіндегі ПЭТ-сығындылар әсерінің күрделі әрі біржақты емес сипатын көрсетеді. Барлық зерттелген биологиялық көрсеткіштер (өну дәрежесі, өну жылдамдығы мен өну үйлесімділігі) үшін негізгі факторлар сығынды алу түрі, ПЭТ фракциясының мөлшері, сондай-ақ олардың өзара әрекеттесуі болды. Бұл арпаның биологиялық жауабы тек микропластиктің болуымен ғана емес, сонымен қатар, температураға, араластыруға және бөлшектердің беткі ауданына байланысты сүзілген сулы фазаның қандай химиялық құрамға ие болатындығымен анықталатынын дәлелдейді. ПЭТ-сығындылардың әсеріне өну жылдамдығы мен өну үйлесімділігі жоғары сезімталдық көрсететіні анықталды, ал жалпы өну дәрежесі бірқатар жағдайларда азырақ сезімтал болып қалды. Бұл микропластиктердің сулы сығындыларының фитотоксикалық әсерін бағалау кезінде өнудің кинетикалық параметрлерін ақпараттық критерийлер ретінде қарастыруға мүмкіндік береді. Практикалық тұрғыдан бұл өте маңызды, себебі, жалпы өну дәрежесінің орташа өзгеруі өну синхрондылығының бұзылуына, біркелкі өскіндердің қалыптасуына кері әсерін тигізуі мүмкін.

Қаржыландыру көзі

Жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландыратын AP26100125 «In vivo сынақ жүйелерінде микропластиктердің потенциалды генотоксикалық және мутагенділігін зерттеу» (2025–2027 жж., ғылыми жетекші – А.В. Ловинская) жобасы аясында жүргізілді.

Мүдделер қақтығысы

Барлық авторлар мақаланы оқып шықты, мазмұнымен таныс, мүдделер қақтығысы жоқ екенін мәлімдейді.

Авторлардың үлесі

Халматова Р.Р. – зерттеу жүргізу, әдіснама, валидация. Мамедова Е.Р. – зерттеу жүргізу, әдіснама, валидация. Ловинская А.В. – тұжырымдаманы әзірлеу, әдіснама, зерттеу жүргізу, ғылыми жетекшілік, мәтінді жазу (бастапқы нұсқа). Ыргынбаева Ш.М. –мәтінді жазу (бастапқы нұсқа). Шалахметова Т.М. – мәтінді жазу (рецензиялау және редакциялау). Колумбаева С.Ж. – тұжырымдаманы әзірлеу, мәтінді жазу (рецензиялау және редакциялау).

Әдебиеттер

Ahmad, Z., Najaf, D., Atif, S., Chaudhry, H., Aslam, F., Bhatti, S. G., Alsaiari, N. S., Al-Buriahi, M. S., & Sesay, M. (2025). Assessment of physiological stress on plants grown in soil contaminated with microplastics. *Scientific Reports*, *15*, 35551. https://doi.org/10.1038/s41598-025-19610-6

Alzaben, M., Burve, R., Loeschner, K., Møller, P., & Roursgaard, M. (2023). Nanoplastics from ground polyethylene terephthalate food containers: Genotoxicity in human lung epithelial A549 cells. *Mutation Research. Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, *892*, 503705. https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2023.503705

Bobori, D. C., Dimitriadi, A., Feidantsis, K., Samiotaki, A., Fafouti, D., Sampsonidis, I., Kalogiannis, S., Kastrinaki, G., Lambropoulou, D. A., Kyzas, G. Z., Koumoundouros, G., Bikiaris, D. N., & Kaloyianni, M. (2022). Differentiation in the expression of toxic effects of polyethylene-microplastics on two freshwater fish species: Size matters. *Science of The Total Environment*, *830*, 154603. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154603

Cui, R., Kwak, J. I., & An, Y.-J. (2023). Multigenerational effects of microplastic fragments derived from polyethylene terephthalate bottles on duckweed Lemna minor: Size-dependent effects of microplastics on photosynthesis. *Science of The Total Environment*, *872*, 162159. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162159

Daniel Tang, K. H. (2024). A review of the toxic effects of microplastics based on studies on mammals and mammalian cell lines. *Environmental Science: Advances*, *3*(12), 1669–1678. https://doi.org/10.1039/D4VA00227J

Gutiérrez-García, J., Egea, R., Barguilla, I., Nymark, P., García-Rodríguez, A., Guyot, B., Maguer-Satta, V., Marcos, R., Rubio, L., & Hernández, A. (2025). Long-Term Exposure to Real-Life Polyethylene Terephthalate Nanoplastics Induces Carcinogenesis In Vitro. *Environmental Science & Technology*, *59*(22), 10891–10904. https://doi.org/10.1021/acs.est.5c01628

Iheanacho, S. C., Igberi, C., Amadi-Eke, A., Chinonyerem, D., Iheanacho, A., & Avwemoya, F. (2020). Biomarkers of neurotoxicity, oxidative stress, hepatotoxicity and lipid peroxidation in Clarias gariepinus exposed to melamine and polyvinyl chloride. *Biomarkers*, *25*(7), 603–610. https://doi.org/10.1080/1354750X.2020.1821777

Khan, A. R., Ulhassan, Z., Li, G., Lou, J., Iqbal, B., Salam, A., Azhar, W., Batool, S., Zhao, T., Li, K., Zhang, Q., Zhao, X., & Du, D. (2024). Micro/nanoplastics: Critical review of their impacts on plants, interactions with other contaminants (antibiotics, heavy metals, and polycyclic aromatic hydrocarbons), and management strategies. *Science of The Total Environment*, *912*, 169420. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169420

Kim, D., Kim, D., Kim, H.-K., Jeon, E., Sung, M., Sung, S.-E., Choi, J.-H., Lee, Y., Kang, K.-K., Lee, S., & Lee, S. (2025). Organ-specific accumulation and toxicity analysis of orally administered polyethylene terephthalate microplastics. *Scientific Reports*, *15*, 6616. https://doi.org/10.1038/s41598-025-91170-1

Li, X., Wang, R., Dai, W., Luan, Y., & Li, J. (2023). Impacts of Micro(nano)plastics on Terrestrial Plants: Germination, Growth, and Litter. *Plants*, *12*(20), 3554. https://doi.org/10.3390/plants12203554

Li, Y., Yang, G., Yu, C., Lei, X., Xing, X., Ma, X., & Sun, Y. (2024). The Impact of Microplastic Concentration and Particle Size on the Germination and Seedling Growth of Pisum sativum L. *Agronomy*, *14*(5), 923. https://doi.org/10.3390/agronomy14050923

Lozano, Y. M., Caesaria, P. U., & Rillig, M. C. (2022). Microplastics of different shapes increase seed germination synchrony while only films and fibers affect seed germination velocity. *Frontiers in Environmental Science*, *10*, 1017349. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1017349

Macan, G. P. F., Munhoz, D. R., Willems, L. A. J., Monkley, C., Lloyd, C. E. M., Hageman, J., Geissen, V., Landa, B. B., & Harkes, P. (2024). Macro- and microplastics leachates: Characterization and impact on seed germination. *Journal of Hazardous Materials*, *480*, 136013. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136013

Mondal, N. K., Kundu, S., Debnath, P., Mondal, A., & Sen, K. (2022). Effects of polyethylene terephthalate microplastic on germination, biochemistry and phytotoxicity of *Cicer arietinum* L. and cytotoxicity study on *Allium cepa* L. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, *94*, 103908. https://doi.org/10.1016/j.etap.2022.103908

Organisation for Economic Co-operation and Development. (2024). Policy scenarios for eliminating plastic pollution by 2040. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/76400890-en

Pencik, O., Molnarova, K., Durdakova, M., Kolackova, M., Klofac, D., Kucsera, A., Capal, P., Svec, P., Bytesnikova, Z., Richtera, L., Brtnický, M., Adam, V., & Huska, D. (2023). Not so dangerous? PET microplastics toxicity on freshwater microalgae and cyanobacteria. *Environmental Pollution*, *329*, 121628. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121628

Pu, H., & Seifert, A. (2026). Studying plant responses to micro- and nanoplastics: A review of experimental design and analytical methods. *Microplastics and Nanoplastics*, *6*(1), 23. https://doi.org/10.1186/s43591-026-00182-9

Qiu, G., Wang, Q., Wang, T., Zhang, S., Song, N., Yang, X., Zeng, Y., Sun, Z., Wu, G., & Yu, H. (2024). Microplastic risk assessment and toxicity in plants: A review. *Environmental Chemistry Letters*, *22*(1), 209–226. https://doi.org/10.1007/s10311-023-01665-4

Rochman, C. M., Brookson, C., Bikker, J., Djuric, N., & Et., A. (2019). Rethinking microplastics as a diverse contaminant suite. *Environmental Toxicology and Chemistry*. https://doi.org/10.1002/etc.4371

Shorobi, F. M., & Park, J. H. (2025). Effect of polyethylene terephthalate (PET) microplastics on radish and carrot growth, nutrient uptake, and physiological stress responses. *Applied Biological Chemistry*, *68*(1), 66. https://doi.org/10.1186/s13765-025-01039-0

Singh, D., Nath, K., & Sharma, Y.-K. (2007). Toxicological effect of copper on growth and metabolism of barley (Hordeum vulgare L). *Journal of Ecophysiology and Occupational Health*, *7*(1–2), 9–16.

Tang, K. H. D. (2020). Effects of Microplastics on Agriculture: A Mini-review. *Asian Journal of Environment & Ecology*, 1–9. https://doi.org/10.9734/ajee/2020/v13i130170

Tang, K. H. D., & Li, R. (2024). Aged Microplastics and Antibiotic Resistance Genes: A Review of Aging Effects on Their Interactions. *Antibiotics*, *13*(10), 941. https://doi.org/10.3390/antibiotics13100941

Wang, L., Cao, L., Wang, X., Liu, Y., Zhang, W., Gou, Y., He, J., Huo, J., Li, X., & Chen, J. (2025). Genotoxicity mode of action exploration of polyethylene glycol terephthalate (PET) acetic acid migration solution under repeated-dose exposure in rats. *Mutation Research. Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, *907*, 503886. https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2025.503886

Wong, A. E., & Taylor, G. (2025). Plants and microplastics: Growing impacts in the terrestrial environment. *Frontiers in Plant Science*, *16*, 1666047. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1666047

Xu, Y., Chen, X., Xu, Y., Liu, J., Yang, W., Wei, W., Zheng, B., & Li, C. (2026). Mechanistic insights into the size-dependent bioaccumulation and phytotoxicity of polyethylene microplastics in tomato seedlings. *Frontiers in Plant Science*, *17*. https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1786469

Železnikar, Š., Kacjan Maršić, N., & Pintar, M. (2025). Sowing in Plastic Contaminated Soils: How (Micro)plastics Impact Seed Germination and Growth of White Mustard (Sinapis alba L.). *Applied Sciences*, *15*(12), 6801. https://doi.org/10.3390/app15126801

Zhang, M., Li, W., Li, Q., Younas, A., Shaaban, M., Li, Y., Liu, J., Wang, Y., Ma, Z., Shi, Z., Shen, H., & Liu, L. (2025). Effects of microplastics on farmland soils and plants: A review. *Plant, Soil and Environment*, *71*(12), 829–848. https://doi.org/10.17221/180/2025-PSE

Zhang, Y., Wang, X., Li, J., Yang, Y., Gao, Y., & Wang, P. (2025). Polyethylene microplastic: Impacts on ryegrass seed germination and seedling development. *BMC Plant Biology*, *25*(1), 876. https://doi.org/10.1186/s12870-025-06891-2

Zhao, S., Kvale, K. F., Zhu, L., Zettler, E. R., Egger, M., Mincer, T. J., Amaral-Zettler, L. A., Lebreton, L., Niemann, H., Nakajima, R., Thiel, M., Bos, R. P., Galgani, L., & Stubbins, A. (2025). The distribution of subsurface microplastics in the ocean. *Nature*, *641*(8061), 51–61. https://doi.org/10.1038/s41586-025-08818-1

Авторлар туралы мәлімет:

Рената Халматова – «7М05105 – Генетика» білім беру бағдарламасының 1-курс магистранты, Биология және биотехнология факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, стажер-зерттеуші, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ жанындағы Биология және биотехнология мәселелері ғылыми-зерттеу институты (e-mail: renata.ren2003@gmail.com).

Екатерина Мамедова – кіші ғылыми қызметкері, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ жанындағы Биология және биотехнология мәселелері ғылыми-зерттеу институты (e-mail: katya24.04.97@mail.ru).

Анна Ловинская – PhD, жоба жетекшісі (PI), молекулалық биология және генетика кафедрасының доценті, Биология және биотехнология факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, жетекші ғылыми қызметкері, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ жанындағы Биология және биотехнология мәселелері ғылыми-зерттеу институты (e-mail: anna.lovinskaya@kaznu.edu.kz).

Шынар Ырғынбаева – молекулалық биология және генетика кафедрасының аға оқытушысы, Биология және биотехнология факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, аға ғылыми қызметкері, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ жанындағы Биология және биотехнология мәселелері ғылыми-зерттеу институты (e-mail: Shynar.Yrgynbayeva@kaznu.edu.kz).

Тамара Шалахметова – зоология, гистология және цитология кафедрасының профессоры, Биология және биотехнология факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, бас ғылыми қызметкері, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ жанындағы Биология және биотехнология мәселелері ғылыми-зерттеу институты (e-mail: t_shalakhmetova@mail.ru).

Сауле Колумбаева – молекулалық биология және генетика кафедрасының профессоры, Биология және биотехнология факультеті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, бас ғылыми қызметкері, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ жанындағы Биология және биотехнология мәселелері ғылыми-зерттеу институты (e-mail: s_kolumb@mail.ru).

Information about the authors:

Renata Khalmatova – 1st-year Master's student in the Educational Program "7M05105 – Genetics", Faculty of Biology and Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University; Research Intern, Research Institute of Problems of Biology and Biotechnology at Al-Farabi Kazakh National University (e-mail: renata.ren2003@gmail.com).

Ekaterina Mamedova – Junior Researcher, Research Institute of Problems of Biology and Biotechnology at Al-Farabi Kazakh National University (e-mail: katya24.04.97@mail.ru).

Anna Lovinskaya – PhD, Project Leader (PI), Associate Professor of the Department of Molecular Biology and Genetics, Faculty of Biology and Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University; Leading Researcher, Research Institute of Problems of Biology and Biotechnology at Al-Farabi Kazakh National University (e-mail: anna.lovinskaya@kaznu.edu.kz).

Shynar Yrgynbayeva – Senior Lecturer of the Department of Molecular Biology and Genetics, Faculty of Biology and Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University; Senior Researcher, Research Institute of Problems of Biology and Biotechnology at Al-Farabi Kazakh National University (e-mail: Shynar.Yrgynbayeva@kaznu.edu.kz).

Tamara Shalakhmetova – Professor of the Department of Zoology, Histology and Cytology, Faculty of Biology and Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University; Chief Researcher, Research Institute of Problems of Biology and Biotechnology at Al-Farabi Kazakh National University (e-mail: t_shalakhmetova@mail.ru).

Saule Kolumbayeva – Professor of the Department of Molecular Biology and Genetics, Faculty of Biology and Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University; Chief Researcher, Research Institute of Problems of Biology and Biotechnology at Al-Farabi Kazakh National University (e-mail: s_kolumb@mail.ru).

Сведения об авторах:

Рената Халматова – магистрант 1 курса ОП «7М05105 – Генетика», факультет биологии и биотехнологии, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, стажер-исследователь, НИИ проблем биологии и биотехнологии при КазНУ им. аль-Фараби (e-mail: renata.ren2003@gmail.com).

Екатерина Мамедова – младший научный сотрудник, НИИ проблем биологии и биотехнологии при КазНУ им. аль-Фараби (e-mail: katya24.04.97@mail.ru).

Анна Ловинская – PhD, руководитель проекта (PI), доцент кафедры молекулярной биологии и генетики, факультет биологии и биотехнологии, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, ведущий научный сотрудник, НИИ проблем биологии и биотехнологии при КазНУ им. аль-Фараби (e-mail: anna.lovinskaya@kaznu.edu.kz).

Шынар Ыргынбаева – старший преподаватель кафедры молекулярной биологии и генетики, факультет биологии и биотехнологии, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, старший научный сотрудник, НИИ проблем биологии и биотехнологии при КазНУ им. аль-Фараби (e-mail: Shynar.Yrgynbayeva@kaznu.edu.kz).

Тамара Шалахметова – профессор кафедры зоологии, гистологии и цитологии, факультет биологии и биотехнологии, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, главный научный сотрудник, НИИ проблем биологии и биотехнологии при КазНУ им. аль-Фараби (e-mail: t_shalakhmetova@mail.ru).

Сауле Колумбаева – профессор кафедры молекулярной биологии и генетики, факультет биологии и биотехнологии, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, главный научный сотрудник, НИИ проблем биологии и биотехнологии при КазНУ им. аль-Фараби (e-mail: s_kolumb@mail.ru).

Келіп түсті: 04 сәуір 2026 жыл
Қабылданды: 25 қыркүйек 2026 жыл

3-бөлім

БИОЛОГИЯЛЫҚ АЛУАНТҮРЛІЛІКТІ САҚТАУДЫҢ ӨЗЕКТІ МӘСЕЛЕЛЕРІ

Section 3

ACTUAL PROBLEMS OF BIODIVERSITY CONSERVATION

Раздел 3

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОХРАНЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ

IRSTI 34.35.31 https://doi.org/10.26577/EJE208831026

К.Ж. Адилова[1*], Ж. Койлыбаев[1], А.Е. Кусниева[2], С.А. Манкибаева[1]

[1] Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан
[2] Асфендияров атындағы Қазақ медициналық университеті, Алматы, Қазақстан
*e-mail: kulvira75@mail.ru

ҚЫЗЫЛҚҰМНЫҢ ОҢТҮСТІК ШЫҒЫС БӨЛІГІНДЕГІ *BRYONIA MELANOCARPA* NABIEV. ҚАТЫСЫНДАҒЫ ӨСІМДІК ҚАУЫМДАСТЫҒЫНЫҢ ТІРШІЛІК ФОРМАСЫ

Бұл зерттеу Қызылқұм шөлінің оңтүстік-шығыс бөлігінде өсетін *Bryonia melanocarpa* Nabiev түрінің қатысуымен қалыптасқан өсімдік қауымдастықтарының тіршілік формалары мен таксономиялық құрамына жан-жақты талдау жасайды. *Bryonia melanocarpa* – Қазақстанның Қызыл кітабына енгізілген сирек кездесетін реликті түр, және далалық зерттеулер экологиялық жағдайлары мен флористикалық қанықтылығы әртүрлі үш табиғи популяцияда жүргізілді.

Бірінші популяция (42.198287 / 67.792981) 45 түрді қамтиды, олар 38 туыс пен 20 тұқымдасқа жатады. Флора құрамында ксерофитті және псаммофитті өсімдіктер басым, сондай-ақ *Chenopodiaceae*, *Fabaceae*, *Poaceae* және *Brassicaceae* тұқымдастары жетекші орын алады. Екінші популяция (42.7198286 / 67.779298) 36 түрден (28 туыс, 17 тұқымдас) тұрады; онда иран-тұрандық флора элементтері басым және терофиттер мен гемикриптофиттердің жоғары үлесі айқын байқалады, бұл аймақтың аса құрғақ климаттық жағдайларына бейімделуінің көрсеткіші болып табылады. Үшінші популяция (42.7198287 / 67.7792981) 30 түрден (28 туыс, 17 тұқымдас) тұрады, онда шөлдің құмды экожүйелеріне тән *Chenopodiaceae* тұқымдасы негізгі орынды иеленеді.

Раункиер жіктеуі бойынша, барлық популяцияларда тіршілік формаларының басым бөлігін терофиттер, гемикриптофиттер және хамефиттер құрайды – бұл аридті континенттік жағдайларға тән бейімделген топтар. Зерттеу нәтижелері *Bryonia melanocarpa* қатысатын өсімдік қауымдастықтарының ежелгі реликті элементтер мен қазіргі құрғақшылыққа төзімді формаларды біріктіретін жоғары маманданған ксероморфты кешендер екенін көрсетеді. Бұл жұмыс шөлді аймақтардағы өсімдік жамылғысының динамикасын түсінуге маңызды үлес қосады және Қызылқұм шөліндегі *Bryonia melanocarpa* түрін және оның осал табиғи мекендерін сақтау қажеттілігін айқындайды.

Түйін сөздер: *Bryonia melanocarpa*, Қызылқұм шөлі, тіршілік формалары, Иран-Тұран флорасы, псаммофиттік өсімдіктер жамылғысы, аридті экожүйелер.

K.Zh. Adilova[1*], Zh. Koilybayev[1], A.E. Kusniyeva[2], S.A. Mankibaeva[1]

[1]Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
[2] S.D. Asfendiyarov Kazakh National Medical University, Almaty, Kazakhstan
*e-mail: kulvira75@mail.ru

Life form of the plant community involving *Bryonia melanocarpa* Nabiev. in the southeastern part of the Kyzylkum desert

This study provides a comprehensive analysis of the life forms and taxonomic composition of plant communities involving *Bryonia melanocarpa* Nabiev in the southeastern part of the Kyzylkum Desert. *Bryonia melanocarpa* is a rare relict species listed in the Red Book of Kazakhstan, and field investigations were conducted across three natural populations differing in ecological conditions and floristic saturation.

The first population (42.198287 / 67.792981) comprises 45 species belonging to 38 genera and 20 families, characterized by a highly xerophytic and psammophytic vegetation complex dominated by *Chenopodiaceae*, *Fabaceae*, *Poaceae*, and *Brassicaceae*. The second population (42.7198286 / 67.779298) includes 36 species (28 genera, 17 families) with a predominance of Irano-Turanian floristic elements, as well as a high proportion of therophytes and hemicryptophytes indicating adaptation to extreme aridity. The third population (42.7198287 / 67.7792981) contains 30 species from 28 genera and

 © 2026 Al-Farabi Kazakh National University

According to Raunkiaer's system, the dominant life forms across all populations are therophytes, hemicryptophytes, and chamaephytes – adaptive groups widely associated with arid continental environments. The findings demonstrate that plant communities with *Bryonia melanocarpa* represent highly specialized xeromorphic complexes combining ancient relict species with modern drought-resistant forms. This research contributes valuable data for understanding desert vegetation dynamics and highlights the importance of conserving *Bryonia melanocarpa* and its fragile habitats in the Kyzylkum Desert.

Keywords: Bryonia melanocarpa, Kyzylkum Desert, life forms, Irano-Turanian flora, psammophytic vegetation, arid ecosystems.

К.Ж. Адилова[1*], Ж. Койлыбаев[1], А.Е. Кусниева[2], С.А. Манкибаева[1]

[1]Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан
[2]Казахский национальный медицинский университет имени С.Д. Асфендиярова, Алматы, Казахстан
*e-mail: kulvira75@mail.ru

Жизненная форма растительного сообщества с участием *Bryonia melanocarpa* Nabiev. в юго-восточной части Кызылкума

Данное исследование представляет всесторонний анализ жизненных форм и таксономического состава растительных сообществ с участием *Bryonia melanocarpa* Nabiev в юго-восточной части пустыни Кызылкум. *Bryonia melanocarpa* является редким реликтовым видом, занесённым в Красную книгу Казахстана, и полевые исследования были проведены на трёх природных популяциях, различающихся экологическими условиями и флористическим разнообразием.

Первая популяция (42.198287 / 67.792981) включает 45 видов, относящихся к 38 родам и 20 семействам, и характеризуется выраженным ксерофитным и псаммофитным комплексом растительности с доминированием семейств *Chenopodiaceae*, *Fabaceae*, *Poaceae* и *Brassicaceae*. Вторая популяция (42.7198286 /67.779298) представлена 36 видами (28 родов, 17 семейств) с преобладанием ирано-туранских флористических элементов, а также значительной долей терофитов и гемикриптофитов, что указывает на адаптацию к экстремально засушливым условиям. Третья популяция (42.7198287 / 67.7792981) включает 30 видов из 28 родов и 17 семейств, где ведущим семейством является *Chenopodiaceae*, типичное для песчаных пустынных экосистем.

Согласно системе Раункиера, доминирующими жизненными формами во всех популяциях являются терофиты, гемикриптофиты и хамефиты – адаптивные группы, характерные для аридных континентальных регионов. Полученные данные свидетельствуют, что растительные сообщества с участием *Bryonia melanocarpa* представляют собой высокоспециализированные ксероморфные комплексы, объединяющие древние реликтовые элементы и современные формы, устойчивые к засухе. Проведённое исследование вносит значимый вклад в понимание динамики пустынной растительности и подчёркивает важность сохранения *Bryonia melanocarpa* и её уязвимых местообитаний в пустыне Кызылкум.

Ключевые слова: Bryonia melanocarpa, пустыня Кызылкум, жизненные формы, Ирано-Туранская флора, псаммофитная растительность, аридные экосистемы.

Кіріспе

Қызылқұм шөлі Сырдария мен Әмудария өзендері аралығындағы кең аумақты алып жатыр. Оның ауданы 20 млн гектардан асады және аймақтағы шөлдердің ішінде тек Қарақұмнан (35 млн гектар) кейін екінші орында тұр. Қызылқұм өңірінің қазақстандық бөлігі шөлдің солтүстік және шығыс секторларын қамтиды. Қызылқұмның оңтүстік аумақтары Өзбекстан Республикасының шегінде орналасқан, ал Әмудария арнасын бойлай созылып жатқан жіңішке белдеу Түрікменстан аумағына жатады. Шөлдің солтүстік-батыс бөлігі Қарақалпақстанның құрамына кіреді (Toremuratov, 1978). Осы жұмыста зерттеліп отырған Қызылқұм шөлінің Қазақстан аумағындағы бөлігі солтүстігінде Арал теңізімен, ал оңтүстік-батысы мен шығысында Әмудариянның төменгі ағысымен шектеседі (Bazarbaeva & Serekeeva, 2022).

Зерттеу нысанының шөлді географиялық аудандары Сахара-Гоби шөлді облысының, Иран-Тұран бөліне, Солтүстік Тұран провинциясының және Шығыстяньшань провинциясшасының құрамына кіреді, бұл оның Еуразияның ірі аридті ландшафтық құрылымдарына жататынын көрсетеді (Isaev, 1995).

Қызылқұмның үлкен ауданы флоралық әртүрліліктің шешуші факторы болып табылмайды. Мұны эндемизмді талдау да растайды: 41 эндем және 11 субэндем (негізінен Қарақұмға дейін таралады) анықталған, бұл 3,9%-ды (субэндемді қоса есептегенде – 4,9%) құрайды. Бұл көрсеткіш Қарақұмға қатысты

көрсеткіштен (1,3%) едәуір жоғары (Jeffrey, 1969).

Қызылқұмның эндемизмін ішінара таулы аймақтардың флораларымен салыстыруға болады. Мәселен, Сырдария Қаратауы үшін бұл көрсеткіш 9,2%-ды құрайды (Камелин, 1990). Алайда эндемикалық туыстар жиі кездесетін таулы өңірлерден айырмашылығы, Қызылқұмда мұндай туыстар әзірге анықталған жоқ.

Қызылқұм флорасының туыстық байланыстары қазақстандық және иран-хорасан флораларымен байқалады (Benarba & Belhouala, 2024).

Өңірге *Borszczowia, Cornulaca, Iljinia, Londesia, Kirilovia* туыстары, сондай-ақ битипті *Bienertia* және *Alexandra* туыстары тән. *Salsola* туысында 3 эндем, *Climacoptera* туысында – 2, *Xylosalsola* туысында – 1 эндем анықталған (Kumar et al., 2008).

Fabaceae тұқымдасы 71 түрді қамтиды, олардың 42 түрі *Astragalus* туысына жатады, оның ішінде 5 эндем бар. Монотипті *Smirnowia* туысы және Хорасанмен әрі Иранмен байланыстарды көрсететін түрлер тән (Khudaikulova & Manmudova, n.d.).

Calligonum туысы 33 түрмен берілген, олардың 2-еуі қатаң эндемиктер (*C. squarrosum, C. zakirovii*). Кейбір түрлер Қарақұммен ортақ. *Eremurus, Gagea, Eremostachys, Paraeremostachys, Lagochilus, Psylliostachys, Scrophularia, Convolvulus, Lappula, Beruniella, Cleome, Valerianella, Bryonia* туыстарында жекелеген эндемдер тіркелген (Sakhranavard et al., 2010).

Солтүстік-батыс Қызылқұмның өсімдік жамылғысы жеткілікті деңгейде зерттелмеген. Оны зерттеуде В. А. Бурыгиннің, И. И. Гранитовтың, В. П. Дробовтың, К. З. Закировтың, Е. П. Коровиннің, А. М. Мұзафаровтың, Ф. Н. Русановтың еңбектері маңызды рөл атқарды (Shomurov, 2011).

Бұл аумақтың флорасы мен өсімдік жамылғысы туралы жинақталған мәліметтер «Қарақалпақстанның жоғары сатыдағы өсімдіктерінің анықтауышында» (О. Н. Бондаренко, 1964) және «Өзбекстанның өсімдік жамылғысы» (1971, 1973) монографиясында келтірілген (Khasanov et al., 2011).

Зерттеу нысандары мен әдістері

Геоботаникалық сипаттамалар Л.Г. Раменскийдің (1938), А.П. Щенниковтың (1938), В.Н. Сукачевтың (1944), Е.М. Лавренконың (1959) әдістемелік нұсқаулықтарын пайдалана отырып жүргізілді (Ortiqova & Mahmudov, 2018).

Өсімдік түрлері арасындағы сандық қатынастарды (молшылығы, жамылғысы және кездесімділігі) анықтау Друде жүйесі бойынша көзбен шамалау әдісімен жүргізілді. Проективтік жамылғы 1 м² көлемінде салынған есептік рамкада тексеріліп, онда әрбір түрдің алып жатқан ауданы анықталды. Ең тән түрлердің проекциясы арнайы бланкіге түсіріліп белгіленді.

Өсімдіктер саны мен олардың жерүсті биомассасын есепке алу Д. Брауның (1937) трансектілік әдісі бойынша жүргізілді, бұл әдіс шөл өсімдіктеріне қатысты Н.Т. Нечаева (1957) тарапынан нақтыланған (Shomurodov & Khasanov, 2014).

Солтүстік-Батыс Қызылқұмдарда тіркелген өсімдік түрлерінің жүйелік тізімі, сондай-ақ өсімдіктердің атаулары мен олардың синонимдері А.Л. Тахтаджянның (1966) филогенетикалық жүйесі бойынша, С.К. Черепанов құрастырған КСРО флорасына енгізілген толықтырулар мен өзгерістер жинағын ескере отырып берілді (Karinchayev et al., 2020).

Жұмыстың негізгі материалдарын әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің (ҚазҰУ) гербарий қорларында, ҚР ЭТРМ Ботаника және фитоинтродукция институтында, Өзбекстан Республикасы Ғылым академиясының Ботаника институтында (TASH) сақталған гербарий материалдары құрады. Сонымен қатар электрондық ресурстар пайдаланылды: Plantarium (https://www.plantarium.ru/), GBIF (https://www.gbif.org/ru/), POWO (https://powo.science.kew.org/).

Зерттеу нәтижелері және оларды талдау

Асқабақ тұқымдасы (*Cucurbitaceae*) – негізінен шөптесін шырмалғыш өсімдіктерді, сирек жағдайда бұталар мен ағаштарды қамтитын қосжарнақты өсімдіктердің ірі тұқымдасы. Тұқымдас құрамына шамамен 130 туыс және 900-ден астам түр кіреді.

Переступень (*Bryonia L.*) туысы Асқабақ тұқымдасына (*Cucurbitaceae L.*) жатады.

POWO деректеріне сәйкес, дүниежүзінде *Bryonia* туысының 13 түрі белгілі. Қазақстан аумағында 3 түрі таралған: *Bryonia melanocarpa* Nabiev, *Bryonia alba* L. және *Bryonia dioica* Jacq. (Shuyskaya et al., 2012). Олардың ішінде ғылыми әдебиеттерде геоботаникалық және биологиялық ерекшеліктері түрғысынан ең аз зерттелген түр – *Bryonia melanocarpa* Nabiev.

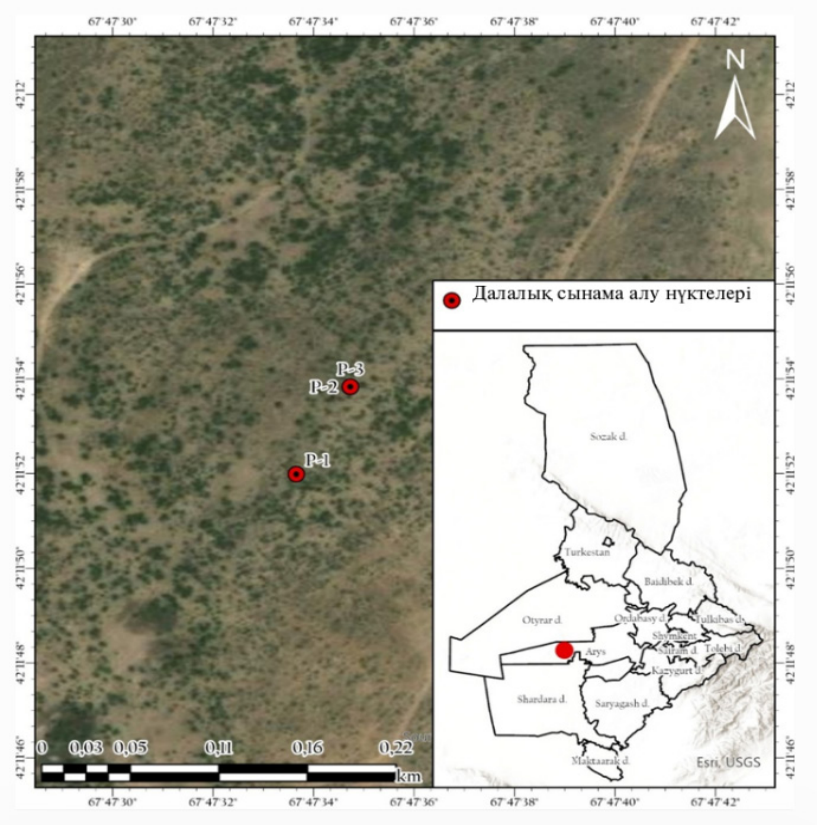
Оның қуаң аймақтардағы тіршілік ету жағдайларын бағалау қазіргі таңда өзекті ғылыми міндеттердің бірі болып табылады.

Зерттеуіміздің негізгі нысаны – Түркістан облысындағы Байырқұм елді мекенінің оңтүстік-батысында орналасқан Қызылқұм шөлінің учаскесі. Зерттеу учаскесінің GPS-координаттары: 42.19.7774 : 67.79.2682 (1-сурет).

Табиғи таралу ареалы бойынша түр Орталық Еуропа елдерінде – Ресей, Кипр, Франция, Венгрия және Болгарияда; Орталық Азия елдерінде – Тәжікстан, Түрікменстан, Өзбекстан, Қазақстан, Қырғызстан, Пәкістан және Түркияда; сондай-ақ басқа шетел мемлекеттерінде – Португалия, Марокко, Ұлыбритания, Франция, Нидерланд, Румыния және Швейцарияда кездеседі.

1-сурет

Bryonia melanocarpa Nabiev түрінің дүниежүзі бойынша таралу картасы



Интродукцияланған аймақтарына Балтық жағалауы елдері, Калифорния, Дания, Финляндия, Гавайи, Айдахо, Ирландия, Монтана, Нью-Джерси, Норвегия, Швеция, Юта және Вашингтон жатады.

Зерттеу барысында *Bryonia melanocarpa* сирек кездесетін өсімдік түрі болғандықтан және Қазақстан аумағында оған қатысты толық гербарийлік материалдар бұрын болмағандықтан, шетелдік электрондық гербарийлерден тиісті деректер анықталды (1-кесте) (Seregin, 2025).

Bryonia melanocarpa – сирек кездесетін, реликті және дерлік эндем түр, Қазақстанның Қызыл кітабына II санаттағы мәртебемен енгізілген (2-сурет). Бұл дәрілік өсімдік генофондты сақтауда маңызды рөл атқарады.

1-кесте

Қазақстан аумағынан талданған гербарийлік үлгілердің тізімі

№	Таралу аймағы және экологиясы	Гербарий үлгісі	Жиналған күні	Авторлары
1	Чардарадан 2 км қашықтықтағы құмдар	TASH	17.04.1981	Сафралиева, Набиев
2	Оңтүстік Қызылқұм, Чардара совхозы, Коканбай құдығы маңындағы колония	TASH	28.05.1971	Введенский, Набиев
3	Оңтүстік Қызылқұм. Чардара совхозының орталығынан 80 км қашықтықта, Коканбай құдығы маңындағы колония	TASH	28.05.1971	Ашурметов, Норматов
4	Оңтүстік Қызылқұм. Совхоз орталығынан оңтүстік-батысқа қарай 90 км, Куканбай құдығы маңындағы колония	TASH	27.05.1971	Ашурметов, Норматов
5	Оңтүстік Қызылқұм. Совхоз орталығынан оңтүстік-батысқа қарай 80–85 км, Куктасқұдық маңындағы колония	TASH	29.05.1971	Ашурметов, Норматов
6	Қызылқұм, Дөкей және Баймұрат елді мекендерінің аралығы	MW	15.04.1986	М.Г. Пименов, Е.В. Клюйков, М.Г. Васильева, С. Мелибаев
7	Арыс, Түркістан өңірі, Қазақстан (GPS: 42.19.7774 : 67.79.2682)	AA	28.04.2025	Адилова К.Ж., Ибрагимов Т.С.

Өсімдік – көпжылдық лиана тәрізді шөптесін өсімдік. Тамыры қуатты, қысқа тармақталған, ұзындығы 75 см-ге, жуандығы 15–30 см-ге дейін жетеді, салмағы 27 кг-ға дейін болады. Тамыр мойнынан ұзындығы 2–4 м-ге дейін жететін, басқа өсімдіктерге ілінуге бейімделген 25-ке дейін сабақ түзіледі. Сабақтары көп санды, қырлы, сирек қылшықты.

Жапырақтары бесбұрышты пішінді, терең тілімделген; жоғарғы жапырақтары ұсақ, ортаңғы бөлімі созылыңқы. Аталық гүлдері қысқа гүлсағақтарда орналасады, күлтесі жасылдау-сары түсті, тығыз безді түктермен қапталған. Төменгі гүлшоғырларында аталық гүлдер, ортаңғы бөлігінде қосжыныстыгүлдер, ал жоғарғы бөлігінде аналық гүлдер орналасады. Жемісі – шар тәрізді, жасылдау-қара түсті жидек. Тұқым арқылы көбейеді. Гүлденуі мамыр–маусым айларында, жемістенуі маусым–шілде айларында жүреді.

Өсімдік Қызылқұм шөлінде (Сырдария өзені маңы), Айдаркөл маңындағы құмдарда және Шардара өңірінде кездеседі. Қазақстанда Қызылорда облысының Арал, Қазалы, Қармақшы, Жалағаш, Шиелі және Жаңақорған аумақтарында таралған. Өзбекстанда Науаи және Жизақ облыстарында кездеседі (3-сурет). Негізінен сексеуіл мен жүзгін өсетін бекіген құмдарда тіршілік етеді. Дәрілік шикізат ретінде өсімдікті тамырымен қазып алу салдарынан популяция саны азаюда.

Ботаникалық білімнің дамуымен өсімдіктердің тіршілік формаларын жүйелеудің маңызы артты. Қазіргі ғылыми әдебиеттерде өсімдіктердің тіршілік формаларын сипаттаудың бірнеше негізгі тәсілі ажыратылады: физиономиялық (Humboldt, 1806; Kerner, 1863), биологиялық-морфологиялық (De Candolle, 1818), биологиялық-экологиялық-физиологиялық (Warming, 1896; Raunkiaer, 1905, 1918) және эфаморфтық (Warming, 1896; Krause, 1891) бағыттар.

Физиономиялық тәсілде тіршілік формаларын сипаттаудың негізіне өсімдіктердің тек сыртқы бейнесі алынса, биологиялық-морфологиялық принципте өсімдіктің тіршілік ұзақтығы, сабақтары мен өркендерінің сүректену сипаты және т.б. маңызды биологиялық ерекшеліктері ескеріледі. Тіршілік формаларын биологиялық-экологиялық-физиологиялық принцип бойынша жіктеуде негізгі белгілерге өсімдіктің мекен ету ортасының сипаты, тіршілік кезеңінің ұзақтығы, өркендердің даму циклі, көбею және қоректену тәсілдері жатады. Аталған жүйелерге егжей-тегжейлі талдау В.Н. Голубов (1962), Б.А. Келлер (1938), М.В. Сенянинова-Корчагина (1949), И.Г. Серебряков (1954) және басқа зерттеушілердің еңбектерінде келтірілген (Rozikova et al., 2020).

2-сурет
Bryonia melanocarpa Nabiev түрінің толық габитусы





Қызылқұмның оңтүстік-шығыс бөлігіндегі өсімдік жамылғысының қазіргі жағдайына жалпы сипаттама беру үшін өсімдіктердің тіршілік формаларын, олардың табиғи жағдайдағы өсуі мен даму ұзақтығын білу қажет.

Өз зерттеу материалдарымызды баяндауға кіріспес бұрын, тіршілік формалары туралы негізгі тұжырымдарға тоқталайық.

Өсімдіктердің тіршілік формаларын Н.Т. Нечаева (1957), Е.М. Рачковская (1957) және т.б. зерттеген. Орта Азия мен Қазақстанның шөлді аймағындағы өсімдіктердің тіршілік формалары Е.П. Коровин (1935), А.В. Прозоровский (1936, 1940), А.Б. Быков (1949), Л.Е. Родин (1961), М.Г. Рустамов (1962), В.А. Бурыгин (1963), К.З. Закиров (1955), И.И. Гранитов (1964), Н.Т. Нечаева (1957) және басқа ғалымдардың еңбектерінде сипатталған (Voronin et al., 2019).

Зерттеліп отырған аумақтың өсімдік жамылғысы айқын «шөлдік» сипатқа ие болғандықтан, өсімдіктерді тіршілік формалары бойынша сипаттау үшін Н.Т. Нечаева (1957) ұсынған ықшамдалған жүйені пайдалануға болады.

Жүргізілген зерттеулер барысында *Bryonia melanocarpa* Nabiev түрінің үш популяциясы анықталды.

1-популяция (GPS: 42.198287/67.792981). Қызылқұмның оңтүстік аудандарының флорасы ксерофиттенудің жоғары дәрежесімен, шөл және шөлейт түрлерінің едәуір үлесімен, сондай-ақ аумақтың Сахара–Гоби шөлді облысына және Иран–Түран ішкі облысына жатуына байланысты қалыптасқан өзіндік ерекшеліктерімен сипатталады.

Аймақ флорасы негізінен Иран–Түрандық сипатқа ие, бұл Түран және Орталық Азия ареалдарына жататын түрлердің басым болуымен расталады. Географиялық элементтер арасында келесі топтар ерекшеленеді:

Иран–Түрандық түрлер – ең көп санды категория. Оларға *Astragalus*, *Ferula*, *Haloxylon*, *Suaeda* туыстарының өкілдері жатады. Солтүстік және оңтүстік Түрандық топтар құмды шөлдерге тән түрлерден тұрады. Жероратеңіздік түрлер негізінен арамшөптік және малазықтық біржылдық өсімдіктермен ұсынылған. Космопо-

литтік және голарктикалық түрлер сирек кездеседі және флораның қосалқы элементін құрайды, мысалы, *Chenopodium album* және *Plantago indica*.

Өсімдік жамылғысының құрылымында гемикриптофиттер, хамефиттер және терофиттер басым. Бұл өсімдіктердің аса қуаң жағдайларға, жоғары күн радиациясына және тәуліктік температураның күрт ауытқуына бейімделуін көрсетеді.

Бірінші популяцияның деректері бойынша флора құрамынан 20 тұқымдасқа және 38 туысқа жататын 45 өсімдік түрі анықталды.

Жиынтық деректерге сәйкес флораның таксономиялық байлығы мен жалпы құрылымы Қызылқұмның оңтүстік аумақтарының флорасы 30-дан астам тұқымдастың өкілдерін және біржылдық эфемерлерден көпжылдық бұталар мен ағаштарға дейінгі өсімдік түрлерінің кең спектрін қамтитынын көрсетеді.

Түр саны бойынша жетекші тұқымдастарға мыналар жатады: Chenopodiaceae (33,3%) – шөл өсімдіктері жамылғысының негізгі құрылым түзушілері, олардың құрамында *Anabasis*, *Salsola*, *Atriplex*, *Haloxylon*, *Suaeda* туыстары бар; Fabaceae (13,3%) – шөлдік өсімдіктердің көп санды тобы, оның құрамында *Psoralea drupacea*, *Astragalus alopecias*, *Astragalus globiceps* кездеседі; Apiaceae (8,8%), сондайақ Brassicaceae, Caryophyllaceae, Poaceae тұқымдастары эфемерлер, эфемероидтар және ксерофиттердің сан алуан топтарымен сипатталады.

Таксономиялық құрылым Тұран шөл флорасына тән белгілерді көрсетеді: ежелгі реликтілік формалардың, мысалы, *Ephedra lomatolepis*, және қазіргі жағдайларға жоғары дәрежеде бейімделген ксерофиттердің, мысалы, *Haloxylon persicum* және *Anabasis eriopoda*, қатар кездесуі байқалады.

Биоморфологиялық спектр және өсімдіктердің тіршілік формаларының бейімделу стратегиялары аймақтың экологиялық ерекшеліктерімен анықталады. Зерттеліп отырған флорада біржылдық өсімдіктер басым болып, түрлік байлықтың жартысына жуығын құрайды. Бұл көктемгі қысқа мерзімді ылғалдану жағдайларына бейімделген түрлер: *Roemeria hybrida*, *Ceratocephalus falcatus*, *Chenopodium album*, *Alyssum desertorum* және т.б. Бұл топ фитоценоздардың маусымдық динамикасында маңызды рөл атқарады.

Гемикриптофиттер (көпжылдық шөптесін өсімдіктер) – жаңару бүршіктерін топырақ деңгейінде сақтайтын, жиі кездесетін көпжылдық өсімдіктер. Оларға *Potentilla supina*, *Ferula foetida*, *Astragalus alopecias* жатады. Дәл осы өсімдіктер өсімдік қауымдастықтарының ұзақ мерзімді тұрақтылығын қамтамасыз етеді.

Хамефиттер мен нанофанерофиттер – Қызылқұмның оңтүстік бөлігіндегі өсімдік кешендерінің негізін құрайтын жартылай бұташықтар мен бұталар. Оларға *Calligonum*, *Anabasis*, *Salsola*, *Kraschenninnikovia*, *Haloxylon persicum* туыстарының өкілдері жатады. Бұл өсімдіктер қуатты тамыр жүйесімен, буланууды барынша азайтумен, тұзға төзімділігімен және жылжымалы құмдарда тіршілік ету қабілетімен ерекшеленеді.

Екінші популяцияның (GPS: 42.7198286 / 67.779298) Қызылқұмның оңтүстік бөлігіндегі флорасы Иран–Тұран шөлді облысына жатады және жоғары ксероморфтылығымен, айқын құрғақшылыққа төзімділігімен, сүректі өсімдіктердің сиректігімен, сондай-ақ ксерофитті бұталар, жартылай бұталар және эфемерлік біржылдық өсімдіктердің басым болуымен сипатталады. Алынған деректерге сәйкес, осы популяция аумағының флорасынан Magnoliophyta тобына жататын 17 тұқымдас пен 28 туысқа біріктірілген 36 өсімдік түрі анықталды. Олардың құрамында қосжарнақты және даражарнақты өсімдіктер бар.

Бұл аймақ Еуразияның аридті флорасының фитогеографиялық орталықтарының бірі ретінде сипатталады, сондықтан өсімдік түрлерінің басым бөлігінде шөл жағдайында ұзақ уақыт бойы жүріп келген эволюциялық үдерістермен байланысты ежелгі бейімделу белгілері сақталған.

Қызылқұм шөлінің флорасы аридті климаттың, жоғары температураның және топырақ ылғалының тапшылығының әсерінен қалыптасады. Сондықтан мұндағы өсімдіктердің тіршілік формалары шектен тыс қуаң жағдайларға ұзақ уақыт бойы бейімделудің нәтижесі болып табылады.

Зерттеліп отырған флорада келесі географиялық элементтер ажыратылады: Иран–Тұрандық, Тұран эндемиктері, Тұран–Орталықаз иялық, Жерортатеңіздік, Палеарктикалық және Қаратеңіз–Қазақстандық түрлер (3-сурет).

3-сурет
Оңтүстік Қызылқұм флорасының географиялық элементтері



Раункиер өсімдіктердің тіршілік формаларын жаңару бүршіктерінің орналасу жағдайына қарай жіктейді. Қызылқұм флорасында негізінен келесі топтар кездеседі.

Терофиттер (40–45%) – біржылдық өсімдіктер. Оларға *Delphinium songaricum*, *Holosteum polygamum*, *Alyssum desertorum*, *A. heterotrichum*, *Paracaryum bungei*, *Rochelia retorta*, *Cousinia erectispina*, *Eremopyrum triticeum* жатады. Бұл өсімдіктер ерте көктемгі жасыл азықтың қалыптасуына және топырақтағы тұқым қорының толықтырылуына ықпал етеді.

Гемикриптофиттер (45%) – жаңару бүршіктері топырақ бетіне жақын орналасатын көпжылдық өсімдіктер. Оларға *Ranunculus pinnatisectus*, *Anabasis salsa*, *A. eriopoda*, *Rheum nanum*, *Artemisia turanica*, *A. terrae-albae*, *Nepeta micrantha*, *Eremostachys paniculata*, *Stipa sareptana*, *Allium deserticolum* жатады.

Бұл өсімдік түрлері ұзын тамыр жүйесі мен жапырақтарының ксероморфтық құрылымының арқасында құрғақшылық жағдайларына жақсы бейімделген. Олар өсімдік жамылғысының тұрақтылығын қамтамасыз етеді, құмдарды бекітеді және жайылымдардың өсімдік жамылғысының негізін қалыптастырады.

Фанерофиттер (10%) – бұталар мен бұташықтар. Оларға *Calligonum sguarrosum*, *C. kyzylkumi*, *Tamarix ramosissima* және ішінара фанерофиттерге жақын *Astragalus macrocladus* жатады.

Хамефиттер (3–5%) – аласа бойлы жартылай бұташықтар. Бұл топқа *Astragalus macrocladus* және кейбір *Artemisia* түрлері жатады.

Геофиттер (эфемероидтар – 3%) – *Poa bulbosa* типтік эфемероид, ал *Gagea parva* – пиязшықты геофит.

Осылайша, зерттелген флора ірі құмды алқаптарға тән ксеро-гало-псаммофиттік кешенді құрайды.

Үшінші популяция (GPS: 42.7198287 / 67.7792981) зерттелген учаскесінің флорасы Оңтүстік Қазақстан мен Орталық Азияның шөлді ландшафттарына тән Тұрандық–Ирандық аридті флоралық кешенге жатады. Алынған деректерге сәйкес, осы популяция аумағының флорасында 28 туыс пен 17 тұқымдасқа жататын жабықтұқымды өсімдіктердің 30 түрі тіркелді.

Флора құрамынан 17 тұқымдас анықталды. Олардың арақатынасы шөл флорасының өзіндік ерекшелігін көрсетеді. Түрлік құрамы бойынша ең бай тұқымдас – шөл өсімдіктері жамылғысының негізгі доминанттарының бірі

Chenopodiaceae, оның құрамында 7 түр (23,3%) бар: *Chenopodium*, *Atriplex*, *Corispermum*, *Salsola*, *Anabasis*, *Haloxylon* туыстары. Brassicaceae тұқымдасы 3 түрмен (10%) ұсынылған: *Isatis*, *Leptaleum*, *Cardaria*. Бұл тұқымдаста біржылдық эфемерлер басым. Polygonaceae (*Calligonum*, *Rheum*), Fabaceae (*Astragalus flexus*, *A. filicaulis*), Boraginaceae (*Heliotropium*, *Myosotis*) және Plantaginaceae (*Plantago tenuiflora*, *P. indica*) тұқымдастарының әрқайсысында 2 түрден (6,6%) анықталды.

Раункиер жүйесі бойынша талданған флорада келесі тіршілік формалары анықталды.

Терофиттер (45%) – *Chenopodium album*, *Salsola australis*, *Isatis minima*, *Leptaleum filifolium*, *Astragalus filicaulis*, *Galium aparine*, *Myosotis sparsiflora*, *Plantago tenuiflora*, *Plantago indica*, *Thuspeinantha persica*.

Гемикриптофиттер (35%) – *Arenaria asiatica*, *Atriplex cana*, *Anabasis aphylla*, *Rheum turkestanicum*, *Euphorbia seguieriana*, *Astragalus flexus*, *Heliotropium argusioides*, *Cistanche flava*, *Inula sabuletorum*, *Allium sabulosum*.

Аласа бойлы жартылай бұташықтар – хамефиттер (5%): *Corispermum papillosum*, *Salsola arbuscula* (4-сурет).

4-сурет

Флоралық деректер жиынтығындағы тіршілік формаларының Раункиер жүйесі бойынша таралуы



Қызылқұмның оңтүстік бөлігінде жүргізілген геоботаникалық зерттеулер барысында үш популяцияның фитоценотикалық сипаттамасы негізінде *Bryonia melanocarpa* Nabiev түрі кездесетін 25 га аумақтың жалпы флоралық сипаттамасы жасалды.

Негізгі өсімдік түрлерінің тіршілік формалары бойынша топтарға бөліну сипаты төмендегідей.

Ағаштар. Зерттеліп отырған аумақта жерүсті мүшелерінің пішіні мен қуаттылығы, сондай-ақ өсіп-өну жағдайлары бойынша ерекшеленетін ағаштардың екі тобы айқын ажыратылады.

Бірінші топқа Амудария аңғарының, қазіргі атырауы мен жайылмасының мезоксерофитті тоғайларында өсетін түрлер жатады: *Salix*, *Populus*, *Elaeagnus turcomanica*, *E. orientalis*. Олар, әдетте, интразоналық өсімдіктер болып табылады және олардың тіршілігі Сырдария өзенінің су ағыны режиміне тікелей байланысты.

Екінші топты шөлдің қуаң топырақтық-климаттық жағдайларына бейімделген аласа бойлы

шөл ағаштары құрайды. Бұл топқа *Haloxylon persicum*, *H. aphyllum*, *Ammodendron conollyi*, *A. karelinii*, *A. longiacemosum*, *Calligonum eriopdium*, *C. acanthopterum*, *C. arborescens* түрлері жатады. Олардың басым көпшілігі псаммофиттер болып табылады. Тек екі түр – *H. aphyllum* сортаңды және гипстенген топырақтарда өседі. Шөлдік ағаштардың псаммофиттік формаларының ішінде құянсүйектер дамыған борпылдақ құмдарда, ал жүзгіндер бұдырлы және жалды құмдарда өседі; дәл осындай жағдайларда парсы сексеуілі де кездеседі. Аталған ағаш түрлері шөл ландшафтарының эдификаторлары болып табылады.

Бұталар кең экологиялық диапазонымен ерекшеленеді. Олардың арасында мезофиттер, псаммофиттер және галофиттер кездеседі. Мысалы, жүзгіндер тобында *Calligonum junceum* типтік гипсофит болып табылады, ал қалған түрлер негізінен псаммофиттерге жатады. Бұдырлы және жалды құмдардың беткейлері мен көтеріңкі бөліктерінде жиі кездесетін түрлердің бірі – қызғылт жүзгін *Calligonum rubens*, ол тамырсабақ арқылы көбейетін бұта болып табылады. Барлық жүзгіндер сияқты, оның да топыраққа терең енетін және тығынды жабынмен қорғалған қуатты қосалқы тамырлары бар. Бұл ерекшелік өсімдікке желдің әсеріне төтеп беруге және әртүрлі құмды мекен ету орталарында өсуге мүмкіндік береді.

Сырдарияның орта ағысында *Tamarix pentandra*, *T. elongata*, *T. florida*, *T. hispida* түрлерінен тұратын бұталы тоғайлар таралған. Типтік бұталы галофиттердің ішінен қарабарақты (*Halostachys belangeriana*) атап өтуге болады.

Бұташықтар зерттеліп отырған аумақта бар болғаны 4 түрмен ұсынылған: *Suaeda physophora*, *Kalidium caspium*, *Ephedra distachya*, *Astragalus willissimus*. Олар экологиялық түрғыдан әркелкі. Бірінші түр гипсофит-псаммофиттерге жатады, ал екінші және үшінші түрлер тасты-гипсті, құмдақтанған мекен ету орталарында өсетін гипсофиттер болып табылады. Боялыш пен астрагал кең таралған және барлық жерде дерлік кездеседі, тек бекімеген жылжымалы құмдарда, тақырларда және сортаңдарда кездеспейді. *Ephedra distachya* солтүстік жағалаулық аймаққа тән, ал оңтүстік аудандарда сирек кездеседі.

Жартылай бұталар. Өсімдік жамылғысында жартылай бұталардың 30 түрі кездеседі, олардың 5 түрі эдификаторлар болып табылады: *Halocnemum strobilaceum*, *Salsola microphylla*, *Kalidium capsicum*, *Anabasis aphylla* және т.б. Олардың аумақта таралу сипаты бір-бірінен ерекшеленеді. Мысалы, қараған орташа дәрежеде галофиттік және мезофиттік қасиеттерге ие.

Жартылай бұташықтар зерттелген аумақта келесі эдификатор түрлермен ұсынылған: *Artemisia terrae-albae*, *Anabasis salsa*, *Convolvulus hammadae*, *Suaeda physophora*.

Шөптесін және көпжылдық өсімдіктер. Бұл топ 90 түрден тұрады, оның ішінде 50 түрі ұзақ уақыт вегетацияланатын өсімдіктер, 25 түрі эфемероидтар және 15 түрі екіжылдық өсімдіктер. Ұзақ вегетацияланатын шөптесін өсімдіктердің ішінде құмды алқаптар өсімдік жамылғысының эдификаторлары ретінде *Aristida karelinii*, *Ceratoides eversmanniana*, *Heliotropium arguzioides*, *Carex physodes*, *Ferula assa-foetida* ерекшеленеді.

Біржылдық шөптесін өсімдіктер. Біржылдық өсімдіктердің құрамында ерте жазғы вегетацияға жататын 105 түр, жазғы-күзгі вегетацияға жататын 75 түр және қысқы-көктемгі немесе көктемгі вегетацияға жататын 30 түр (эфемерлер) анықталған. Жиі кездесетін түрлерге *Polygonum aviculare*, *Ceratocarpus arenarius*, *Climacoptera lanata*, *Kochia schrenkiana*, *Suaeda confusa*, *Salsola paulsenii* жатады.

Эфемерлердің өсуі мен дамуының жалпы ұзақтығы 30–40 күнді құрайды. Сондықтан олардың өсімдік жамылғысындағы доминанттық және эдификаторлық рөлі айтарлықтай байқалмайды.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеу нәтижелері Қызылқұмның оңтүстік-шығыс бөлігіндегі өсімдік қауымдастықтарының Иран–Туран ішкі облысына тән аридті ландшафттарға тән тұрақты құрылымымен сипатталатынын және айқын ксерофиттік мамандану байқататынын нақты көрсетті. *Bryonia melanocarpa* Nabiev түрінің кеңістіктік жағынан оқшауланған жергілікті популяциялар түзетіні және олардың псаммофитті ағаш-бұталы формациялар басым болатын бекіген құмды алқаптарға орайласатыны анықталды. Түрдің таралу сипаты мен фитоценотикалық рөлі оның экологиялық амплитудасының тар екенін және антропогендік факторларға жоғары сезімталдығын айқын көрсетеді.

Зерттелген учаскелер флорасының таксономиялық және биоморфологиялық құрылымында Chenopodiaceae, Brassicaceae және Fabaceae тұқымдастарының басым болуы, сондай-ақ теро-

фиттер мен гемикриптофиттердің жетекші рөл атқаруы Орталық Азияның аридті экожүйелерінің үйымдасуына тән заңдылықтармен сәйкес келеді. Тіршілік формаларының Раункиер жүйесі бойынша жіктелуі анықталған фитоценоздардың ұзақ мерзімді аридтену үдерістеріне және жоғары температуралық стресс жағдайларына бейімделу тұрақтылығын растайды.

Алынған деректер *Bryonia melanocarpa* түрінің экологиялық оптимум аймақтарын нақтылауға, ксеро-псаммофитті қауымдастықтардың құрылымы туралы түсініктерді кеңейтуге және олардың ішкі гетерогенділік дәрежесін нақтылауға мүмкіндік береді. Тіршілік формалары мен таксондардың таралуында анықталған заңдылықтар шөл экожүйелерінің тұрақтылығын бағалау үшін маңызды және флораның сирек әрі осал элементтерін қорғауға бағытталған мақсатты шараларды әзірлеуге ғылыми негіз бола алады.

Bryonia melanocarpa түрінің таралу ареалының шектеулігі мен мекен ету жағдайларының ерекшелігін ескере отырып, одан әрі зерттеулер популяциялар динамикасына мониторинг жүргізуге, генетикалық әртүрлілігін бағалауға және антропогендік әрі климаттық әсердің күшеюі жағдайында түрді сақтаудың превентивтік стратегияларын әзірлеуге бағытталуы тиіс.

Авторлардың үлесі

Адилова К.Ж.: геоботаникалық талдау жүргізу,өсімдіктің өсу ортасын анықтау, әдістеме әзірлеу, зерттеу жүргізу, тұжырымдама жасау, мақаланың бастапқы нұсқасын жазу, мәтінді редакциялау және толықтыру; Ибрагимов Т.С.: геоботаникалық талдау жүргізу, өсімдіктің ортасын анықтау, бақылау, нәти желерді тексеру, геоботаникалық талдау жүргізу, мәтінді редакциялау және толықтыру; Койлыбаев Ж.: геоботаникалық талдау жүргізу, өсімдіктің таралу ортасын анықтау, әдістеме, өсімдік түрін анықтау; Кусниева А.Е.: өңдеу жұмыстарын жүргізу; Манкибаева С.А.: мәтінді редакциялау және толықтыру.

Әдебиеттер

Bazarbaeva, S., & Serekeeva, G. (2022). Kyzylkum sholinin endemik zhane sirek kezdesetin turleri [Endemic and rare species of the Kyzylkum Desert]. *Economy and Society, 98*(7), 172–174.

Benarba, B., & Belhouala, K. (2024). Bryonia L. (Cucurbitaceae) tuysy: Botanika, fitokhimiya, dasturli qoldanylysy zhane biologiyalyq belsendiligi boiynsha zhuyeli sholu [The genus Bryonia L. (Cucurbitaceae): A systematic review of its botany, phytochemistry, traditional uses, and biological activities]. *Sci, 6*(1), 7.

Isaev, M. I. (1995). Bryonia tuysynyn izoprenoidtary. I. Bryonia melanocarpa turinin pentatsikldik triterpendery men steroldary [Isoprenoids of the genus Bryonia. I. Pentacyclic triterpenes and sterols of Bryonia melanocarpa]. *Chemistry of Natural Compounds, 31*, 336–341.

Jeffrey, C. (1969). Bryonia L. (Cucurbitaceae) tuysyna sholu [A review of the genus Bryonia L. (Cucurbitaceae)]. *Kew Bulletin, 23*(3), 441–461.

Karinchayev, A. K., Yuldashbayev, Yu. A., & Baimukanov, D. A. (2020). Kyzylkum sholinin ontustik boligindegi zhayylymdyk malazyktarga ekologiyalyq monitoring zhurgyzu [Environmental monitoring of pasture forage in the southern part of the Kyzylkum Desert]. *Agrarian Science, 3*(3), 56–59.

Khasanov, F. O., Shomuradov, Kh. F., & Kadyrov, G. (2011). Kyzylkum sholi florasynyn endemizminin qysqasha ocherki zhane taldauy [A brief overview and analysis of endemism in the flora of the Kyzylkum Desert]. *Botanical Journal, 96*(2), 237–245.

Khudaikulova, N., & Manmudova, M. (n.d.). Tashkent botanikalyk bagynda osiretin zhane “Qyzyl kitapqa” engizilgen osimdikter [Plants cultivated in the Tashkent Botanical Garden and included in the Red Book]. *Uzbekistan Agricultural Science Bulletin, 60*.

Kumar, S., Maadan, R., Gahlot, K., & Sharma, A. (2008). Bryonia tuysyna sholu [A review of the genus Bryonia]. *Pharmacognosy Reviews, 2*(4), 392.

Ortiqova, L. S., & Mahmudov, M. M. (2018). Kyzylkum sholinin sortandy zhayylymdaryn zhaksylaudyng perspektivaly fitomelioranttaryn tandau [Selection of promising phytomeliorants for improving saline pastures in the Kyzylkum Desert]. *Bulletin of Science and Practice, 4*(5), 147–152.

Rozikova, D. A., Sobirov, M. M., Khamdamova, Sh. Sh., & Kodirova, G. O. (2020). Kyzylkum ken ornynyn termiyalyk kontsentraty, KAS zhane kaliy khloridi negizinde keshendi tyngaitqysh ondiru [Production of complex fertilizers based on thermal concentrate from the Kyzylkum deposit, UAN, and potassium chloride]. In *Fundamental and Applied Research in Science and Education* (pp. 54–57).

Sakhranavard, S., Nagibi, F., Siems, K., & Jennett-Siems, K. (2010). Bryonia aspera turinen alyngan zhana cucurbitane-tipti triterpenoidtar [New cucurbitane-type triterpenoids from Bryonia aspera]. *Planta Medica, 76*(10), 1014–1017.

Seregin, A. (2025). *Moskva universitetinin gerbariyi (MW): 1.389-nusqa [Moscow University Herbarium (MW): Version 1.389]* [Data set]. M. V. Lomonosov Moscow State University. https://doi.org/10.15468/cpnhcc. Accessed via GBIF on July 2, 2025: https://www.gbif.org/occurrence/1799049635

Shomurodov, Kh. F., & Khasanov, F. O. (2014). Kyzylkum sholinin malazyk osimdikteri [Fodder plants of the Kyzylkum Desert]. *Arid Ecosystems, 20*(3), 94–101.

Shomurov, Kh. (2011). Kyzylkum sholinin ziyandy zhane uly osimdikteri [Harmful and poisonous plants of the Kyzylkum Desert]. In *Possibilities for improving Ashgabat's water supply using fresh groundwater from the Firuza deposit* (p. 28).

Shuyskaya, E. V., Gismatullina, L. G., Toderich, K. N., Voronin, P. Yu., & Soldatova, N. V. (2012). Kyzylkum sholindegi topyraq tuzdylygy gradienti boiynsha Haloxylon aphyllum (Chenopodiaceae) turinin genetikalyq differentsiatsiyasy [Genetic differentiation of Haloxylon aphyllum (Chenopodiaceae) along a soil salinity gradient in the Kyzylkum Desert]. *Ecology,* (4), 284.

Toremuratov, U. (1978). *Soltustik-batys Kyzylkumdyn osimdik zhamylgysy [Vegetation cover of northwestern Kyzylkum]*.

Voronin, P. Yu., Shuyskaya, E. V., Toderich, K. N., Rajabov, T. F., Ronzhina, D. A., & Ivanova, L. A. (2019). Kyzylkum sholindegi topyraq tuzdylygy profili boiynsha Chenopodiaceae tuqymdasynyn C4-osimdikterinin taraluy [Distribution of C4 plants of the family Chenopodiaceae along a soil salinity profile in the Kyzylkum Desert]. *Plant Physiology, 66*(3), 189–197.

Авторлар туралы мәлімет:

Адилова Кульвира Жарылкасыновна (хат-хабарға жауапты автор) – техника ғылымдарының магистрі, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті ботаника және агроэкология кафедрасының PhD докторанты (Алматы, Қазақстан, e-mail: kulvira75@mail.ru).

Койлыбаев Жасұлан – педагогика ғылымдарының магистрі, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті ботаника және агроэкология кафедрасының PhD докторанты (Алматы, Қазақстан, e-mail: k.zhassulan1988@gmail.com).

Кусниева Алия Еркеновна – химия ғылымдарының кандидаты, С. Ж. Асфендияров атындағы Қазақ ұлттық медицина университеті инженерлік пәндер және тиісті практикалар кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Алматы, Қазақстан, e-mail: a.kusnieva@mail.ru).

Манкибаева Сандугаш Аманжоловна – педагогика ғылымдарының магистрі, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті зоология, гистология және цитология кафедрасының аға оқытушысы (Алматы, Қазақстан, e-mail: mankibaevasandugash@gmail.com).

Information about the authors:

Adilova Kulvira Zharylkasynovna (corresponding author) – Master of Technical Sciences, PhD student at the Department of Botany and Agroecology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: kulvira75@mail.ru).

Koylybaev Zhassulan – Master of Pedagogical Sciences, PhD student at the Department of Botany and Agroecology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: k.zhassulan1988@gmail.com).

Kusnieva Aliya Erkenovna – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor at the Department of Engineering Disciplines and Related Practices, Asfendiyarov Kazakh National Medical University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: a.kusnieva@mail.ru).

Mankibaeva Sandugash Amanzholovna – Master of Pedagogical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Zoology, Histology and Cytology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: mankibaevasandugash@gmail.com).

Сведения об авторах:

Адилова Кулвира Жарылкасыновна (автор для корреспонденции) – магистр технических наук, докторант PhD кафедры ботаники и агроэкологии Казахского национального университета имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: kulvira75@mail.ru).

Койлыбаев Жасулан – магистр педагогических наук, докторант PhD кафедры ботаники и агроэкологии Казахского национального университета имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: k.zhassulan1988@gmail.com).

Кусниева Алия Эркеновна – кандидат химических наук, доцент кафедры инженерных дисциплин и смежных практик Казахского национального медицинского университета имени С.Д. Асфендиярова (Алматы, Казахстан, e-mail: a.kusnieva@mail.ru).

Манкибаева Сандугаш Аманжоловна – магистр педагогических наук, старший преподаватель кафедры зоологии, гистологии и цитологии Казахского национального университета имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: mankibaevasandugash@gmail.com).

Келіп түсті: 05 ақпан 2026 жыл
Қабылданды: 25 қыркүйек 2026 жыл

ҒТАМР 34.15.59 https://doi.org/10.26577/EJE208831126

Б. Дулат[1, 2], Р.Т. Кенжебекова[1], З.К. Даирбекова[1],
А.Н. Махамбетов[1], А.О. Сағитов[1,2], Д.А. Гриценко[1,2*]

[1] Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институты, Алматы, Қазақстан
[2]«AgriBioTech» зерттеу орталығы, Алматы, Қазақстан
*e-mail: d.kopytina@gmail.com

ҚАЗАҚСТАННЫҢ ОҢТҮСТІГІНДЕГІ ИНВАЗИЯЛЫҚ ЗИЯНКЕС *TUTA ABSOLUTA*-НЫҢ ЭКОЛОГИЯСЫ ЖӘНЕ МОЛЕКУЛАЛЫҚ ИДЕНТИФИКАЦИЯСЫ

Tuta absoluta (Meyrick, 1917) – алқа тұқымдас дақылдардың, әсіресе қызанақтың, ең қауіпті инвазиялық зиянкестерінің бірі болып табылады және ауыл шаруашылығы өндірісіне әлемдік деңгейде елеулі қауіп төндіреді. Соңғы жылдары бұл түрдің Орталық Азия аумағында жылдам таралуы байқалуда, алайда Қазақстандағы оның экологиясы мен молекулалық идентификациясына қатысты деректер әлі де шектеулі. Осы зерттеуде ДНҚ-баркодинг әдістерін пайдалана отырып, Қазақстанның оңтүстігіндегі *T. absoluta* түрінің таралуы мен экологиялық үлестірілуі зерттелді. Имаго және дернәсіл сынамалары бірнеше оңтүстік өңірлердегі қызанақ агроэкожүйелерінен жиналды. Молекулалық идентификация жәндіктерді баркодтауда стандартты маркер болып саналатын митохондриялық цитохром-с-оксидаза I субъбірлігінің (COI) гені негізінде жүргізілді. Алынған тізбектер халықаралық дерекқорлардағы *T. absoluta* референстік тізбектерімен жоғары деңгейде ұқсастық көрсетті, бұл жиналған сынамалардың түрлік тиесілігін растады. Зерттеу нәтижелері Қазақстанның оңтүстігінде *T. absoluta* популяцияларының тұрақты қалыптасқанын көрсетеді және тұрақты мониторинг пен тиімді фитосанитарлық басқару стратегияларын әзірлеудің маңыздылығын айқындайды. ДНҚ-баркодинг инвазиялық жәндік-зиянкестерді дәл анықтауға мүмкіндік беретін сенімді құрал болып табылады және оларды ерте анықтау мен мониторинг жүйелерін жетілдіруге ықпал ете алады.

Түйін сөздер: *Tuta absoluta*, ДНҚ-баркодинг, COI гені, инвазиялық зиянкес, фитосанитарлық мониторинг.

B. Dulat[1, 2], R.T. Kenzhebekova[1], Z.K. Dairbekova[1],
A.N. Makhambetov[1], A.O. Sagitov[1,2], D.A. Gritsenko[1,2*]

[1]Institute of Plant Biology and Biotechnology, Almaty, Kazakhstan
[2]«AgriBioTech» Research Center, Almaty, Kazakhstan
*e-mail: d.kopytina@gmail.com

Ecology and molecular identification of the invasive pest *Tuta absoluta* in southern Kazakhstan

Tuta absoluta (Meyrick, 1917) is one of the most destructive invasive pests of solanaceous crops, particularly tomato, posing a serious threat to agricultural production worldwide. In recent years, the rapid expansion of this species has been reported in Central Asia; however, data on its ecology and molecular identification in Kazakhstan remain limited. In this study, we investigated the occurrence and ecological distribution of *T. absoluta* in southern Kazakhstan using DNA barcoding approaches. Adult moths and larvae were collected from tomato agroecosystems across several southern regions. Molecular identification was performed using the mitochondrial cytochrome c oxidase subunit I (COI) gene, a standard marker for insect barcoding. The obtained sequences showed high similarity to reference *T. absoluta* sequences available in international databases, confirming the species identity of the collected specimens. Our results indicate the establishment of stable *T. absoluta* populations in southern Kazakhstan and highlight the urgent need for continuous monitoring and the development of effective phytosanitary management strategies. The application of DNA barcoding provides a reliable tool for accurate pest identification and can support early detection and surveillance systems for invasive insect species.

Key words: *Tuta absoluta*, DNA barcoding, COI gene, invasive pest, phytosanitary monitoring.

 © 2026 Al-Farabi Kazakh National University

Б. Дулат[1, 2], Р.Т. Кенжебекова[1], З.К. Даирбекова[1],
А.Н. Махамбетов[1], А.О. Сагитов[1, 2], Д.А. Гриценко[1, 2*]
[1]Институт биологии и биотехнологии растений, Алматы, Казахстан
[2]Научно-исследовательский центр «AgriBioTech», Алматы, Казахстан
*e-mail: d.kopytina@gmail.com

Экология и молекулярная идентификация инвазивного вредителя *Tuta absoluta* на юге Казахстана

Tuta absoluta (Meyrick, 1917) – один из наиболее разрушительных инвазивных вредителей паслёновых культур, особенно томатов, представляющий серьёзную угрозу для сельскохозяйственного производства во всём мире. В последние годы отмечается быстрое распространение этого вида в Центральной Азии; однако данные о его экологии и молекулярной идентификации в Казахстане остаются ограниченными. В данном исследовании мы изучили распространение и экологическое распределение *T. absoluta* в южном Казахстане с использованием методов ДНК-баркодинга. Взрослые бабочки и личинки были собраны в томатных агроэкосистемах нескольких южных регионов. Молекулярная идентификация проводилась с использованием митохондриального гена субъединицы I цитохром-с-оксидазы (COI), стандартного маркера для энтомологического баркодинга. Полученные последовательности показали высокое сходство с эталонными последовательностями *T. absoluta*, доступными в международных базах данных, что подтверждает видовую принадлежность собранных образцов. Наши результаты указывают на формирование стабильных популяций *T. absoluta* в южном Казахстане и подчеркивают острую необходимость непрерывного мониторинга и разработки эффективных стратегий фитосанитарного контроля. Применение ДНК-баркодинга представляет собой надежный инструмент для точной идентификации вредителей и может способствовать системам раннего обнаружения и мониторинга инвазивных видов насекомых.

Ключевые слова: *Tuta absoluta*, ДНК-баркодинг, ген COI, инвазивный вредитель, фитосанитарный мониторинг.

Кіріспе

Инвазиялық жәндік түрлерінің қарқынды таралуы жаһандық ауыл шаруашылығы жүйелеріне елеулі қауіп төндіріп, экономикалық шығындарға әкеледі және азық-түлік қауіпсіздігіне қатер төндіреді (Reddy et al., 2025). Ауыл шаруашылығының инвазиялық зиянкестерінің ішінде қызанақ күйесі *Tuta absoluta* (Meyrick, 1917) ерекше орын алады. Қазіргі уақытта бұл түр алқа тұқымдас дақылдардың, ең алдымен қызанақтың (*Solanum lycopersicum*), аса қауіпті зиянкестерінің бірі болып саналады (Desneux et al., 2010). Бұл түрдің дернәсілдері жапырақтардың, сабақтардың және жемістердің үлпаларымен қоректеніп, өсімдіктердің фотосинтездік белсенділігін едәуір төмендететін өзіне тән зақымданған қуыс жолдар түзеді. Соның салдарынан өнім сапасы нашарлап, түсімнің айтарлықтай төмендеуіне әкеледі. Тиімді күресу шаралары қолданылмаған жағдайда экономикалық шығын 80–100%-ға дейін жетуі мүмкін (Biondi et al., 2018; Machekano et al., 2018).

Tuta absoluta бастапқыда Оңтүстік Америкада таралған эндемик түр болып саналған, алайда 2000-жылдардың басынан бастап ол өзінің табиғи таралу аймағынан тыс жерлерге қарқынды түрде тарала бастады (Desneux et al., 2010). Еуропадағы инвазияның алғашқы жағдайлары 2006 жылы Испанияда тіркелді, содан кейін зиянкес Жерорта теңізі аймағына, Солтүстік Африка мен Таяу Шығысқа жылдам таралды. Кейінгі жылдары *T. absoluta* Африка мен Азияның көптеген аймақтарына, соның ішінде Орталық Азия өңірлеріне таралып, жоғары экологиялық икемділігін және әртүрлі агроклиматтық жағдайларға бейімделу қабілетін көрсетті. Зиянкестің таралуына ауыл шаруашылығы өнімдерінің қарқынды халықаралық саудасы, оның жоғары көбею қабілеті (жылына 10–12 ұрпаққа дейін) және қысқа тіршілік циклі ықпал етеді (Biondi et al., 2018; Machekano et al., 2018).

T. absoluta-мен күресуді қиындататын қосымша факторлардың бірі – оның әртүрлі химиялық кластарға жататын инсектицидтерге, соның ішінде пиретроидтарға, фосфорорганикалық қосылыстарға және неоникотиноидтарға төзімділікті жылдам қалыптастыру қабілеті. Бұл дәстүрлі өсімдіктерді қорғау әдістерінің тиімділігін едәуір шектейді және мониторингті, биологиялық күрес шараларын, сондай-ақ ерте диагностикалауға арналған молекулалық әдістерді қамтитын кешенді тәсілдерді енгізуді та-

лап етеді (Biondi et al., 2018; Guedes et al., 2019; Roditakis et al., 2018).

Ерте анықтау және дәл сәйкестендіру тиімді фитосанитариялық бақылау мен зиянкестермен интеграцияланған күрес стратегияларының маңызды құрамдас бөліктері болып табылады. Соңғы жылдары *Tuta absoluta* түрінің Орталық Азияда, соның ішінде Өзбекстан мен Түрікменстан сияқты Қазақстанмен көршілес елдерде таралғаны туралы мәліметтер жарияланды. Алайда оның Қазақстан аумағындағы таралуы, экологиялық таралу ерекшеліктері және молекулалық деңгейде расталуы жөніндегі деректер әлі де шектеулі. Қолда бар мәліметтердің басым бөлігі морфологиялық сәйкестендіруге негізделген, алайда *T. absoluta*-ның Gelechiidae тұқымдасының басқа өкілдеріне, әсіресе дернәсілдік кезеңде, ұқсастығына байланысты бұл әдіс жеткіліксіз болуы мүмкін (Behera et al., 2024; Biondi et al., 2018).

Митохондриялық цитохром с оксидазасының I суббірлігі (COI) генін анықтауға негізделген ДНҚ-баркодтау жәндік түрлерін сәйкестендіруге арналған ең кең таралған әрі сенімді молекулалық әдістердің біріне айналды. COI маркері түрішілік дивергенцияның төмен деңгейімен қатар, тұраралық өзгергіштіктің салыстырмалы түрде жоғары болуымен сипатталады, сондықтан ол филогенетикалық жағынан жақын таксондарды ажыратуға ерекше қолайлы. Әмбебаптығы, нәтижелердің қайталанымдылығы және GenBank пен BOLD Systems сияқты ауқымды референттік дерекқорлардың қолжетімділігі арқасында COI негізіндегі ДНҚ-баркодтау қазіргі кезде молекулалық таксономияда, биоалуантүрлілікті бағалауда және биологиялық қауіпсіздік саласындағы зерттеулерде стандартты әдістердің бірі ретінде қарастырылады (Hebert et al., 2003; Kress & Erickson, 2012; Ratnasingham & Hebert, 2007).

Бұл әдіс жәндік түрлерін олардың әртүрлі даму сатыларында, соның ішінде жұмыртқа, дернәсіл, қуыршақ және имаго кезеңдерінде, тіпті морфологиялық сәйкестендіру қиын немесе сенімсіз болған жағдайларда да жылдам әрі дәл анықтауға мүмкіндік береді. *T. absoluta* сияқты инвазиялық зиянкестер үшін молекулалық сәйкестендірудің маңызы ерекше, өйткені олардың ерте даму сатылары Gelechiidae тұқымдасының басқа өкілдерімен жоғары морфологиялық ұқсастыққа ие болуы мүмкін. Түрді дәл растау фитосанитариялық шараларды уақтылы жүзеге асыруды қамтамасыз ету үшін де аса маңызды (Hebert et al., 2003; Kress & Erickson, 2012; Pandey et al., 2023).

Соңғы жылдары ДНҚ-баркодтау бүкіл әлемде инвазиялық ауыл шаруашылығы зиянкестерін анықтау, мониторинг жүргізу және бақылау мақсатында кеңінен қолданылып келеді. Молекулалық әдістер жаңа популяциялардың пайда болуын жедел растауға, зиянкестердің таралу динамикасын бақылауға, сондай-ақ карантиндік және зиянкестермен күресу бағдарламаларын қолдауға мүмкіндік береді. Молекулалық диагностиканы далалық экологиялық бақылаулармен үштастыру зиянкестер мониторингі жүйелерінің дәлдігі мен тиімділігін айтарлықтай арттырып, зиянкестермен интеграцияланған күрес стратегияларын әзірлеуге ықпал етеді (Arimoto et al., 2025; Hebert et al., 2003; Janssen et al., 2023; Kress & Erickson, 2012). Осылайша, COI геніне негізделген ДНҚ-баркодтау жақында инвазияға ұшыраған аймақтарда инвазиялық жәндік түрлерін, соның ішінде *T. absoluta*-ны ерте анықтау және молекулалық деңгейде растау үшін құнды құрал болып табылады (Ashfaq & Hebert, 2016; Cao et al., 2024; Hebert et al., 2003).

Осы зерттеудің мақсаты Қазақстанның оңтүстік өңірлерінде *T. absoluta*-ның таралуын зерттеу және COI геніне негізделген ДНҚ-баркодтау әдісі арқылы оның түрлік тиесілігін растау болды. Талданған сынамалар саны шектеулі болғанына қарамастан, бұл зерттеу аталған инвазиялық зиянкестің өңірде бар екендігін растайтын алғашқы молекулалық дәлелдерді ұсынады және тұрақты мониторинг жүргізу мен әрі қарай зерттеулерді жалғастыру қажеттігін көрсетеді. Алынған нәтижелер Қазақстан аумағында *T. absoluta*-ның кездесуі жөніндегі қазіргі таңда шектеулі деректерді толықтырып, оның Орталық Азиядағы өңірлік таралу ерекшеліктерін түсінуге үлес қосады. Зерттеу сондай-ақ жергілікті зертханалық жағдайларда инвазиялық жәндік зиянкестерін жедел молекулалық диагностикалау үшін нанопоралық секвенирлеу технологияларын қолдану мүмкіндігін көрсетті. Сонымен қатар алынған молекулалық деректер болашақта *T. absoluta* популяцияларының инвазиялық таралу жолдарын анықтауға және өңірдегі генетикалық әртүрлілігін бағалауға бағытталған филогенетикалық және популяциялық-генетикалық зерттеулер үшін негіз бола алады. Экологиялық бақылауларды молекулалық тәсілдермен біріктіру өңірлік фитосанитариялық қадағалау бағдарламаларының тиімділігін арттыруы мүмкін. Жалпы алғанда, алынған нәтижелер Қазақс-

тандағы инвазиялық ауыл шаруашылығы зиянкестеріне қатысты үйлестірілген мониторинг стратегияларын әзірлеудің маңыздылығын көрсетеді.

Материалдар мен әдістер

Tuta absoluta сынамаларын жинау және морфологиялық сәйкестендіру

Оңтүстік американдық қызанақ күйесі *T. absoluta* сынамалары Қазақстанның оңтүстік өңірлерінде орналасқан қызанақ (*Solanum lycopersicum* L.) агроценоздарынан жиналды. Түзақтардың жабысқақ төсемдеріне түскен ересек жәндіктер абайлап алынып, таңбаланған пробиркаларға салынды және әрбір сынама үшін жиналған орны, жинау күні және түзақ нөмірі тіркелді. Жиналған материал кейіннен морфологиялық және молекулалық талдаулар жүргізу үшін пайдаланылды. Феромонды түзақтар қызанақ алқаптарындағы ересек көбелектердің белсенділігін үздіксіз анықтау мақсатында мониторинг жүргізілген кезең бойы жүйелі түрде тексерілді. Түзақтардың орналасуы зерттелген агроэкожүйелерде зиянкестің таралуын және салыстырмалы санын тиімді бақылауға мүмкіндік берді.ДНҚ бөліп алу алдында зақымданған дараларды және нысаналы емес жәндік түрлерімен ластанған сынамарды алып тастау мақсатында жиналған сынамалар визуалды түрде тексерілді. Барлық жиналған сынамалар әрі қарай талдау жүргізілгенге дейін бақыланатын зертханалық жағдайларда сақталды.

Морфологиялық сәйкестендіру Leica IVESTA3 стереомикроскопының көмегімен жүргізілді. Түрді анықтау мамандандырылған таксономиялық анықтағыштар мен жарияланған сипаттамаларға сәйкес диагностикалық және морфологиялық белгілер жиынтығына негізделді (Hadapad & Hire, 2019). Ересек даралардың сыртқы морфологиялық белгілеріне, соның ішінде қанаттарының түсіне, алдыңғы қанаттарындағы өзіне тән қара дақтарға, дене мөлшеріне және мұртшаларының морфологиясына ерекше назар аударылды. Сонымен қатар, *T. absoluta*-ны Gelechiidae тұқымдасының филогенетикалық жағынан жақын басқа өкілдерінен ажырату үшін бас капсуласының диагностикалық белгілері мен қанат өрнегінің құрылымы зерттелді.

Молекулалық-генетикалық сәйкестендіру

Геномдық ДНҚ өндірушінің нұсқаулығына сәйкес Monarch® Spin gDNA Extraction Kit (New England Biolabs, АҚШ) жиынтығының көмегімен бөлініп алынды. Бөлініп алынған ДНҚ-ның сандық және сапалық талдауы NanoDrop One спектрофотометрі (Thermo Fisher Scientific, АҚШ) және Qubit 4.0 флуориметрі (Invitrogen, АҚШ) арқылы жүргізілді. Полимеразды тізбекті реакцияны жүргізер алдында ДНҚ концентрациясы 50 нг/мкл деңгейіне дейін стандартталды.

ДНҚ-баркодтау үшін митохондриялық COI маркері пайдаланылды. ПТР-амплификация көлемі 25 мкл болатын реакциялық қоспада жүргізілді, оның құрамына 1 мкл матрицалық ДНҚ, әр праймерден 400 нМ және 2,5 мкл 1X Standard Taq Reaction Buffer (New England Biolabs) кірді. Алынған ампликондар күтілетін фрагмент мөлшерін растау және олардың тазалығын бағалау мақсатында көлденең ТАЕ-агарозды гель-электрофорез әдісімен талданды. Қос тізбекті ДНҚ концентрациясы Qubit Flex Fluorometer (Thermo Fisher Scientific, АҚШ) көмегімен де анықталды.

Кітапханалар Rapid Barcoding Kit 96 (SQK-RBK110.96, Oxford Nanopore Technologies, Ұлыбритания) жиынтығының көмегімен дайындалды. Баркодтарды лигирлеуден кейін сынамалар AMPure XP магниттік моншақтарының көмегімен тазартылып, 70% этанолмен жуылды және 15 мкл буферде элюцияланды. Содан кейін барлық сынамалар көлемі 1,5 мл Eppendorf DNA LoBind түтігіне біріктірілді.

Ампликондарды секвенирлеу MinKNOW v25.05.14 бағдарламалық жасақтамасын пайдалана отырып, MinION Mk1B платформасында (Oxford Nanopore Technologies) жүргізілді. FASTQ файлдарының бейсколлингі Dorado v7.9.8 бағдарламасының көмегімен орындалды. Ридтердің сапасын бақылау NanoFilt бағдарламасы (De Coster et al., 2018) арқылы жүргізіліп, сапа көрсеткіші q > 12 және ұзындығы 280 ж.н.-ден асатын тізбектер іріктелді.

Алынған ридтер minimap2 бағдарламасының көмегімен PV765795.1 референттік тізбегіне карталанды (Li, 2018). Сонымен қатар алынған нуклеотидтік тізбектер BLAST талдауының көмегімен GenBank дерекқорында ұсынылған референттік тізбектермен салыстырылды. Секвенирлеу сапасы тізбектердің сәйкестік деңгейі негізінде бағаланып, содан кейін ридтер жоғары сапалы және төмен сапалы топтарға бөлінді. Сәйкестік деңгейі ≥97% болған ридтер жоғары сапалы деп есептелді. Бұдан бөлек, референттік тізбектің бүкіл ұзындығы бойынша қамту профилі талданды. Деректерді статистикалық өңдеу және нәтижелерді визуализациялау R ортасын-

да ggplot2 пакетін пайдалану арқылы жүргізілді (Gómez-Rubio, 2017).

Нәтижелер және талқылау

Түрлік сәйкестендіру ересек даралар бойынша қанат өрнегі, қанат жиектеріндегі шашақтардың ұзындығы, дене түсі және алдыңғы қанаттардағы өзіне тән қара дақтар сияқты түрге тән айқын морфологиялық белгілер негізінде жүргізілді. Сонымен қатар *T. absoluta*-ны Gelechiidae тұқымдасының филогенетикалық жағынан жақын басқа өкілдерінен ажырату үшін диагностикалық хаттамаларда көрсетілген мұртшалардың қосымша диагностикалық белгілері мен дененің жалпы морфологиясы зерттелді (1-сурет). Сәйкестендіруді растау үшін митохондриялық цитохром с оксидазасының I суббірлігі (COI) геніне негізделген ДНҚ-баркодтау әдісі қолданылды.

Алынған нуклеотидтік тізбектер GenBank және BOLD Systems сияқты халықаралық дерекқорларда қолжетімді референттік тізбектермен салыстырылды. ДНҚ-баркодтау талдауы алынған тізбектер мен *T. absoluta*-ның референттік тізбектері арасында жоғары дәрежедегі ұқсастық бар екенін көрсетті. Тізбектердің орташа сәйкестік деңгейі 98,9%-ға жетіп, талданған сынамалардың *T. absoluta* түріне жататынын растады. Алынған нәтижелер микроскопиялық зерттеу барысында анықталған морфологиялық белгілермен сәйкес келді (1-сурет).

Сонымен қатар секвенирлеу сапасын бағалау нәтижесінде карталанған 3 000-нан астам ридтің (68,6%) тізбектердің сәйкестік деңгейі 97%-дан жоғары болатын жоғары сапалы ридтерге жататыны анықталды, бұл алынған молекулалық деректердің жоғары сенімділігін көрсетеді. Қамту профилін талдау ридтердің референттік тізбек бойымен тұрақты таралғанын көрсетті, бұл алынған ДНҚ-баркодтау нәтижелерінің дәлдігі мен сенімділігін растайды (2-сурет).

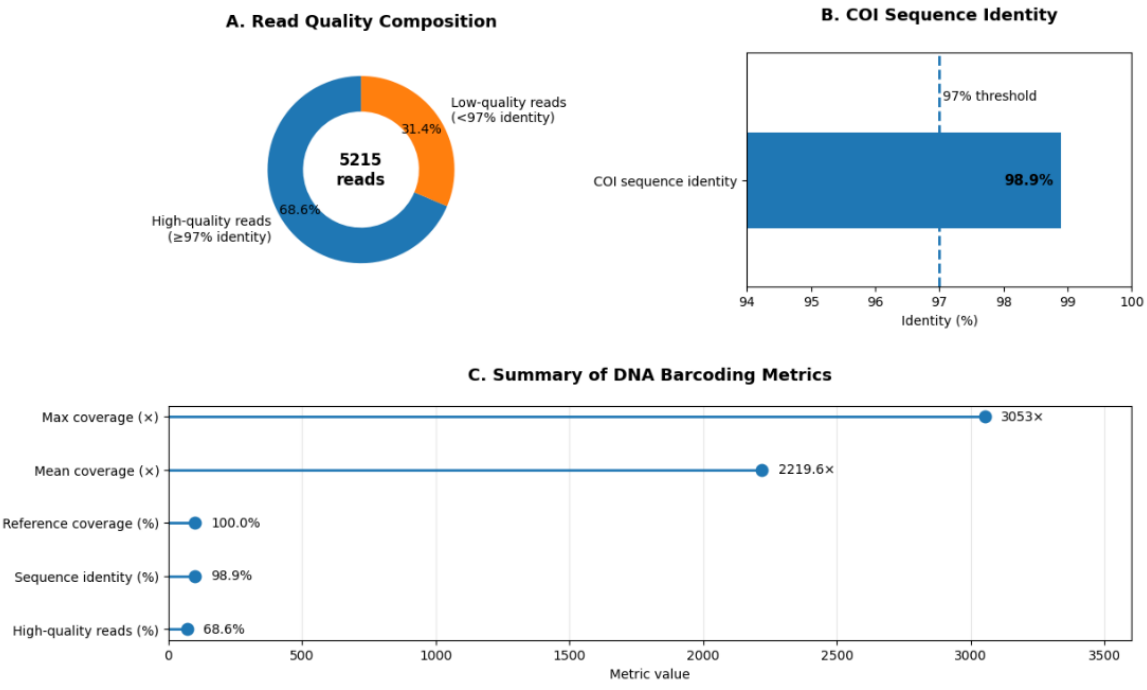
1-сурет

Морфологиялық сәйкестендіру үшін пайдаланылған Tuta absoluta ересек дарасы



2-сурет

Tuta absoluta-ны сәйкестендіруге арналған ДНҚ-баркодтау сапасының негізгі көрсеткіштері



(A) Тізбектік сәйкестік деңгейіне сәйкес секвенирлеу ридтерінің таралуы, мұнда жоғары сапалы (сәйкестік ≥97%) және төмен сапалы (сәйкестік <97%) ридтердің үлестері көрсетілген. (B) Сенімді түрлік сәйкестендіру үшін кеңінен қолданылатын 97% шекті мәнмен салыстырғандағы талданған сынамалардың COI тізбектерінің орташа сәйкестік деңгейі. (C) *Tuta absoluta*-ға COI негізіндегі ДНҚ-баркодтау талдауы барысында алынған негізгі секвенирлеу сапасы көрсеткіштерінің жиынтық сипаттамасы, соның ішінде жоғары сапалы ридтердің пайызы, тізбектік сәйкестік деңгейі, референттік тізбектің қамтылуы, қамтудың орташа тереңдігі және қамтудың ең жоғары тереңдігі.

Бұл зерттеу Қазақстанның оңтүстігіндегі қызанақ агроэкожүйелерінде *T. absoluta*-ның бар екендігін алдын ала молекулалық деңгейде растауға мүмкіндік берді. Алынған нәтижелер соңғы екі онжылдықта өзінің табиғи таралу аймағы болып саналатын Оңтүстік Америкадан Еуропаға, Африкаға және Азияға жылдам таралған осы инвазиялық зиянкестің жаһандық таралу заңдылықтарына сәйкес келеді. Қазақстанның оңтүстігінде *T. absoluta*-ның анықталуы бұл түрдің шығыс бағытта таралуының жалғасып жатқанын растайды және Орталық Азиядағы қызанақ өндірісі жүйелеріне төнетін фитосанитариялық қауіптің артып келе жатқанын көрсетеді.

T. absoluta-ны морфологиялық түрғыдан сәйкестендіру оның ерте даму сатыларының Gelechiidae тұқымдасының басқа өкілдеріне ұқсастығына байланысты қиындық тудыруы мүмкін (Wang et al., 2022). Сондықтан ДНҚ-баркодтауды дәстүрлі морфологиялық зерттеулермен үйлестіру түрді сәйкестендірудің сенімділігін едәуір арттырады (Chan et al., 2014; Madden et al., 2019; Marullo et al., 2020). Осы зерттеуде COI геніне негізделген ДНҚ-баркодтау референттік тізбектермен жоғары деңгейдегі сәйкестікті (98,9%) көрсетті, бұл талданған сынамалардың таксономиялық тиесілігін растады. Үқсас нәтижелер алдыңғы зерттеулерде де алынған, онда митохондриялық COI маркерлері Еуропа, Африка және Азиядағы *T. absoluta*-ның инвазиялық популяцияларын сәйкестендіру және мониторинг жүргізу үшін сәтті қолданылған (Kinyanjui et al., 2019; Shashank et al., 2018).

Осы зерттеуде алынған секвенирлеу сапасының көрсеткіштері молекулалық деректердің сенімділігін қосымша растайды. Тізбектік сәйкестік деңгейі ≥97% болатын ридтердің жоғары үлесі, референттік тізбектің толық қамтылуы және секвенирлеу тереңдігінің жоғары болуы ДНҚ-баркодтау тәсілінің дәлдігі мен сенімділігін көрсетеді. Бұл нәтижелер Oxford Nanopore MinION технологиясына негізделген секвенирлеу платформалары инвазиялық ауыл шаруашылығы зиянкестерін жедел молекулалық диагностикалау үшін тиімді құрал ретінде қолданылуы мүмкін екенін көрсетеді.

Қазақстанның оңтүстігінде *T. absoluta* түрақты популяцияларының қалыптасуы қоршаған орта факторлары мен антропогендік факторлардың үйлесімді әсеріне байланысты болуы мүмкін. Негізгі факторлардың бірі — үзаққа созылатын жылы кезеңмен және жазғы жоғары температуралармен сипатталатын өңірдің қолайлы климаттық жағдайлары. Мұндай жағдайлар зиянкестің жедел дамуына және бір вегетациялық кезең ішінде бірнеше үрпақтың қалыптасуына ықпал етеді. Алдыңғы зерттеулерге сәйкес, *Tuta absoluta* жоғары экологиялық икемділікке ие және температуралық жағдайлардың кең ауқымына сәтті бейімделе алады, бұл оның инвазиялық әлеуетін едәуір арттырады (Biondi et al., 2018; Han et al., 2019; Vivekanandhan et al., 2024).

Жылыжай жағдайында қызанақ өсіру жүйелері зиянкес популяцияларының сақталуы мен таралуында қосымша рөл атқаруы мүмкін. Қорғалған топырақ жағдайлары түрақты микроклиматты, қоректік өсімдіктердің ұзақ уақыт бойы қолжетімді болуын және қолайсыз қоршаған орта факторлары әсерінің төмендеуін қамтамасыз етеді, бұл *T. absoluta*-ның жыл бойы дамуына қолайлы орта қалыптастырады. Еуропаның, Таяу Шығыстың және Азияның бірқатар елдерінде жылыжайлар осы зиянкестің инвазиялық популяциялары үшін негізгі көбею ошақтарының бірі ретінде қарастырылады (Gao et al., 2025; Guillemaud et al., 2015; Guimapi et al., 2016; Han et al., 2019).

Ауыл шаруашылығы өнімдерінің, соның ішінде қызанақ көшеттерінің, жемістерінің және қаптама материалдарының халықаралық деңгейде белсенді тасымалдануы да *T. absoluta*-ның таралуында маңызды рөл атқарады. Өңірлік және халықаралық сауда көлемінің жоғары болуы зиянкестің әртүрлі даму сатыларының елдер мен өңірлер арасында кездейсоқ тасымалдануына ықпал етеді. Бұған дейін *T. absoluta*-ның Жерорта теңізі аймағында, Таяу Шығыста және Орталық Азия елдерінде жылдам таралуы көбінесе сауда ағындары мен карантиндік бақылаудың жеткіліксіз тиімділігіне байланысты екені

көрсетілген (Gao et al., 2025; Guillemaud et al., 2015; Guimapi et al., 2020; Kirschner et al., 1974).

Сонымен қатар зиянкестің жоғары көбею қабілеті, қысқа тіршілік циклі және әртүрлі кластарға жататын инсектицидтерге төзімділік қалыптастыру қабілеті оның жаңа аймақтарда популяцияларының жылдам орнығуына ықпал етуі мүмкін. Осы факторлардың жиынтығы *T. absoluta*-ның Қазақстанда және Орталық Азияның басқа елдерінде одан әрі таралуына алғышарттар қалыптастырады, бұл фитосанитариялық мониторингті күшейту және инвазиялық зиянкестерді ерте анықтаудың тиімді жүйелерін әзірлеу қажеттігін көрсетеді.

Қорытынды

Талданған сынамалар саны салыстырмалы түрде шектеулі болғанына қарамастан, бұл зерттеу Қазақстандағы қызанақ агроэкожүйелерінде *T. absoluta*-ның бар екендігін молекулалық деңгейде растаған алғашқы зерттеулердің бірі болып табылады. Алынған нәтижелер митохондриялық COI геніне негізделген ДНҚ-баркодтаудың инвазиялық ауыл шаруашылығы зиянкестерін дәл сәйкестендіру үшін тиімді, сезімтал және сенімді құрал екенін және дәстүрлі морфологиялық диагностикалау әдістерін сәтті толықтыра алатынын растайды. Халықаралық дерекқорлардағы референттік деректермен тізбектердің жоғары деңгейдегі ұқсастығы зерттелген сынамалардың *T. absoluta* түріне таксономиялық тиесілігін растады және қолданылған молекулалық сәйкестендіру тәсілінің жоғары сенімділігін көрсетті.

Талдау морфологиялық және молекулалық әдістерді біріктіру инвазиялық түрлерді диагностикалаудың дәлдігін айтарлықтай арттыратынын көрсетті, әсіресе ерте даму сатыларының Gelechiidae тұқымдасының басқа өкілдеріне ұқсастығына байланысты морфологиялық сәйкестендіру қиын болған жағдайларда. COI маркерін пайдалану қайталанымды нәтижелер алуға және ДНҚ-баркодтауды Қазақстандағы фитосанитариялық мониторингтің тиімді құралы ретінде қолдану мүмкіндігін растауға мүмкіндік берді.

Алынған деректер Қазақстанның оңтүстігінде *T. absoluta*-ның тұрақты популяциялары қалыптасуы мүмкін екенін көрсетеді. Бұл жағдай өңірдің қолайлы климаттық жағдайлары, жылыжай шаруашылығының кең таралуы және ауыл шаруашылығы өнімдерінің өңірлер мен елдер арасында қарқынды тасымалдануы сияқты факторлардың жиынтық әсерімен байланысты болуы мүмкін. Жоғары экологиялық икемділігі, қысқа тіршілік циклі, бір маусым ішінде бірнеше үрпақ қалыптастыру қабілеті және әртүрлі кластарға жататын инсектицидтерге төзімділіктің дамуы осы зиянкестің инвазиялық әлеуетін едәуір арттырып, оның Орталық Азия аумағында одан әрі таралу қаупін туғызады.

Зерттеу нәтижелері ауыл шаруашылығының биологиялық қауіпсіздігін қамтамасыз ету және қызанақ өнімділігін сақтау түрғысынан ерекше маңызға ие. *T. absoluta*-ның елеулі экономикалық шығын келтіру әлеуетін ескере отырып, зиянкесті ерте анықтау және уақтылы сәйкестендіру оның кең ауқымда таралуының алдын алу және ауыл шаруашылығы саласына келтірілетін залалды барынша азайту үшін аса маңызды. Молекулалық диагностикалау әдістерін ұлттық фитосанитариялық бақылау жүйелеріне енгізу мониторингтің тиімділігін айтарлықтай арттыруға, карантиндік шараларды жеделдетуге және инвазиялық зиянкестердің таралуы жөніндегі ерте ескерту жүйелерін жетілдіруге мүмкіндік береді.

Бұл зерттеудің алдын ала сипатта екенін және Қазақстандағы, сондай-ақ Орталық Азияның басқа елдеріндегі *T. absoluta* популяцияларының құрылымы мен таралу жолдарын одан әрі зерттеуге негіз болатынын атап өткен жөн. Болашақ зерттеулердің перспективалы бағыттарына сынамалар жинаудың географиялық ауқымын кеңейту, зерттелетін популяциялар санын арттыру, қосымша молекулалық маркерлерді пайдалану, сондай-ақ филогенетикалық және популяциялық-генетикалық талдаулар жүргізу жатады. Бұл инвазиялық популяциялардың шығу тегін, олардың таралу механизмдерін және өңірдегі зиянкестің генетикалық әртүрлілік деңгейін неғұрлым егжей-тегжейлі зерттеуге мүмкіндік береді.

Жалпы алғанда, осы зерттеудің нәтижелері фитосанитариялық мониторинг жүйелерін жетілдіру мақсатында экологиялық мониторингті, молекулалық диагностиканы және заманауи секвенирлеу әдістерін біріктірудің жоғары әлеуетін көрсетеді. COI геніне негізделген ДНҚ-баркодтауды қолдану инвазиялық зиянкестермен интеграцияланған күрес бағдарламаларының маңызды құрамдас бөлігіне айналып, экономикалық шығындарды азайтуға және ауыл шаруашылығы өндірісінің тұрақтылығын қамтамасыз етуге бағытталған *T. absoluta* популяцияларын басқарудың неғұрлым тиімді стратегияларын әзірлеуге ықпал етуі мүмкін.

Қаржыландыру

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ауыл шаруашылығы министрлігі тарапынан BR22887230 нысаналы қаржыландыру бағдарламасы аясында қаржыландырылды.

Мүдделер қақтығысы

Барлық авторлар мақаланың мазмұнымен танысып, оны оқып шыққан және олардың арасында мүдделер қақтығысы жоқ.

Әдебиеттер

Arimoto, M., Higo, Y., Kitajima, Y., & Iwaizumi, R. (2025). Molecular phylogeny and identification of Tuta absoluta (Lepidoptera: Gelechiidae) based on mitochondrial DNA. *Applied Entomology and Zoology, 60*, 1–16. https://doi.org/10.1007/s13355-024-00886-5

Ashfaq, M., & Hebert, P. D. N. (2016). DNA barcodes for bio-surveillance: Regulated and economically important arthropod plant pests. *Genome, 59*(11), 933–945. https://doi.org/10.1139/gen-2016-0024

Behera, S. R., Pandey, R., Mohapatra, A., & Abhinav. (2024). Tuta absoluta: The invasive South American tomato pinworm. *Just Agriculture, 4*(8), 334–342.

Biondi, A., Guedes, R. N. C., Wan, F.-H., & Desneux, N. (2018). Ecology, worldwide spread, and management of the invasive South American tomato pinworm, Tuta absoluta: Past, present, and future. *Annual Review of Entomology, 63*, 239–258. https://doi.org/10.1146/annurev-ento-031616-034933

Cao, Y., Yao, R., Wang, Y., Huang, C., Zhang, Y., Liu, W., Li, J., Lin, L., Tan, L., Yan, F., Zhang, G., & Song, X. (2024). Unlocking precision: Advancing rapid field molecular identification of Tuta absoluta across its life cycle using locked nucleic acid strategies. *Sensors and Actuators B: Chemical, 416*, Article 136059. https://doi.org/10.1016/j.snb.2024.136059

Chan, A., Chiang, L. P., Hapuarachchi, H. C., Tan, C. H., Pang, S. C., Lee, R., Lee, K. S., Ng, L. C., & Lam-Phua, S. G. (2014). DNA barcoding: Complementing morphological identification of mosquito species in Singapore. *Parasites & Vectors, 7*, Article 569. https://doi.org/10.1186/s13071-014-0569-4

De Coster, W., D'Hert, S., Schultz, D. T., Cruts, M., & Van Broeckhoven, C. (2018). NanoPack: Visualizing and processing long-read sequencing data. *Bioinformatics, 34*(15), 2666–2669. https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bty149

Desneux, N., Wajnberg, E., Wyckhuys, K. A. G., Burgio, G., Arpaia, S., Narváez-Vasquez, C. A., González-Cabrera, J., Catalán Ruescas, D., Tabone, E., Frandon, J., Pizzol, J., Poncet, C., Cabello, T., & Urbaneja, A. (2010). Biological invasion of European tomato crops by Tuta absoluta: Ecology, geographic expansion and prospects for biological control. *Journal of Pest Science, 83*, 197–215. https://doi.org/10.1007/s10340-010-0321-6

Gao, T., Feng, R., Liu, Z., & Zhu, Z. (2025). Modeling the potential climatic suitability and expansion risk of Tuta absoluta (Meyrick, 1917) (Lepidoptera: Gelechiidae) under future climate scenarios. *Insects, 16*(2), Article 185. https://doi.org/10.3390/insects16020185

Gómez-Rubio, V. (2017). ggplot2: Elegant graphics for data analysis (2nd edition) [Book review]. *Journal of Statistical Software, 77*(Book Review 2), 1–3. https://doi.org/10.18637/jss.v077.b02

Guedes, R. N. C., Roditakis, E., Campos, M. R., Haddi, K., Bielza, P., Siqueira, H. A. A., Tsagkarakou, A., Vontas, J., & Nauen, R. (2019). Insecticide resistance in the tomato pinworm Tuta absoluta: Patterns, spread, mechanisms, management and outlook. *Journal of Pest Science, 92*, 1329–1342. https://doi.org/10.1007/s10340-019-01086-9

Guillemaud, T., Blin, A., Le Goff, I., Desneux, N., Reyes, M., Tabone, E., Tsagkarakou, A., Niño, L., & Lombaert, E. (2015). The tomato borer, Tuta absoluta, invading the Mediterranean Basin, originates from a single introduction from Central Chile. *Scientific Reports, 5*, Article 8371. https://doi.org/10.1038/srep08371

Guimapi, R. Y. A., Mohamed, S., Okeyo, G., Ndjomatchoua, F., Ekesi, S., & Tonnang, H. (2016). Modeling the risk of invasion and spread of Tuta absoluta in Africa. *Ecological Complexity, 28*, 77–93.

Guimapi, R. A., Srinivasan, R., Tonnang, H. E., Sotelo-Cardona, P., & Mohamed, S. A. (2020). Exploring the mechanisms of the spatiotemporal invasion of Tuta absoluta in Asia. *Agriculture, 10*(4), Article 124. https://doi.org/10.3390/agriculture10040124

Hadapad, A., & Hire, R. (2019). Molecular characterisation of tomato leaf miner Tuta absoluta populations obtained from different geographical locations of India. *Journal of Biological Control, 33*, 147–154. https://doi.org/10.18311/jbc/2019/23115

Han, P., Bayram, Y., Shaltiel-Harpaz, L., Sohrabi, F., Saji, A., Esenali, U. T., Jalilov, A., Ali, A., Shashank, P. R., Ismoilov, K., Lu, Z., Wang, S., Zhang, G., Wan, F., Biondi, A., & Desneux, N. (2019). Tuta absoluta continues to disperse in Asia: Damage, ongoing management and future challenges. *Journal of Pest Science, 92*, 1317–1327. https://doi.org/10.1007/s10340-018-1062-1

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

Janssen, D., González-Miras, E., & Rodríguez, E. (2023). Tuta absoluta-specific DNA in domestic and synanthropic vertebrate insectivore feces. *Insects, 14*(8), Article 673. https://doi.org/10.3390/insects14080673

Kinyanjui, G., Khamis, F. M., Ombura, F. L. O., Kenya, E. U., Ekesi, S., & Mohamed, S. A. (2019). Infestation levels and molecular identification based on mitochondrial COI barcode region of five invasive Gelechiidae pest species in Kenya. *Journal of Economic Entomology, 112*(2), 872–882. https://doi.org/10.1093/jee/toy357

Kirschner, H., Hentzschel, A., & Kraus, U. (1974). Implantation of methylmethacrylate and TGG catalyst (Palakav) and ceramic substance in animal experiments. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift, 29*(9), 750–753.

Kress, W. J., & Erickson, D. L. (2012). DNA barcodes: Methods and protocols. *Methods in Molecular Biology, 858*, 3–8. https://doi.org/10.1007/978-1-61779-591-6_1

Li, H. (2018). Minimap2: Pairwise alignment for nucleotide sequences. *Bioinformatics, 34*(18), 3094–3100. https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bty191

Machekano, H., Mutamiswa, R., & Nyamukondiwa, C. (2018). Evidence of rapid spread and establishment of Tuta absoluta (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae) in semi-arid Botswana. *Agriculture & Food Security, 7*, Article 48. https://doi.org/10.1186/s40066-018-0201-5

Madden, M. J. L., Young, R. G., Brown, J. W., Miller, S. E., Frewin, A. J., & Hanner, R. H. (2019). Using DNA barcoding to improve invasive pest identification at U.S. ports-of-entry. *PLOS ONE, 14*(9), Article e0222291. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222291

Marullo, R., Mercati, F., & Vono, G. (2020). DNA barcoding: A reliable method for the identification of thrips species (Thysanoptera, Thripidae) collected on sticky traps in onion fields. *Insects, 11*(8), Article 489. https://doi.org/10.3390/insects11080489

Pandey, M., Bhattarai, N., Pandey, P., Chaudhary, P., Katuwal, D. R., & Khanal, D. (2023). A review on biology and possible management strategies of tomato leaf miner, Tuta absoluta (Meyrick), Lepidoptera: Gelechiidae in Nepal. *Heliyon, 9*(6), Article e16474. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16474

Ratnasingham, S., & Hebert, P. D. N. (2007). BOLD: The Barcode of Life Data System (http://www.barcodinglife.org). *Molecular Ecology Notes, 7*(3), 355–364. https://doi.org/10.1111/j.1471-8286.2007.01678.x

Reddy, A. A., Minz, K. A., Meena, P., Sharma, K. C., & Rai, P. K. (2025). *Atlas of invasive insect species: Status of geographical distribution and economic losses in India*. ICAR-National Institute of Biotic Stress Management.

Roditakis, E., Vasakis, E., García-Vidal, L., Martínez-Aguirre, M. del R., Rison, J. L., Haxaire-Lutun, M. O., Nauen, R., Tsagkarakou, A., & Bielza, P. (2018). A four-year survey on insecticide resistance and likelihood of chemical control failure for tomato leaf miner Tuta absoluta in the European/Asian region. *Journal of Pest Science, 91*, 421–435. https://doi.org/10.1007/s10340-017-0900-x

Shashank, P. R., Twinkle, S., Chandrashekar, K., Meshram, N. M., Suroshe, S. S., & Bajracharya, A. S. R. (2018). Genetic homogeneity in South American tomato pinworm, Tuta absoluta: A new invasive pest to oriental region. *3 Biotech, 8*(8), Article 350. https://doi.org/10.1007/s13205-018-1374-0

Vivekanandhan, P., Swathy, K., Sarayut, P., & Patcharin, K. (2024). Biology, classification, and entomopathogen-based management and their mode of action on Tuta absoluta (Meyrick) in Asia. *Frontiers in Microbiology, 15*, Article 1429690. https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1429690

Wang, W., Xiao, G., Yang, B., Ye, J., Zhang, X., Zheng, Y., & Chen, B. (2022). Instar determination for the tomato leafminer Tuta absoluta (Lepidoptera: Gelechiidae) using the density-based OPTICS clustering algorithm. *Environmental Entomology, 51*(5), 940–947. https://doi.org/10.1093/ee/nvac065

Авторлар туралы мәлімет:

Дулат Бақыт – ауыл шаруашылығы ғылымдарының магистрі, ҚР ҒЖБМ ҒК «Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институты» ШЖҚ РМК кіші ғылыми қызметкері, «AgriBioTech ғылыми-зерттеу орталығы» ЖШС (Алматы, Қазақстан, e-mail: bahytalt99@gmail.com).

Кенжебекова Роза Талғатовна – биотехнология саласындағы техника және технология магистрі, ҚР ҒЖБМ ҒК «Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институты» ШЖҚ РМК ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: rozakenzhebekova344@gmail.com).

Даирбекова Зарина Кайратовна – жаратылыстану ғылымдарының магистрі, ҚР ҒЖБМ ҒК «Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институты» ШЖҚ РМК зертханашысы (Алматы, Қазақстан, e-mail: dairbekovaz2001@gmail.com).

Махамбетов Әлібек Нұрланұлы – жаратылыстану ғылымдарының магистрі, ҚР ҒЖБМ ҒК «Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институты» ШЖҚ РМК зертханашысы (Алматы, Қазақстан, e-mail: alibekmahambetov@gmail.com).

Сағитов Абай Оразұлы – биология ғылымдарының докторы, профессор, ҚР Ұлттық ғылым академиясының академигі, ҚР ҒЖБМ ҒК «Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институты» ШЖҚ РМК бас ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: a_sagitov@mail.ru).

Грищенко Диляра Александровна – PhD, қауымдастырылған профессор, ҚР ҒЖБМ ҒК «Өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы институты» ШЖҚ РМК зертхана меңгерушісі, «AgriBioTech ғылыми-зерттеу орталығы» ЖШС (Алматы, Қазақстан, e-mail: d.kopytina@gmail.com).

Information about the authors:

Dulat Bakyt – Master of Agricultural Sciences, Junior Researcher at the Institute of Plant Biology and Biotechnology, Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan; AgriBioTech Research Center LLP (Almaty, Kazakhstan, e-mail: bahytalt99@gmail.com).

Kenzhebekova Roza Talgatovna – Master of Engineering and Technology in Biotechnology, Researcher at the Institute of Plant Biology and Biotechnology, Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan, e-mail: rozakenzhebekova344@gmail.com).

Dairbekova Zarina Kairatovna – Master of Natural Sciences, Laboratory Assistant at the Institute of Plant Biology and Biotechnology, Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan, e-mail: dairbekovaz2001@gmail.com).

Makhambetov Alibek Nurlanuly – Master of Natural Sciences, Laboratory Assistant at the Institute of Plant Biology and Biotechnology, Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan, e-mail: alibekmahambetov@gmail.com).

Sagitov Abai Orazuly – Doctor of Biological Sciences, Professor, Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Chief Researcher at the Institute of Plant Biology and Biotechnology, Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan, e-mail: a_sagitov@mail.ru).

Gritsenko Dilyara Alexandrovna – PhD, Associate Professor, Head of Laboratory at the Institute of Plant Biology and Biotechnology, Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan; AgriBioTech Research Center LLP (Almaty, Kazakhstan, e-mail: d.kopytina@gmail.com).

Сведения об авторах:

Дулат Бакыт – магистр сельскохозяйственных наук, младший научный сотрудник РГП на ПХВ «Институт биологии и биотехнологии растений» КН МНВО РК, ТОО «Научно-исследовательский центр AgriBioTech» (Алматы, Казахстан, e-mail: bahytalt99@gmail.com).

Кенжебекова Роза Талгатовна – магистр техники и технологии в области биотехнологии, научный сотрудник РГП на ПХВ «Институт биологии и биотехнологии растений» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан, e-mail: rozakenzhebekova344@gmail.com).

Даирбекова Зарина Кайратовна – магистр естественных наук, лаборант РГП на ПХВ «Институт биологии и биотехнологии растений» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан, e-mail: dairbekovaz2001@gmail.com).

Махамбетов Алибек Нурланович – магистр естественных наук, лаборант РГП на ПХВ «Институт биологии и биотехнологии растений» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан, e-mail: alibekmahambetov@gmail.com).

Сагитов Абай Оразулы – доктор биологических наук, профессор, академик НАН РК, главный научный сотрудник РГП на ПХВ «Институт биологии и биотехнологии растений» КН МНВО РК (Алматы, Казахстан, e-mail: a_sagitov@mail.ru).

Гриценко Диляра Александровна – PhD, ассоциированный профессор, заведующая лабораторией РГП на ПХВ «Институт биологии и биотехнологии растений» КН МНВО РК, ТОО «Научно-исследовательский центр AgriBioTech» (Алматы, Казахстан, e-mail: d.kopytina@gmail.com).

Келіп түсті: 04 ақпан 2026 жыл
Қабылданды: 20 қыркүйек 2026 жыл

МРНТИ 34.29.35 https://doi.org/10.26577/EJE208831226

М.Н. Оразбекова*, А.А. Аметов, А.Ж. Чилдибаева, A. Aksoy

Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан
*e-mail: merey2@gmail.com

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕНОПОПУЛЯЦИЙ И ФИТОХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА *NELUMBO NUCIFERA* GAERTN. ВО ФЛОРЕ РЕКИ КИГАШ АТЫРАУСКОЙ ОБЛАСТИ

Статья посвящена исследованию современного состояния ценопопуляций *Nelumbo nucifera* Gaertn. во флоре реки Кигаш, протекающей по западной части Курмангазинского района Атырауской области. Кроме того, был изучен фитохимический состав цветков и листьев данного вида. В работе проведен таксономический, экологический и фитохимический анализ ценопопуляций *N. nucifera*. Установлено, что структура ценопопуляций *N. nucifera* во флоре реки Кигаш является относительно стабильной и характеризуется преобладанием виргинильных и генеративных особей. Исследованная ценопопуляция приурочена к растительному покрову поймы реки Кигаш, который в прибрежной зоне представлен смешанными древесно-кустарниково-травянистыми сообществами с выраженной ярусной структурой, а в акватории ассоциациями водной растительности с доминированием *N. nucifera*. Это обусловлено достаточным семенным возобновлением вида в последние годы, а также его совместным произрастанием с зелеными водорослями. Жизнеспособность особей *N. nucifera* в ценопопуляциях в значительной степени определяется условиями местообитания. Полученные результаты свидетельствуют о том, что исследованные ценопопуляции *N. nucifera* находятся в благоприятном состоянии и входят в состав естественных водно-болотных фитоценозов поймы реки Кигаш, отличающихся высоким флористическим и ценотическим разнообразием и требующих охраны как ценные природные экосистемы Западного Казахстана.

Ключевые слова: *Nelumbo nucifera*, популяции, ценопопуляции, Атырауская область, река Кигаш.

M.N. Orazbekova*, A.A. Ametov, A.Zh. Childibayeva, A. Aksoy

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
*e-mail: merey2@gmail.com

Assessment of the current state of *Nelumbo nucifera* Gaertn. coenopopulations and their phytochemical composition in the flora of the Kigash river, Atyrau region

The article is devoted to the investigation of the current state of *Nelumbo nucifera* Gaertn. coenopopulations in the flora of the Kigash River, which flows through the western part of the Kurmangazy District of the Atyrau Region, Kazakhstan. In addition, the phytochemical composition of the flowers and leaves of this species was analyzed. The study includes taxonomic, ecological, and phytochemical analyses of *N. nucifera* coenopopulations. The results showed that the structure of *N. nucifera* coenopopulations in the flora of the Kigash River is relatively stable and is characterized by the predominance of virginile and generative individuals. The investigated coenopopulation is associated with the vegetation cover of the Kigash River floodplain, where the riparian zone is represented by mixed tree-shrub-herb communities with a well-developed stratified structure, while the aquatic zone is dominated by associations of aquatic vegetation with *N. nucifera*. The favorable condition of the coenopopulation is associated with sufficient seed regeneration in recent years and its co-occurrence with green algae. The viability of *N. nucifera* individuals within the coenopopulations is largely determined by habitat conditions. The obtained results indicate that the studied *N. nucifera* coenopopulations are in a favorable state and form part of the natural wetland phytocoenoses of the Kigash River floodplain, which are characterized by high floristic and coenotic diversity and require conservation as valuable natural ecosystems of Western Kazakhstan.

Keywords:. *Nelumbo nucifera*, populations, coenopopulations, Atyrau region, Kigash river.

 © 2026 Al-Farabi Kazakh National University

М.Н. Оразбекова*, А.А. Аметов, А.Ж. Чилдибаева , А. Aksoy
Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан
*e-mail: merey2@gmail.com

Атырау облысының Қиғаш өзені флорасындағы *Nelumbo nucifera* Gaertn. түрінің ценопопуляцияларының қазіргі жағдайын және фитохимиялық құрамын бағалау

Мақала Атырау облысы Құрманғазы ауданының батыс бөлігімен ағатын Қиғаш өзенінің флорасындағы *Nelumbo nucifera* Gaertn. түрінің ценопопуляцияларының қазіргі жағдайын зерттеуге арналған. Оған қоса осы өсімдік түрінің гүлі мен жапырағының фитохимиялық құрамы зерттелді. Бұл мақалада *N. nucifera* түрі ценопопуляцияларының флорасына таксономиялық, экологиялық және фитохимиялық талдау жасалған. Қиғаш өзенінің флорасындағы *N. nucifera* ценопопуляцияларының құрылымы біршама тұрақты және тың және генеративті өсімдіктер тобының басым екенін көрсетті. Зерттелген ценопопуляцияда Қиғаш өзені жайылмасының өсімдік жамылғысы жағалау белдеуінде ярустық құрылымы бар аралас ағаш-бұталы-шөптесін қауымдастықтан, ал акваторияда *N. nucifera* басым су өсімдіктері ассоциациясынан тұрады. Бұл соңғы бірнеше жылда жеткілікті тұқым жаңартуының болуымен және жасыл балдырлармен селбесіп өсуімен байланысты. Ценопопуляциялардағы *N. nucifera* дараларының өміршеңдігіне негізінен тіршілік ету ортасының түрі әсер етеді. *N. nucifera* ценопопуляцияларының зерттелген құрылымы олардың Қиғаш өзені жайылмасын Батыс Қазақстан аймағындағы флоралық және ценотикалық әртүрлілігі жоғары, қорғауды қажет ететін табиғи су-батпақты фитоценоздарының құрамындағы жақсы жағдайын көрсетеді.

Түйін сөздер: *Nelumbo nucifera*, популяциялар, ценопопуляциялар, Атырау облысы, Қиғаш өзені.

Введение

Река Кигаш расположена в пределах Прикаспийской низменности. Она является одним из рукавов дельты Волги, отделяясь от реки Ахтубы, и протекает по западной части Курмангазинского района Атырауской области Республики Казахстан. Её общая длина составляет 100 км. Её русло полноводно круглый год, а уровень воды тесно связан с уровнем Волги. При своем движении к Каспийскому морю они веерообразно разветвляются на несколько крупных каналов: Иголкинский, Утеринский, Шароновка. Для реки Кигаш характерно весенне-летнее половодье (Камиева и др., 2023). Начало весеннего половодья зафиксировано на вторую половину апреля, пик – на конец мая – начало июня. Вдоль русла реки широко распространены озеровидные водоемы, пойменные луга и заболоченные участки. Территория реки Кигаш расположена в зоне сухого континентального климата. Лето здесь жаркое и засушливое, тогда как зима относительно мягкая. Средняя температура воздуха в июле достигает +30-35 °С, а в зимний период понижается примерно до -10 °С. Годовое количество атмосферных осадков невелико и составляет около 150-200 мм (Казгидромет, б. д.). Указанные климатические условия оказывают непосредственное влияние на гидрологический режим реки и уровень ее увлажнения.

По данным литературных источников, минерализация воды составляет примерно 0,3-0,7 г/л, что соответствует категории пресных вод. Значение pH изменяется в пределах 7,2-7,8, формируя слабощелочную среду. Кроме того, содержание растворенного кислорода (6-8 мг/л) является благоприятным показателем для развития водных растений и животных (Тауова, 2025).

Растительный покров прибрежной зоны реки Кигаш представлен преимущественно древесно-кустарниковыми, луговыми и водно-болотными сообществами. В отличие от горных и лесных экосистем, для данной территории характерна кустарниково-степная растительность с участием пойменных древесных пород и гидрофильных видов (Anatoliy et al., 2026). В составе прибрежной растительности отмечены следующие виды: *Fraxinus americana* L., *Salix alba* L., *Elaeagnus angustifolia* L., *Tamarix laxa* Willd., *Scirpus lacustris* L., *Typha angustifolia* L., *Phragmites communis* Trin., *Argusia sibirica* (L.) Dandy, *Lactuca tatarica* (L.) C.A. Mey., *Rorippa palustris* (L.) Besser, *Suaeda altissima* (L.) Pall., *Polygonum aviculare* L., *Atriplex tatarica* L., *Trachomitum sarmatiense* (Woodson) Pobed., *Cirsium arvense* (L.) Scop., *Mentha aquatica* L., *Plantago media* L., *Calystegia sepium* (L.) R.Br., *Ranunculus circinatus* Sibth., *Rumex confertus* Willd. и *Nymphaea alba* L. (Darbayeva и др., 2026).

Данные виды формируют сложный комплекс прибрежно-водной растительности, включающий древесно-кустарниковые сообщества, луговые ценозы, болотные группировки и водные ассоциации, что отражает высокое экологическое разнообразие поймы реки Кигаш.

Работа посвящена изучению современного состояния популяций вида *N. nucifera*, флористического состава ценопопуляций этих видов в реки Кигаш, протекающей по западной части Курмангазинского района Атырауской области.

Исследуемый вид *N. nucifera*, относится к роду *Nelumbo* Adans., известный как лотос, священный лотос или индийский лотос, является многолетним водным растением, имеющим важное пищевое, лекарственное и экологическое значение. Данный вид относится к семейству Nelumbonaceae A.Rich., представленному единственным родом Nelumbo. В настоящее время род включает два вида – *N. nucifera*. и *N. lutea* Willd., которые распространены преимущественно в азиатском и американском регионах (Ming et al., 2013; Wang & Zhang, 2005).

В целом под названием «лотос» обычно подразумевают азиатский лотос (*N. nucifera*), который широко распространён в Индии, Китае, Непале, Шри-Ланке, Таиланде, Японии, Новой Гвинее, Австралии и в Казахстане (Deng et al., 2013; Sheikh, 2014; Yang et al., 2012). В отличие от него, американский лотос (N. lutea) преимущественно встречается в восточных и южных регионах Северной Америки, а также в некоторых районах Южной Америки (Islam et al., 2020).

Род Nelumbo во флоре Казахстана представлен единственным видом – *N. nucifera* (лотос орехоносный), являющимся редким водным растением с ограниченным распространением. На территории Казахстана данный вид встречается в бассейне реки Или, озере Караколь, а также выявлен в естественных водоемах реки Кигаш (Атырауская область) (Павлов, 1956; Турдиев, 1961).

Рисунок 1

Карта местонахождения популяции N. nucifera в естественных водоемах реки Кигаш (Атырауская область, Казахстан)



Согласно ботанической классификации охраняемых видов, *N. nucifera* относится к III категории – редким видам с сокращающейся численностью (Красная книга Казахской ССР, 1981). Вид представляет значительный интерес для сохранения генофонда как реликтовое растение, натурализованное на территории юга Казахстана, а также имеет высокое декоративное значение (Куренцова, 1968).

N. nucifera – многолетнее травянистое гидрофильное растение с коротким узловатым корневищем. Листья диморфные: воздушные листья щитовидной формы располагаются на длинных шиповатых черешках и имеют округлую листовую пластинку диаметром до 30 см. Плавающие листья характеризуются меньшими размерами и гибкими черешками. Цветки крупные, диаметром 20-25 см, с многочисленными розовыми лепестками и приятным ароматом. Плоды представлены конусовидными орешками. Размножение осуществляется семенным и вегетативным способами. Цветение и плодоношение происходят в июле-августе (Васильев и др., 1976). В Казахстане *N. nucifera* является натурализованным видом и формирует устойчивые ценопопуляции в отдельных водных экосистемах с благоприятными гидрологическими условиями (Red Book of Kazakhstan, 2014).

С древних времен цветок лотоса имеет важное культурное и символическое значение в различных цивилизациях. В индуистской и буддийской традициях, а также в культуре Древнего Египта он рассматривается как духовный символ, тогда как в традиционной китайской культуре лотос ассоциируется с долголетием и благополучием (Lin et al., 2019; Tungmunnithum et al., 2018). В настоящее время *N. nucifera* является национальным цветком Индии и Вьетнама. Благодаря своим пищевым, лекарственным и декоративным свойствам данный вид культивируется человеком на протяжении более 7000 лет. Практически все части растения используются в пищевых и лекарственных целях в странах Азии уже более 2000 лет (Guo et al., 2009). *N. nucifera* имеет значительное экономическое значение для многих азиатских стран, где рассматривается как перспективное модельное растение для исследований в области садоводства и растениеводства (Lin et al., 2019). Китай является крупнейшим производителем и потребителем лотоса в мире (Guo et al., 2009). Корневище (видоизмененный стебель), околоцветник и семена лотоса широко используются в качестве пищевых ингредиентов и входят в состав различных пищевых продуктов благодаря своим ценным питательным и биологически активным свойствам. Различные части растения лотоса, от корневища до надземных побегов, нашли широкое применение в традиционных системах медицины, включая индийскую и китайскую традиционную медицину (Chen et al., 2021; Duke, 2002; Mukherjee et al., 2009). Установлено, что целое растение, а также его сырые экстракты, фракции и отдельные биологически активные компоненты обладают широким спектром биологических и фармакологических свойств. К ним относятся антиоксидантная, противовоспалительная, иммуномодулирующая, жаропонижающая, антибактериальная, противовирусная, противогрибковая, противодиарейная, диуретическая, антиамнестическая, антитромботическая, антиаритмическая, антидиабетическая, гипохолестеринемическая, антиожирительная, антиоксидантная и антивозрастная активность, а также антиатеросклеротические, антифибротические, седативные, нейропротекторные, улучшающие память, антифертильные, гепатопротекторные, дерматопротекторные, кардиопротекторные и противоопухолевые свойства (Asokan et al., 2018; Chen et al., 2019; Mukherjee et al., 2009; Paudel & Panth, 2015; Sharma et al., 2017; Tungmunnithum et al., 2018; Zhang et al., 2015). Многообразие полезных для здоровья и терапевтических эффектов *N. nucifera* связано с наличием в его составе многочисленных биологически активных фитохимических соединений, включая полифенолы, флавоноиды, фенольные кислоты, алкалоиды, терпеноиды, стероиды, жирные кислоты и гликозиды (Limwachiranon et al., 2018). В течение последних нескольких десятилетий *N. nucifera* является объектом интенсивных исследований, направленных на изучение противоопухолевых эффектов различных частей растения и его биологически активных соединений. Однако, насколько известно, комплексный современный обзор всех доступных исследований, посвящённых противораковому потенциалу данного растения, ранее не проводился. Большинство существующих обзорных работ в основном посвящены традиционному и этнофармакологическому использованию *N. nucifera*, особенностям биосинтеза, фитохимическому составу, промышленному применению и широкому спектру оздоровительных свойств, тогда как сведения о его противоопухолевой активности представлены лишь в ограниченном объёме (Wang et al., 2023).

Объектом исследования являлась ценопопуляция лотоса орехоносного (*N. nucifera*) – представителя рода *Nelumbo* Adans. Данный вид является многолетним травянистым поликарпиком, включенным в Красную книгу Казахстана как редкий вид с ограниченным распространением. До настоящего времени специальные популяционные исследования *N. nucifera* на территории Казахстана проводились ограниченно, в связи с чем сведения о распространении вида, современном состоянии его ценопопуляций и особенностях возобновления остаются фрагментарными и недостаточно изученными. Изучение структуры ценопопуляций, морфолого-биологических особенностей и фитохимического потенциала *N. nucifera* имеет важное значение для оценки устойчивости вида в природных условиях, разработки научно обоснованных мер его сохранения и контроля состояния редких водных экосистем. Особую актуальность приобретают исследования локальных ценопопуляций вида, приуроченных к уникальным пойменным и водно-болотным местообитаниям Западного Казахстана.

Целью данной работы является изучение популяционных особенностей и фитохимического состава вида *N. nucifera*, в природных популяциях реки Кигаш протекающей по западной части Курмангазинского района Атырауской области.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования явились представители семейства Nelumbonaceae A.Rich – *N. nucifera* из природных ценопопуляций. Исследования проводились в 2025-2026 гг. в природных фитоценозах на территории реки Кигаш, протекающей по западной части Курмангазинского района Атырауской области (таблица 1).

Таблица 1

Ценопопуляции вида – N. nucifera, обнаруженные в ходе полевых исследований

Название вида, номер ценопопуляции	Географическое местоположение	Координаты местонахождения
N. nucifera, ЦП 1	Атырауская область, Курмангазинский район, река Кигаш, Западный Казахстан, водно-болотные экосистемы реки Кигаш	46°40′658′′ с.ш., 49°32′008′′ в.д. -25 н.у.м
*N. nucifera,*ЦП 2	Атырауская область, Курмангазинский район, река Кигаш, Западный Казахстан, водно-болотные экосистемы реки Кигаш	46°24′407′′ с.ш., 49°19′212′′ в.д., -25 н.у.м

Для изучения современного состояния ценопопуляций *N. nucifera* в естественных условиях произрастания были проведены экспедиционные полевые исследования с использованием маршрутно-рекогносцировочного метода. Исследования охватывали территорию вдоль реки Кигаш от района села Тениз до мест произрастания лотоса орехоносного. Общая протяженность исследовательского маршрута составила около 25 км, что позволило оценить распространение вида, состояние его ценопопуляций и особенности местообитаний в пределах исследуемого участка. Обилие видов в фитоценозах определено по шкале обилия Друде. Для каждой исследуемой ценопопуляции *N. nucifera*. были определены основные морфолого-биологические показатели: количество генеративных и вегетативных особей, высота генеративных побегов, число листьев на генеративном побеге, длина цветоноса, количество листьев на одну особь, размеры цветка и количество цветков. Измерения и учет исследуемых признаков проводились с 20-кратной повторностью для каждой ценопопуляции.

Методика закладки пробных площадей. Методика оценки плотности и обилия изучаемого вида соответствует программе и методике наблюдений за ценопопуляциями видов (Заугольнова и др., 1993). Популяционные исследования вида *N. nucifera*, включающие морфологию растений, эколого-фитоценотические характеристики популяций, жизненность ценопопуляций и особей, будут проводиться в соответствии с имеющимися методиками (Животовский, 2001). Для изучения географического распространения *N. nucifera*, применен маршрутно-рекогносцировочный метод, а также в работе использованы классические общепринятые методики по изуче-

нию морфологии растений в ценопопуляциях, фитоценозов, экологии и биологии. Определение видового состава растительных сообществ. Определение видового состава растений в фитоценозах осуществлено согласно соответствующим ботаническим Определителям, справочникам и др., таким как: «Флора Казахстана» (Павлов, 1956), «Определитель растений Средней Азии. Структура семейств указана по системе А.Л. Тахтаджяна (Тахтаджян, 1987). Виды и рода в семействах расположены по алфавиту.

Маршрутно – рекогносцировочный метод. В полевых условиях используется как метод прогулок по маршрутам для обнаружения и сбора растений. Это позволяет охватить большую территорию и изучить разнообразие видов. Сбор и обработка гербарного материала: собранные экземпляры вида: *N. nucifera*, помещались в гербарные папки с описанием места сбора, даты и коллекционера. После полевых работ материал подвергается сушке и просмотру под бинокулярными лупами. Сбор и обработка гербарного материала проводился по общепринятой методике А.К. Скворцова (Скворцов, 1977). Видовая идентификация и систематика: проводятся в лаборатории после полевых работ. Для этого используются многотомные отчеты и справочники, такие как «Флора СССР» (Флора СССР, 1955), «Флора Казахстана» (Павлов, 1956), «Определитель растений Средней Азии» (Быков, 1979), «Иллюстрированный определитель растений Казахстана» (Иллюстрированный определитель растений Казахстана, 1969) и другие. Видовое и родовое названия вида *N. nucifera*, в реки Кигаш, протекающей по западной части Курмангазинского района Атырауской области приведены согласно базы данных Plants of the World Online (POWO) (Royal Botanic Gardens, Kew, б. д.), а также по С.К. Черепанову (Черепанов, 1995) и С.А. Абдулиной (Абдулина, 1998). Для анализа жизненных форм использовались классификация И.Г. Серебрякова (Серебряков, 1962). В ходе полевых экспедиционных исследований в исследуемом районе реки Кигаш, обнаружены 2 ценопопуляций вида *N. nucifera*. Морфологические признаки *N. nucifera* изучены на живых растениях, с привлечением гербарного материала.

Методы фитохимического исследования. Фитохимический анализ *N. nucifera* проводили с целью определения качественного и количественного состава основных групп биологически активных соединений, включая фенольные соединения, флавоноиды, аскорбиновую кислоту и растворимые сахара. Для исследования использовали листья, цветки и корневища растений, собранные в период активной вегетации и цветения. Растительный материал высушивали при температуре 40–45 °С до постоянной массы, измельчали и просеивали для получения однородного порошка. Экстракцию биологически активных веществ проводили с использованием 70% водного раствора этанола в соотношении растительное сырьё:экстрагент 1:10. Полученные экстракты фильтровали через мембранные фильтры (0,45 мкм) и использовали для последующего хроматографического анализа. Определение фенольных соединений и флавоноидов в органах *N. nucifera* выполняли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ). Анализ проводили на жидкостном хроматографе с УФ-детектором, используя колонку С18 (250 × 4,6 мм, 5 мкм). В качестве подвижной фазы применяли систему растворителей вода с добавлением 0,1% муравьиной кислоты (А) и ацетонитрил (В) в режиме градиентного элюирования. Скорость потока составляла 1,0 мл/мин, температура колонки – 30 °С. Идентификацию фенольных соединений проводили путём сравнения времени удерживания и спектральных характеристик с коммерческими стандартами (галловая кислота, кверцетин, кемпферол, рутин и др.) (Syraiyl et al., 2022).

Количественное определение аскорбиновой кислоты (витамина С) осуществляли методом ВЭЖХ с УФ-детекцией. Экстракцию проводили в кислой среде с использованием 2–3% раствора метафосфорной кислоты для стабилизации аскорбиновой кислоты. Полученные значения содержания витамина С рассчитывали по калибровочной кривой, построенной на основе стандартного раствора аскорбиновой кислоты. Определение содержания растворимых сахаров (глюкоза, фруктоза, сахароза) в листьях, цветках и корневищах *N. nucifera* проводили методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с рефрактометрическим детектированием (ВЭЖХ-RI). Разделение компонентов осуществляли на колонке для анализа углеводов, а идентификацию проводили по времени удерживания стандартных растворов сахаров. Все аналитические измерения выполняли в трёхкратной повторности. Полученные результаты подвергали статистической обработке с расчётом среднего значения и стандартного отклонения. Использованный комплекс фитохимических методов позволил определить содержание основных биоло-

гически активных веществ в органах *N. nucifera* и оценить его химико-биологический потенциал (Zhumagul et al., 2025).

Результаты исследований и их обсуждение

Для уточнения природных мест произрастания ценопопуляций вида *N. nucifera* в реки Кигаш протекающей по западной части Курмангазинского района Атырауской области построения маршрута экспедиционных выездов, установления сроков цветения и занимаемых экологических ниш, проведено изучение гербарного материала основного гербарного фонда в базе данных GBIF (GBIF Secretariat, 2026), а также литературных флористических сведений.

Рисунок 2

Ценопопуляций N. nucifera в реки Кигаш протекающей по западной части Курмангазинского района Атырауской области



ЦП-1 ЦП-2

Исследования ценопопуляций *N. nucifera* произрастающих в реки Кигаш протекающей по западной части Курмангазинского района Атырауской области и изучение гербарного материала показали, что исследуемые виды имеет хорошую экологическую амплитуду, достаточно хорошо распространены на данной территории, однако, ценотическая приуроченность этих видов несколько уже, и большинство ценопопуляций *N. nucifera* выявлено преимущественно в водорослево-травянистых пойменных группировках, где формируются более благоприятные условия увлажнения, водного режима и обеспеченности элементами питания, способствующие устойчивому росту и развитию вида. В ходе экспедиционных исследований установлено наличие двух крупных местонахождений ценопопуляций *N. nucifera*, расположенных в различных эколого-фитоценотических условиях пойменной зоны реки.

Ниже приводится геоботаническая характеристика растительных сообществ с участием *N. nucifera*. В пределах исследуемой территории ценопопуляции *N. nucifera* распространены вдоль русла реки Кигаш, начиная от центральной части через село Тениз и далее на протяжении около 25 км. В местах произрастания лотоса глубина водоема достигает примерно 1,5 м. Нижние водные горизонты характеризуются развитием зеленых водорослей, с которыми *N. nucifera* формирует совместные растительные сообщества.

Исследуемая территория условно подразделена на две основные эколого-фитоценотические зоны: (1) прибрежную зону реки, представленную древесно-кустарниковыми и лугово-кустарниковыми сообществами; (2) центральную аквариальную зону с глубоководными условиями, где ценопопуляции лотоса орехоносного (*N. nucifera*) являются доминирующим компонентом растительных ассоциаций.

Растительность прибрежной зоны. В прибрежной полосе начального участка реки Кигач сформировано сложное смешанное растительное сообщество с хорошо выраженной вертикальной (ярусной) структурой. Верхний ярус представлен интродуцированными и аборигенными древесными видами, средний – кустарниками и гелофитно-гидрофитными растениями, тогда как нижний ярус формируют травянистые виды различных экологических групп, включая гемикриптофиты и терофиты.

Древесно-кустарниковый ярус. В древесном ярусе преобладают интродуцированный вид *Fraxinus americana* L. (инвазивный вид, происходящий из Северной Америки) и местный вид *Elaeagnus angustifolia* L. В кустарниковом ярусе отмечаются *Salix alba* Thunb., выполняющий роль эдификатора и укрепляющий берега водного русла, а также ксерофитно-галофитный вид *Tamarix laxa* Willd (таблица 2).

Гелофитно-гидрофитная группа (прибрежная зона и русловая часть). В прибрежной полосе и непосредственно вдоль русла реки сформированы гелофитно-гидрофитные растительные сообщества, в составе которых преобладают водные растения и болотные виды. Доминантом большинства прибрежных фитоценозов является *Phragmites communis* Trin., формирующий плотные заросли и играющий важную роль в стабилизации береговой зоны (таблица 3).

Таблица 2

Эколого-биологическая характеристика древесно-кустарниковых видов растительного сообщества прибрежной зоны реки Кигаш

Название вида	Жизненная форма	Экологическая группа	Фенологическое состояние
F.americana	дерево	мезофит (древесный мезофит)	плодоношение, крылатки полностью созрели
S. alba	дерево	мезофит, гидрофитный элемент (приурочен к увлажнённым местообитаниям)	активная вегетация
E. angustifolia	дерево/крупный кустарник	ксеромезофит, галофит	активная вегетация, плодоношение
T. laxa	кустарник	фанерофит, ксерофит, галофит	вегетация завершена

Таблица 3

Биолого-экологическая характеристика гелофитно-гидрофитных видов растительного сообщества прибрежной зоны реки Кигаш

Название вида	Жизненная форма	Экологическая группа	Фенологическое состояние
Phragmites communis Trin.	многолетнее травянистое растение	гелофит (настоящее водно-болотное растение)	плодоношение, плоды полностью созрели
Scirpus lacustris L.	многолетнее корневищное травянистое растение	гелофит, гидрофит	плоды полностью созрели
Typha angustifolia L.	многолетнее корневищное травянистое растение	гелофит, мезогигрофит	плоды полностью созрели
Ranunculus circinatus Sibth.	многолетник	гидрофит	цветение
Nymphaea alba L.	многолетнее корневищное растение	гелофит, гидрофит	плодоношение
Rorippa palustris (L.) Besser	многолетник	гемикриптофит, гелофит, гидрофит	цветения

В ходе исследований выявлен комплекс водных и прибрежно-болотных видов растений, относящихся преимущественно к гидрофитам и гелофитам. Среди изученных видов преобладают многолетние травянистые растения с хорошо развитыми корневищами, что является характерной адаптацией к условиям постоянного или периодического увлажнения. Наиболее распространёнными компонентами прибрежной растительности являются *P. communis*, *S. lacustris* и *T. angustifolia*, формирующие обширные заросли в прибрежной зоне водоёма. *P. communis*. характеризуется высокой конкурентоспособностью и значительной высотой побегов (2–3 м),

благодаря чему занимает большую часть прибрежных участков. *S. lacustris* и *T.Tangustifolia,* также являются типичными гелофитами, формирующими плотные сообщества и играющими важную роль в стабилизации береговой зоны. Среди погружённых водных растений отмечен *R. circinatus*, который формирует плотные подводные сообщества и является индикатором слабопроточных и стоячих водоёмов. Плавающий гидрофит *N. alba* находится в генеративной фазе плодоношения и представляет особый природоохранный интерес как редкий вид, включённый в Красную книгу Республики Казахстан. *R. palustris* отмечен как представитель прибрежно-болотной флоры, участвующий в формировании переходных растительных сообществ на влажных местообитаниях. В период наблюдений большинство видов находились в генеративной фазе: отмечены стадии цветения и плодоношения, что свидетельствует о благоприятных условиях для их вегетации и репродуктивного развития в исследуемой экосистеме.

Гемикриптофитно-ксеромезофитная группа (высокие участки побережья). На относительно высоких, засолённых и глинистых участках побережья преобладает группа корневищных гемикриптофитов, среди которых доминирующую роль играет *Argusia sibirica* (L.) Dandy

Таблица 4

Эколого-биологическая характеристика видов растений гемикриптофитно-ксеромезофитной группы высоких участков побережья

Название вида	Жизненная форма	Экологическая группа	Фенологическое состояние
A. sibirica	многолетний, корневищный	гемикриптофит, ксеромезофит, галофит	плодоношения, отмечены молодые вегетативные побеги
Lactuca tatarica (L.) C.A.Mey.	многолетний, корневищный	гемикриптофит, ксерофит, петрофит	цветения
Trachomitum sarmatiense Woodson.	многолетний, корневищный	гемикриптофит, ксеромезофит	фаза массового цветения
Cirsium arvense (L.) Scop.	многолетний	гемикриптофит, мезоксерофит	цветение
Mentha aquatica L.	многолетний, корневищный	гемикриптофит, гигромезофит	отмечены молодые зелёные побеги
Plantago media L.	многолетнее травянистое растение, гемикриптофит	ксеромезофит	генеративная фаза
Convolvulus sepium L.	многолетнее травянистое растение, гемикриптофит	геофит, мезофит	цветения

Терофитно-рудеральная группа. На наиболее высоких, сухих участках побережья, расположенных примерно на 2 м выше уровня воды, отмечены однолетние терофиты – субдоминантные галофитно-ксерофитные виды и сорные растения. Данная группа характеризуется адаптацией к условиям недостаточного увлажнения, засолённости почв и антропогенного воздействия (таблица 5).

Таблица 5

Эколого-биологическая характеристика видов терофитно-рудеральной группы сухих участков побережья

Название вида	Жизненная форма	Экологическая группа	Фенологическое состояние
Suaeda altissima (L.) Pall.	однолетний терофит	ксерофит, галофит	отмечено развитие молодых побегов, активная вегетация ещё не выражена
Polygonum aviculare L.	однолетний терофит	мезофит	цветения
Atriplex tatarica L.	однолетний терофит	ксерофит, галофит	отмечены молодые побеги, активная вегетация выражена слабо

Терофитно-рудеральная группа была отмечена на наиболее высоких и сухих участках побережья, расположенных примерно на 2 м выше уровня воды. В составе данной группы преобладают однолетние терофиты, характеризующиеся высокой устойчивостью к дефициту влаги, засолению почв и нарушению местообитаний. Среди выявленных видов отмечены галофитно-ксерофитные представители с рудеральными свойствами, выполняющие роль субдоминантов в растительном покрове сухих прибрежных участков. Доминирующее положение в данной группе занимает *S. altissima*, относящаяся к однолетним терофитам, ксерофитам и галофитам. Вид приурочен к засолённым участкам верхней части побережья. В период наблюдений отмечалось развитие молодых побегов, при этом активная вегетация была выражена слабо, что связано с ранней стадией сезонного развития растений. *A. tatarica,* также характеризуется как субдоминантный галофитно-ксерофитный терофит, встречающийся на сухих засолённых участках. У растений отмечены молодые побеги и начальные этапы вегетационного развития. Вид обладает высокой экологической пластичностью и является типичным компонентом рудеральных и нарушенных прибрежных сообществ. *P. aviculare* представлен как мезофильный рудеральный терофит, приуроченный к открытым и нарушенным участкам. В период исследований вид находился в генеративной фазе – отмечено цветение. В целом терофитно-рудеральная группа отражает адаптацию растительного покрова к экстремальным условиям верхней части побережья, включая повышенную сухость, засоление и антропогенное воздействие. Присутствие галофитных и рудеральных видов свидетельствует о формировании устойчивого сообщества на переходных участках между естественными прибрежными и нарушенными местообитаниями.

Растительный покров центральной части акватории. Расстояние от центральной части реки Кигаш, проходящей через село Тениз, до участка распространения популяции орехоносного лотоса (*N. nucifera*) составляет около 25 км. В пределах территории произрастания лотоса глубина водоёма варьирует в пределах 1–1,5 м. Дно акватории покрыто слоем зелёных водорослей, формирующих плотный подводный покров и являющихся важным компонентом водной растительности. В центральной части акватории формируется своеобразное водное растительное сообщество, представленное преимущественно гидрофитами. Благоприятные гидрологические условия (умеренная глубина, наличие питательных веществ и развитый донный растительный покров) способствуют устойчивому развитию популяции *N. nucifera* и сопутствующих водных организмов.

ЦП-1. Ассоциация *N. nucifera* + зелёные водоросли + *Phragmites communis* Trin. ЦП-1 сформирована в виде водного растительного сообщества с участием зелёных водорослей в подводном ярусе и *P. communis* в прибрежно-поверхностном ярусе. Данная растительная ассоциация (*N. nucifera* + зелёные водоросли + *P. communis*) занимает площадь около 8 га (GPS-координаты: 46°40′658″, 49°32′008″).

Проективное покрытие растительного покрова составляет 80 %, что свидетельствует о высокой степени сомкнутости сообщества. В структуре ассоциации *N. nucifera* формирует основной компонент водной растительности, зелёные водоросли образуют подводный покров, а Phragmites communis участвует в формировании надводного яруса, создавая сложную вертикальную структуру растительного сообщества.

Таблица 6

Таксономический состав, жизненные формы, экологические группы и фенологическое состояние водных растений и водорослей в ЦП-1 N. nucifera

Название вида	Жизненная форма	Экологическая группа	Фенологическое состояние
N. nucifera	многолетнее водное растение	гидрофит, укореняющийся плавающий водный макрофит	цветения
Phragmites communis Trin.	многолетнее растение	гелофит	плодоношения
Lemna minor L.	свободно плавающий на поверхности воды гидрофит	гидрофит	активное размножение
Зелёные водоросли	талломные водные организмы	фитобентос водоёма	вегетация, интенсивное развитие

Представленные данные в таблице 6 показывают, что ценопопуляция *N. nucifera* формируется за счёт комплекса водных и прибрежно-водных организмов, относящихся к различным экологическим группам. Основу растительного сообщества составляет *N. nucifera* – многолетний укореняющийся плавающий гидрофит, находящийся в генеративной фазе (период цветения). В период исследования у особей отмечены развитые генеративные побеги с крупными листьями и сформированными цветочными бутонами, что свидетельствует об активном прохождении репродуктивной фазы. Надводный ярус сообщества представлен преимущественно *P. communis*, который находится в фазе плодоношения и выполняет роль доминирующего вида прибрежной растительности. Свободноплавающий гидрофит *L. minor* активно размножается и входит в состав ассоциации *N. nucifera*, формируя поверхностный растительный покров. Подводный ярус представлен зелёными водорослями, характеризующимися интенсивным развитием и выполняющими важную роль в структуре фитобентоса водоёма. Таким образом, исследуемое растительное сообщество характеризуется ярусной структурой, включающей плавающие, надводные и подводные компоненты. Сочетание макрофитов (*N. nucifera*, *P. communis, L. minor*) и водорослей обеспечивает формирование устойчивого водного фитоценоза, где *N. nucifera* выступает ключевым структурообразующим видом.

ЦП 2. Ассоциация *N. nucifera* + *Trapa natans* L. ЦП – 2, расположенная примерно в 1 км от первой точки исследования (GPS: N 46°24.407', E 49°19.212', абсолютная отметка -25 н.у.м), характеризуется формированием доминирующей ассоциации *N. nucifera* совместно с *Trapa natans* L. Площадь распространения сообщества составляет 10 га, глубина воды около 100 см, проектное покрытие растительности – 70%. В данной ассоциации *N. nucifera* выступает в качестве основного ценозообразующего вида, формируя верхний ярус водной растительности, тогда как *T. natans* является сопутствующим видом, образующим плавающий покров на поверхности воды. Совместное произрастание этих видов обусловлено их экологической специализацией *N. nucifera* относится к укореняющимся плавающим гидрофитам, а *T. natans* к свободноплавающим гидрофитам, что позволяет им занимать различные экологические ниши в пределах одного водоёма. Исследуемое сообщество характеризуется хорошо выраженной ярусной структурой надводный и поверхностный ярусы представлены *N. nucifera* и *T. natans*, а подводный ярус формируется другими гидрофитами и водорослями. Высокое проектное покрытие (70%) свидетельствует о стабильном развитии растительного сообщества и благоприятных гидрологических условиях для произрастания *N. nucifera*.

Таблица 7

Таксономический состав, жизненные формы, экологические группы и фенологическое состояние водных растений и водорослей в ЦП-2 N. nucifera

Название вида	Жизненная форма	Экологическая группа	Фенологическое состояние
N. nucifera	многолетнее водное растение, реликтовый редкий вид III категории	гидрофит, укореняющийся плавающий макрофит	цветения
Trapa natans L.	однолетнее растение, терофит, третичный реликт	гигрофит, свободноплавающий гидрофит	вегетация, формирование плодов
Salvinia natans (L.) All.	однолетнее водное растение, третичный реликт	гидрофит, свободноплавающий	активная вегетация и размножение
Scirpus lacustris L.	многолетнее корневищное растение	гелофит, гидрофит	цветения и плодоношения
Phragmites communis Trin.	многолетнее растение	гелофит	вегетация, участие в ассоциации
Зелёные водоросли (Chlorophyta)	талломные водные организмы	фитобентос водоёма	активная вегетация, интенсивное развитие

Представленные данные показывают, что исследуемая акватория реки Кигаш характеризуется значительным разнообразием редких и охраняемых гидрофитов, среди которых преобладают реликтовые виды с узкой экологической приуроченностью. Наибольшую структурную и ценотическую роль в составе растительных сообществ выполняет *N. nucifera*, формирующий устойчивые популяции и выступающий основным ценозообразующим видом. Сопутствующие виды – *Nymphaea alba, Trapa natans* и *Salvinia natans* дополняют структуру водного сообщества, занимая различные экологические ниши. Наличие в одном водоёме нескольких охраняемых видов свидетельствует о высокой сохранности природных условий исследуемой территории. Реликтовый состав водной флоры указывает на уникальность экосистемы реки Кигаш и её важную роль в сохранении биоразнообразия региона. Благоприятный гидрологический режим, наличие мелководных участков и стабильные условия увлажнения способствуют поддержанию популяций редких макрофитов. Вместе с тем, учитывая сокращение численности отдельных видов и их природоохранный статус, необходимы дальнейший мониторинг состояния ценопопуляций, контроль антропогенной нагрузки и сохранение естественного режима водоёма. Полученные результаты подтверждают высокую природоохранную значимость исследуемого участка как местообитания редкой и реликтовой водной флоры Западного Казахстана. Растения, произрастающие в акватории реки Кигаш, обладают высокой декоративной ценностью и могут представлять интерес для использования в ландшафтном озеленении водных объектов. Их применение способствует улучшению эстетического восприятия территорий, созданию устойчивых водных композиций и поддержанию благоприятных экологических условий. Среди наиболее декоративных видов следует отметить *N. nucifera*, *N. alba* и *T. natans*, которые отличаются привлекательной формой листьев, оригинальным строением цветков и способностью формировать выразительные водные растительные сообщества. *N. nucifera* является одним из наиболее декоративных водных растений благодаря крупным плавающим листьям и крупным цветкам, обладающим высокой эстетической ценностью. *Nymphaea alba* также характеризуется декоративностью за счёт белоснежных цветков и округлых листовых пластинок, широко используемых в оформлении водоёмов. Trapa natans представляет интерес благодаря своеобразной форме плавающих розеток и плодов. Использование данных видов в озеленении возможно при условии сохранения их природных популяций и соблюдения требований по охране редких и реликтовых растений.

Основные химические компоненты *N. nucifera*. Фенольные соединения *N. nucifera* играют важную роль в адаптации растения к условиям водной среды и обладают высокой биологической активностью. Данные соединения участвуют в защитных механизмах растений, обеспечивая устойчивость к воздействию неблагоприятных факторов окружающей среды, окислительному стрессу и патогенным микроорганизмам (Noysang & Boonmatit, 2019). В составе *N. nucifera* выявлены различные фенольные соединения, включая кверцетин и другие производные фенольных кислот, которые определяют антиоксидантные и защитные свойства растения. Биохимическая оценка различных органов *N. nucifera* (листья и цветки) показала различия в содержании основных групп биологически активных веществ (таблица 8). Анализируемые показатели включали общее содержание фенольных соединений, флавоноидов, витамина С, жиров, отдельных фенольных компонентов и аминокислотного состава.

Общее содержание фенольных соединений в листьях *N. nucifera* составило 1228,98 мг GAE/100 г образца, что значительно превышало показатель цветков (602,34 мг GAE/100 г образца). Аналогичная тенденция наблюдалась для общего содержания флавоноидов: в листьях их количество достигало 3590,99 мг CE/100 г, тогда как в цветках данный показатель составлял 1790,06 мг CE/100 г. Полученные результаты свидетельствуют о более высокой концентрации вторичных метаболитов в листьях, что может быть связано с их важной ролью в фотосинтетической активности и защите тканей растения от окислительного воздействия.

Содержание витамина С имело противоположную тенденцию: в цветках *N. nucifera* его концентрация была выше и составила 218,3 мг/100 г образца, тогда как в листьях отмечено 136,8 мг/100 г образца. Это указывает на различия в накоплении антиоксидантных соединений между вегетативными и генеративными органами растения. Содержание общего количества жиров в исследованных органах было низким и практически одинаковым: 0,1 г/100 г образца как в листьях, так и в цветках, что сви-

детельствует о незначительном накоплении липидных компонентов в изученных тканях. Анализ состава отдельных фенольных соединений показал наличие кверцетина в листьях и цветках *N. nucifera*. Его содержание в листьях составило 108,5 мг/100 г образца, а в цветках – 194,6 мг/100 г образца. Остальные исследованные соединения – апигенин, лютеолин, хлорогеновая, п-кумаровая, феруловая, розмариновая, кофейная и сиреневая кислоты были обнаружены в следовых количествах (Т.Е. – trace elements / следовые количества). Полученные данные свидетельствуют о присутствии широкого спектра фенольных метаболитов, участвующих в формировании защитных механизмов и биологической активности *N. nucifera*.

Анализ аминокислотного состава показал наличие комплекса незаменимых и заменимых аминокислот в листьях и цветках растения. Наиболее высоким содержанием характеризовалась глутаминовая кислота, концентрация которой составила 3,97 г/100 г образца в листьях и 5,44 г/100 г образца в цветках. Среди других аминокислот отмечены аргинин (0,39 и 0,87 г/100 г соответственно), лизин (0,13 и 0,49 г/100 г), гистидин (0,15 и 0,17 г/100 г) и фенилаланин (0,14 и 0,25 г/100 г). Цветки характеризовались несколько более высоким содержанием большинства аминокислот по сравнению с листьями. Таким образом, различные органы *N. nucifera* характеризуются специфическим распределением биологически активных соединений. Листья отличаются высоким содержанием фенольных соединений и флавоноидов, тогда как цветки являются более богатым источником витамина С, кверцетина и ряда аминокислот. Полученные результаты подтверждают высокую биохимическую ценность *N. nucifera* и свидетельствуют о перспективности дальнейшего изучения данного реликтового водного растения как источника природных биоактивных соединений.

Таблица 8

Основной химический состав листьев и цветков N. nucifera

Анализы	*N. nucifera*	
	Листья	Цветки
Общее содержание фенольных соединений (мг эквивалента галловой кислоты/100 г образца)	1228,98	602,34
Общее содержание флавоноидов (мг эквивалента катехина/100 г образца)	3590,99	1790,06
Витамин С (мг/100 г образца)	136,8	218,3
Общее содержание жиров (г/100 г образца)	0.1	0.1
Состав фенольных соединений (мг/100 г образца)		
Апигенин	Т.Е.	Т.Е.
Лютеолин	Т.Е.	Т.Е.
Кверцетин	108,5	194,6
Хлорогеновая кислота	Т.Е.	Т.Е.
п-Кумаровая кислота	Т.Е.	Т.Е.
Феруловая кислота	Т.Е.	Т.Е.
Розмариновая кислота	Т.Е.	Т.Е.
Кофейная кислота	Т.Е.	Т.Е.
Сиреневая кислота	Т.Е.	Т.Е.
Общий аминокислотный состав (г/100 г образца)		
Глутаминовая кислота	3,97	5,44
Гистидин	0,15	0,17
Аргинин	0,39	0,87
Глицин	0,22	0,30
Аланин	0,37	0,36

Продолжение таблицы

Анализы	*N. nucifera*	
	Листья	Цветки
Пролин	0,11	0,27
Метионин	0,08	0,09
Триптофан	0,08	0,08
Фенилаланин	0,14	0,25
Лизин	0,13	0,49

**Примечание: T.E. – trace elements (следовые количества).*

Фитохимический анализ листьев и цветков *N. nucifera* показал различия в накоплении основных групп биологически активных веществ (таблица 9). Исследуемые показатели включали общее содержание фенольных соединений, флавоноидов, витамина С, содержание жиров, индивидуальный состав фенольных соединений и аминокислотный профиль. Общее содержание фенольных соединений в листьях *N. nucifera* составило 1228,98 мг GAE/100 г образца, что более чем в два раза превышало показатель цветков (602,34 мг GAE/100 г образца). Высокий уровень фенольных соединений в листьях связан с их активной ролью в фотосинтетических процессах и защитных механизмах растения. Фенольные соединения способствуют нейтрализации активных форм кислорода и повышают устойчивость тканей к воздействию внешних стрессовых факторов, включая изменение температуры, интенсивность солнечного излучения и колебания водного режима. Аналогичная закономерность наблюдалась для общего содержания флавоноидов. В листьях *N. nucifera* концентрация флавоноидов достигала 3590,99 мг CE/100 г образца, тогда как в цветках данный показатель составлял 1790,06 мг CE/100 г образца. Высокое содержание флавоноидов в листьях подтверждает их важную роль в антиоксидантной защите растения и формировании адаптационных механизмов в условиях водной экосистемы реки Кигаш. В отличие от фенольных соединений и флавоноидов, максимальное содержание витамина С было обнаружено в цветках *N. nucifera* и составило 218,3 мг/100 г образца, тогда как в листьях его содержание было ниже – 136,8 мг/100 г образца. Аскорбиновая кислота является одним из основных природных антиоксидантов, участвующих в защите клеток от окислительного повреждения и регулировании окислительно-восстановительного равновесия. Повышенное содержание витамина С в генеративных органах может быть связано с необходимостью защиты цветков в период активного цветения и формирования семян. Содержание общего количества жиров в исследованных органах было низким и составило 0,1 г/100 г образца как в листьях, так и в цветках. Это указывает на незначительное накопление липидных соединений в изученных органах растения. Анализ индивидуального состава фенольных соединений показал наличие кверцетина в листьях и цветках *N. nucifera*. Его содержание в листьях составило 108,5 мг/100 г, а в цветках – 194,6 мг/100 г образца. Кверцетин является одним из наиболее изученных флавоноидов, обладающим выраженными антиоксидантными и противовоспалительными свойствами. Его присутствие подтверждает биологическую ценность *N. nucifera* как источника природных биоактивных веществ. Такие соединения, как апигенин, лютеолин, хлорогеновая, п-кумаровая, феруловая, розмариновая, кофейная и сиреневая кислоты, были обнаружены в следовых количествах (T.E.). Несмотря на низкую концентрацию, данные фенольные компоненты могут вносить вклад в формирование комплексной антиоксидантной активности растения и обеспечивать защиту клеточных структур от окислительного повреждения. Анализ аминокислотного состава показал наличие комплекса заменимых и незаменимых аминокислот в листьях и цветках *N. nucifera*. Наибольшее содержание отмечено для глутаминовой кислоты, концентрация которой составила 3,97 г/100 г образца в листьях и 5,44 г/100 г образца в цветках. Среди других выявленных аминокислот были аргинин, лизин, фенилаланин, аланин, глицин, пролин, метионин, триптофан и гистидин. Цветки характеризовались более высоким содержанием большинства аминокислот по сравнению с листьями. В частности, содержание аргинина

в цветках составило 0,87 г/100 г, что значительно выше показателя листьев (0,39 г/100 г), а содержание лизина достигало 0,49 г/100 г против 0,13 г/100 г в листьях. Это может быть связано с высокой метаболической активностью генеративных органов в период цветения. Полученные результаты свидетельствуют о специфическом распределении биологически активных веществ между органами *N. nucifera*. Листья характеризуются повышенным содержанием фенольных соединений и флавоноидов, тогда как цветки отличаются более высоким содержанием витамина С, кверцетина и аминокислот. Такое распределение химических компонентов отражает функциональную специализацию различных органов растения и его адаптацию к условиям водной среды. Высокое содержание антиоксидантных соединений в *N. nucifera* подтверждает экологическую и биохимическую значимость данного реликтового вида. Наличие комплекса фенольных соединений, флавоноидов, витамина С и аминокислот указывает на перспективность дальнейшего изучения *N. nucifera* как источника природных биологически активных веществ. Кроме того, химический состав *N. nucifera* имеет значение не только с биохимической точки зрения, но и для оценки состояния природных популяций. Высокая концентрация защитных метаболитов может рассматриваться как один из механизмов адаптации вида к условиям мелководных водоёмов с изменяющимся гидрологическим режимом. С учётом редкого статуса и сокращения численности природных популяций сохранение местообитаний *N. nucifera* в бассейне реки Кигаш имеет важное природоохранное значение.

Заключение

Растительный покров поймы реки Кигаш представлен двумя основными структурными комплексами: в прибрежной зоне смешанными древесно-кустарниково-травянистыми сообществами с выраженной ярусной организацией, а в акватории водными растительными ассоциациями с доминированием *N. nucifera*. В пределах прибрежной полосы отчётливо прослеживается экологический градиент: от уреза воды к более высоким и сухим участкам берега происходит последовательная смена экологических групп от гелофитно-гидрофитных сообществ к гемикриптофитно-ксеромезофитным, а далее к терофитно-рудеральным комплексам. В акватории реки Кигач выявлены две крупные ценопопуляции *N. nucifera* общей площадью около 18 га, формирующие устойчивые водные растительные сообщества. *N. nucifera* является основным структурообразующим видом и доминирующим компонентом водных фитоценозов. В составе данных сообществ также выявлены редкие и реликтовые виды водной флоры – *Trapa natans* и *Salvinia natans*, а также охраняемые виды *Nymphaea alba*, *N. nucifera* и *T. natans*, имеющие природоохранный статус в РК. Исследованные ценопопуляции *N. nucifera* характеризуются прохождением генеративной фазы развития, активным цветением и формированием полноценных генеративных органов. Полученные морфометрические показатели (размеры листовых пластинок, длина стеблей, параметры цветочных бутонов) свидетельствуют о благоприятных условиях произрастания и способности вида успешно реализовывать свой репродуктивный потенциал в условиях реки Кигач. Популяции *N. nucifera* приурочены преимущественно к мелководным участкам водоёма со стабильным гидрологическим режимом, достаточной освещённостью и оптимальными условиями для развития водной растительности. В структуре водных растительных сообществ отмечается выраженная ярусность. Поверхностный ярус формируют укореняющиеся и свободноплавающие гидрофиты (*N. nucifera*, *Trapa natans, Lemna minor, Salvinia natans*), надводный ярус представлен гелофитами (*Phragmites communis, Scirpus lacustris*), а подводный ярус образован зелёными водорослями, относящимися к фитобентосу водоёма. Такое сочетание различных жизненных форм отражает высокую структурную сложность и экологическую устойчивость исследуемых водных сообществ. Выявленные виды относятся преимущественно к экологическим группам гидрофитов и гелофитов, адаптированных к условиям постоянного или периодического обводнения. Их совместное произрастание свидетельствует о сохранении естественных условий водной экосистемы, включая стабильный гидрологический режим, благоприятный световой режим и наличие подходящих местообитаний для развития макрофитной растительности. Особое значение имеет присутствие реликтовых видов *N. nucifera*, *Trapa natans* и *Salvinia natans*, которые являются индикаторами сохранности древних элементов водной флоры региона. Наличие комплекса редких и охраняемых гидрофитов в пределах одной акватории повышает при-

родоохранную ценность поймы реки Кигаш и подтверждает необходимость дальнейшего мониторинга состояния их ценопопуляций. Исследованные виды водной флоры обладают высокими декоративными качествами и представляют интерес для использования при создании природных ландшафтных композиций и озеленении водных объектов. Наибольшей декоративностью отличаются *N. nucifera* и *N. alba* благодаря крупным листьям и привлекательным цветкам, а также Trapa natans, характеризующийся оригинальной формой плавающих розеток. Однако использование редких и охраняемых видов в декоративных целях возможно только при условии сохранения их естественных популяций и соблюдения природоохранных требований. Таким образом, водная флора реки Кигач представляет собой уникальный комплекс реликтовых, редких и охраняемых гидрофитов, обладающий высокой экологической, научной и природоохранной ценностью. Сложная структура растительных сообществ, наличие видов с высоким охранным статусом и сохранность естественных водно-болотных местообитаний позволяют рассматривать пойму реки Кигач как одну из ценных природных экосистем Западного Казахстана. Сохранение естественного гидрологического режима, ограничение антропогенной нагрузки и проведение регулярного мониторинга являются ключевыми условиями поддержания устойчивости популяций охраняемых видов.

Вклад авторов

Оразбекова Мерей Нұржанқызы: Концептуализация, Исследование, Методология, Написание – проверка и редактирование. Аметов Абибулла: Научное руководство, Валидация, Курирование данных.

Литература

Anatoliy, R. K., Kurmanbayeva, M. S., Darbayeva, T. E., Kusmangazinov, A. B., Karabalayeva, D. E., Aldibekova, A. R., & Sramkó, G. (2026). The ratio of boreal and steppe floristic elements in phytocoenoses involving Populus alba, P nigra, P. tremula and P.× canescens in the Zhaiyk river floodplain. *International Journal of Biology and Chemistry, 19*(1), 78-98. https://doi.org/10.26577/IJBCh20261917

Asokan, S. M., Mariappan, R., Muthusamy, S., & Velmurugan, B. K. (2018). Pharmacological benefits of neferine-A comprehensive review. *Life sciences, 199*, 60-70. https://doi.org/10.1016/j.lfs.2018.02.032

Chen, S., Li, X., Wu, J., Li, J., Xiao, M., Yang, Y., Liu, Z., & Cheng, Y. (2021). Plumula Nelumbinis: A review of traditional uses, phytochemistry, pharmacology, pharmacokinetics and safety. *Journal of Ethnopharmacology, 266*, 113429. https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.113429

Chen, G., Zhu, M., & Guo, M. (2019). Research advances in traditional and modern use of Nelumbo nucifera: phytochemicals, health promoting activities and beyond. *Critical reviews in food science and nutrition, 59*(1), 189-S209. https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1553846

Darbayeva, T. E., Alzhanova, B. S., Kaysagalieva, G. S., Sarsenova, A. N., & Bokhorova, S. N. (2026). Редкие сообщества типчаково-ковыльных степей окрестностей озера Шалкар. *BULLETIN of the LN Gumilyov Eurasian National University. Bioscience series, 155*(2), 57-74. https://doi.org/10.32523/2616-7034-2026-155-2-57-74

Deng, J., Chen, S., Yin, X., Wang, K., Liu, Y., Li, S., & Yang, P. (2013). Systematic qualitative and quantitative assessment of anthocyanins, flavones and flavonols in the petals of 108 lotus (Nelumbo nucifera) cultivars. *Food Chemistry, 139*(1-4), 307-312. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.02.010

Duke, J. A. (2002). *Handbook of medicinal herbs* (2nd ed.). CRC Press.

GBIF Secretariat. (2026). *GBIF backbone taxonomy* [Checklist dataset]. https://doi.org/10.15468/39omei

Guo, H. B. (2009). Cultivation of lotus (Nelumbo nucifera Gaertn. ssp. nucifera) and its utilization in China. *Genetic Resources and Crop Evolution, 56*(3), 323-330. https://doi.org/10.1007/s10722-008-9366-2

Islam, M. R., Zhang, Y., Li, Z. Z., Liu, H., Chen, J. M., & Yang, X. Y. (2020). Genetic diversity, population structure, and historical gene flow of Nelumbo lutea in USA using microsatellite markers. *Aquatic Botany, 160*, 103162. https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2019.103162

Limwachiranon, J., Huang, H., Shi, Z., Li, L., & Luo, Z. (2018). Lotus flavonoids and phenolic acids: Health promotion and safe consumption dosages. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 17*(2), 458-471. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12333

Lin, Z., Zhang, C., Cao, D., Damaris, R. N., & Yang, P. (2019). The latest studies on lotus (Nelumbo nucifera)-an emerging horticultural model plant. *International journal of molecular sciences, 20*(15), 3680. https://doi.org/10.3390/ijms20153680

Ming, R., VanBuren, R., Liu, Y., Yang, M., Han, Y., Li, L.-T., Zhang, Q., Kim, M.-J., Schatz, M. C., Campbell, M., Li, J., Bowers, J. E., Tang, H., Lyons, E., Ferguson, A. A., Narzisi, G., Nelson, D. R., Blaby-Haas, C. E., Gschwend, A. R., ... Shen-Miller, J. (2013). Genome of the long-living sacred lotus (Nelumbo nucifera Gaertn.). *Genome Biology, 14*(5), R41. https://doi.org/10.1186/gb-2013-14-5-r41

Mukherjee, P. K., Mukherjee, D., Maji, A. K., Rai, S., & Heinrich, M. (2009). The sacred lotus (Nelumbo nucifera)–phytochemical and therapeutic profile. *Journal of Pharmacy and Pharmacology, 61*(4), 407-422. https://doi.org/10.1211/jpp.61.04.0001

Paudel, K. R., & Panth, N. (2015). Phytochemical profile and biological activity of Nelumbo nucifera. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, 2015*(1), 789124. https://doi.org/10.1155/2015/789124

Red book of Kazakhstan (2nd ed., Vol. 2, Plants, pp. 80–81). (2014). ArtPrint XXI LLP.

Royal Botanic Gardens, Kew. (б. д.). *Plants of the World Online*. https://powo.science.kew.org/

Sharma, B. R., Gautam, L. N. S., Adhikari, D., & Karki, R. (2017). A comprehensive review on chemical profiling of Nelumbo nucifera: potential for drug development. *Phytotherapy Research, 31*(1), 3-26. https://doi.org/10.1002/ptr.5732

Sheikh, S. A. (2014). Ethno-medicinal uses and pharmacological activities of lotus (Nelumbo nucifera). *Journal of Medicinal Plants Studies, 2*(6), 42-46.

Syraiyl, S., Ydyrys, A., Ahmet, A., Aitbekov, R., & Imanaliyeva, M. T. (2022). Phytochemical composition and antioxidant activity of three medicinal plants from southeastern Kazakhstan. *International Journal of Biology and Chemistry, 15*(1), 73-78. https://doi.org/10.26577/ijbch.2022.v15.i1.08

Tungmunnithum, D., Pinthong, D., & Hano, C. (2018). Flavonoids from Nelumbo nucifera Gaertn., a medicinal plant: Uses in traditional medicine, phytochemistry and pharmacological activities. *Medicines, 5*(4), 127. https://doi.org/10.3390/medicines5040127

Wang, Q., & Zhang, X. (2005). *Colored illustration of lotus cultivars in China*. China Forestry Publishing House.

Wang, Z., Li, Y., Ma, D., Zeng, M., Wang, Z., Qin, F., Chen, J., Christian, M., & He, Z. (2023). Alkaloids from lotus (Nelumbo nucifera): Recent advances in biosynthesis, pharmacokinetics, bioactivity, safety, and industrial applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 63*(21), 4867–4900. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.2009436

Yang, M., Han, Y., Xu, L., Zhao, J., & Liu, Y. (2012). Comparative analysis of genetic diversity of lotus (Nelumbo) using SSR and SRAP markers. *Scientia Horticulturae, 142*, 185-195. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.05.021

Zhang, Y., Lu, X., Zeng, S., Huang, X., Guo, Z., Zheng, Y., Tian, Y., & Zheng, B. (2015). Nutritional composition, physiological functions and processing of lotus (Nelumbo nucifera Gaertn.) seeds: A review. *Phytochemistry Reviews, 14*(3), 321–334. https://doi.org/10.1007/s11101-015-9401-9

Zhumagul, M., Rašeta, M., Iskakova, Z., Kubentayev, S., Myrzagaliyeva, A., Tleubergenova, G., Mukhtubayeva, S., Mišković, J., & Gafforov, Y. (2025). Biodiversity and phytochemical characterization of Adonis volgensis populations from central and northern Kazakhstan: Insights into bioactivity and toxicity. *Diversity, 17*(5), 352. https://doi.org/10.3390/d17050352

Абдулина, С. А. (1998). *Сосудистые растения Казахстана*.

Быков, Б. А. (1979). *Очерки истории растительного мира Казахстана и Средней Азии*.

Васильев, Н. Г., Куренцова, Г. Э., & Харкевич, С. С. (1976). Перспективы использования растительности. В *Охрана природы на Дальнем Востоке* (с. 12).

Животовский Л. А. (2001). Онтогенетические состояния, эффективная плотность и классификация популяций растений. *Экология, 1*, 3-7.

Заугольнова, Л. Б., Денисова, Л. В., & Никитина, С. В. (1993). Подходы к оценке состояния ценопопуляций растений. *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический, 98*(5), 100-108.

Иллюстрированный определитель растений Казахстана (т. 1). (1969). Наука.

Казгидромет. (б. д.). *Отчёт о климатических условиях Атырауской области за 2023 год*. https://kazhydromet.kz

Камиева, Т. Н., Кадимов, Е. Л., Сүлейменов, С. Б., & Кадимов, Б. Л. (2023). Оценка современного состояния запасов и рыбного хозяйства семейства карповых в реке Кигаш. *Вестник Северо-Казахстанского университета имени Манаша Козыбаева, 3* (59), 32-40. https://doi.org/10.54596/2958-0048-2023-3-32-40

Красная книга Казахской ССР (ч. 2, с. 233–234). (1981). Наука.

Куренцова, Г. Э. (1968). *Реликтовые растения Приморья*. Наука.

Павлов, Н. В. (ред.). (1956). *Флора Казахстана* (т. 5). Издательство Академии наук Казахской ССР.

Серебряков, И. Г. (1962). *Экологическая морфология растений*.

Скворцов, А. К. (1977). *Гербарий*.

Тауова, Н. Р. (2025). Атырау облысы Құрманғазы Қиғаш өзені аумағындағы лотос өсімдігінің экологиялық туризмін дамыту мүмкіндіктері. *Yessenov Science Journal, 52*(3), 208-215. https://doi.org/10.56525/sjqegx88

Тахтаджян, А. Л. (1987). *Система магнолиофитов*.

Турдиев, С. Ю. (1961). Нимфейные и биологические основы их культуры. *Труды Алма-Атинского ботанического сада, 130*-178.

Флора СССР (т. 22). (1955).

Черепанов, С. К. (1995). *Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР)*.

Сведения об авторах:

Оразбекова Мерей Нуржановна (автор-корреспондент) – магистр педагогических наук, докторант PhD кафедры ботаники и агроэкологии Казахского национального университета имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: merey2@gmail.com).

Аметов Абибулла – профессор кафедры ботаники и агроэкологии Казахского национального университета имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: Abibulla.Ametov@kaznu.kz).

Information about the authors:

Orazbekova Merey Nurzhankyzy – (corresponding author) Master of Pedagogical Sciences, PhD doctoral student at the Department of Botany and Agroecology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: merey2@gmail.com).

Ametov Abibulla – professor of the Department of Botany and agroecology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: Abibulla.Ametov@kaznu.kz)

Авторлар туралы мәлімет:

Оразбекова Мерей Нұржанқызы (корреспонденттік автор) – педагогика ғылымдарының магистрі, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, ботаника және агроэкология кафедрасының PhD докторанты (Алматы, Қазақстан, e-mail: merey2@gmail.com).

Аметов Абибулла – ботаника және агроэкология кафедрасының профессоры, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан, e-mail: Abibulla.Ametov@kaznu.kz).

Поступила 01 августа 2026 года
Принята 29 сентября 2026 года

МРНТИ 34.27.29, 34.23 https://doi.org/10.26577/EJE208831326

А.А. Серикбай[1*], К.Т. Султанкулова[2], С.М. Бармақ[2], Б.М. Хайруллин[2]

[1]Казахский национальный женский педагогический университет, Алматы, Казахстан
[2]ТОО «Научно-исследовательский производственный центр MVA GROUP»
Алматинская область, Казахстан
*e-mail: arai_00.0@mail.ru

КОНСТРУИРОВАНИЕ ОЛИГОНУКЛЕОТИДНЫХ ПРАЙМЕРОВ И ЗОНДА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ *TOXOCARA CANIS* МЕТОДОМ ПЦР В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Токсокароз опасное зоонозное паразитарное заболевание. Заражение происходит при попадании в организм яиц паразита *Toxocara*, которые могут находиться в загрязнённой почве или при контакте с инфицированными животными. Попадая в организм, личинки мигрируют к различным органам и поражает печень, лёгкие, глаза и другие ткани. Вызывает висцеральный и глазной мигрирующий личиночный синдром, нейротоксокароз и скрытый или обычный токсокароз. *Toxocara canis* имеет важное значение для общественного здравоохранения и экономики. Актуальность диагностики токсокароза связана с его широким распространением, зоонозным характером и проявлением тяжёлых клинических форм у человека. Целью исследования является разработка олигонуклеотидов для выявления паразита *T. canis* с помощью ПЦР в режиме реального времени. В работе проведена оценка эффективности трёх пар праймеров, разработанных для детекции T. *canis*, в целях поиска наилучшего варианта для использования в ПЦР в режиме реального времени. Исследованные олигонуклеотиды локализованы в гене ITS2 и обеспечивают амплификацию специфических фрагментов ожидаемого размера, что подтверждает их высокую специфичность и корректность дизайна. Наиболее высокая эффективность амплификации выявлена для пары праймеров T_can F2/R2 (105 п.о.), что подтверждается интенсивностью полученной полосы. Полученные более слабые ПЦР продукты для пар T_can F1/R1 и T_can F3/R3, вероятно, связаны с особенностями их связывания с матричной ДНК или формированием вторичных структур. Праймеры T_can F2, T_can R2 и зонд T_can Probe2 демонстрируют эффективную и специфичную работу в ПЦР в режиме реального времени, обеспечивая надёжную детекцию *T. canis*. Предложенные олигонуклеотиды будут рекомендованы для разработки диагностических тест-систем на основе ПЦР в режиме реального времени. Это важно для раннего предупреждения распространения паразитов, таким образом снижает риск осложнений и повышает эпидемиологическую безопасность.

Ключевые слова: *Toxocara canis*, ПЦР, ITS2.

A.A. Serikbay[1*], K.T. Sultankulova[2], S.M. Barmak[2], B.M. Khairullin[2]

[1]Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty, Kazakhstan
[2]«MVA GROUP» Research and Production Center LLP, Almaty Region, Kazakhstan
[*]e-mail: arai_00.0@mail.ru

Design of oligonucleotide primers and a probe for the detection of *Toxocara canis* by real-time PCR

Toxocariasis is a dangerous zoonotic parasitic disease. Infection occurs when eggs of the parasite Toxocara enter the body; these eggs may be present in contaminated soil or transmitted through contact with infected animals. Once inside the body, larvae migrate to various organs and affect the liver, lungs, eyes, and other tissues. It causes visceral and ocular larva migrans syndrome, neurotoxocariasis, and covert or common toxocariasis. Toxocara canis is of significant importance for public health and the economy. The relevance of toxocariasis diagnosis is associated with its wide distribution, zoonotic nature, and manifestation of severe clinical forms in humans.

The aim of this study was to develop oligonucleotides for the detection of T. canis using real-time PCR. The efficiency of three primer pairs designed for T. canis detection was evaluated in order to identify the best option for use in real-time PCR. The studied oligonucleotides are located within the ITS2 gene and provide amplification of specific fragments of the expected size, confirming their high specificity and proper design. The highest amplification efficiency was observed for the primer pair T_can F2/

 © 2026 Al-Farabi Kazakh National University

R2 (105 bp), as confirmed by the intensity of the obtained band. The weaker PCR products obtained for T_can F1/R1 and T_can F3/R3 were probably associated with особенностями their binding to template DNA or the formation of secondary structures.

The primers T_can F2, T_can R2, and the probe T_can Probe2 demonstrated efficient and specific performance in real-time PCR, ensuring reliable detection of T. canis. The proposed oligonucleotides are recommended for the development of diagnostic test systems based on real-time PCR. This is important for early prevention of parasite spread, thereby reducing the risk of complications and increasing epidemiological safety.

Key words: *Toxocara canis*, PCR, ITS2.

А.А. Серикбай[1*], К.Т. Султанкулова[2], С.М. Бармақ[2], Б.М. Хайруллин[2]

[1]Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан
[2]«MVA GROUP» ғылыми-зерттеу өндірістік орталығы» ЖШС, Алматы облысы, Қазақстан
[*]e-mail: arai_00.0@mail.ru

Toxocara canis-ті нақты уақыттағы ПТР әдісі арқылы анықтауға арналған олигонуклеотидті праймерлер мен зондты құрастыру

Токсокароз – қауіпті зоонозды паразиттік ауру. Жұқтыру Toxocara паразитінің жұмыртқалары ағзаға түскен кезде болады, олар ластанған топырақта болуы немесе зақымданған жануарлармен байланыс кезінде жұғуы мүмкін. Ағзаға түскеннен кейін дернәсілдер әртүрлі мүшелерге миграция жасап, бауырды, өкпені, көзді және басқа тіндерді зақымдайды. Ол висцералды және көздік миграциялық дернәсіл синдромын, нейротоксокарозды, сондай-ақ жасырын немесе кәдімгі токсокарозды тудырады. Toxocara canis қоғамдық денсаулық сақтау мен экономика үшін маңызды мәнге ие. Токсокароз диагностикасының өзектілігі оның кең таралуымен, зооноздық сипатымен және адамда ауыр клиникалық түрлерінің байқалуымен байланысты.

Зерттеудің мақсаты – T. canis паразитін нақты уақыт режиміндегі ПТР көмегімен анықтауға арналған олигонуклеотидтерді әзірлеу. Жұмыста T. canis-ті детекциялауға арналған үш жұп праймердің тиімділігі бағаланып, нақты уақыт режиміндегі ПТР үшін ең тиімді нұсқасы таңдалды. Зерттелген олигонуклеотидтер ITS2 генінде орналасқан және күтілетін мөлшердегі спецификалық фрагменттердің амплификациясын қамтамасыз етеді, бұл олардың жоғары спецификалығын және дұрыс дизайнын дәлелдейді. Амплификацияның ең жоғары тиімділігі T_can F2/R2 праймер жұбында (105 ж.н.) анықталды, бұл алынған жолақтың қарқындылығымен расталады. T_can F1/R1 және T_can F3/R3 жұптары үшін алынған әлсіздеу ПТР өнімдері, ықтимал, олардың матрицалық ДНҚ-мен байланысу ерекшеліктеріне немесе екіншілік құрылымдардың түзілуіне байланысты.

T_can F2, T_can R2 праймерлері және T_can Probe2 зонды нақты уақыт режиміндегі ПТР-де тиімді әрі спецификалық жұмыс көрсетіп, T. canis-ті сенімді анықтауды қамтамасыз етеді. Ұсынылған олигонуклеотидтер нақты уақыт режиміндегі ПТР негізіндегі диагностикалық тест-жүйелерді әзірлеу үшін ұсынылады. Бұл паразиттердің таралуын ерте кезеңде алдын алуға, асқынулар қаупін төмендетуге және эпидемиологиялық қауіпсіздікті арттыруға маңызды.

Түйін сөздер: *Toxocara canis*, ПТР, ITS2.

Введение

Токсокароз является одной из наиболее значимых зоонозных паразитарных инфекций, представляющих серьёзную угрозу для здоровья человека. Возбудителями заболевания являются нематоды рода Toxocara, основными хозяевами которых служат собаки и кошки (Macpherson, 2013, Chen et al., 2018, Strube et al., 2013). Человек заражается при случайном проглатывании инвазионных яиц паразита, содержащихся в загрязнённой почве (Macpherson, 2013), воде, на овощах, фруктах (Kozan et al., 2005, Magnaval et al., 2001), или через контакт с шерстью инфицированных животных (Oge et al., 2013). Попадая в организм человека, личинки токсокар мигрируют по различным органам и тканям, вызывая развитие висцеральной, глазной и кожной форм токсокароза. Заболевание может сопровождаться поражением печени, лёгких, центральной нервной системы и органов зрения, что в ряде случаев приводит к тяжёлым клиническим осложнениям и снижению качества жизни пациентов (Alkhafaji, 2024). Особую группу риска составляют дети, которые чаще контактируют с почвой и домашними животными, что повышает вероятность инфицирования. В связи с этим токсокароз рассматривается как важная медико-ветеринарная и социально значимая проблема во многих странах мира.

В Республике Казахстан токсокароз собак, вызываемый *Toxocara canis*, широко распространён и рассматривается как важный источник зоонозной инвазии. По данным паразитологических исследований, заражённость городских собак может достигать 38,6 %, что свидетельствует о значительном загрязнении городской среды яйцами паразита. При этом наибольшая интенсивность инвазии отмечается у молодых животных, которые играют ключевую роль в поддержании циркуляции возбудителя и контаминации почвы инвазионными яйцами (Valieva et al., 2024).

В отдельных исследованиях, проведённых в Казахстане, *Toxocara canis* выявлялась у 17 % обследованных собак, что подтверждает её высокую распространённость среди кишечных паразитов плотоядных животных (Kushmukhanov et al., 2025).

Дополнительно показано, что максимальная заражённость регистрируется у собак в возрасте 6–12 месяцев, что связано с особенностями жизненного цикла паразита и повышенной восприимчивостью молодых животных (Rustemova, 2012).

Собаки играют ключевую роль в эпидемиологии зоонозного паразита (Macpherson, 2013; Strube et al., 2013). После эмбрионации яйца становятся источником инфекции не только для окончательных и промежуточных хозяев, как различные виды мелких грызунов, другие млекопитающие, птицы и беспозвоночные, но и для человека (Strube et al., 2013). Считается, что при оптимальных условиях яйца *Toxocara spp.* способны сохраняться в окружающей среде до 4 лет (Macpherson, 2013).

Сообщаемая распространённость *Toxocara spp.* в Германии в период с 2003 по 2012 годы варьировала от 0,9% до 6,1% у собак на основании результатов исследований нерепрезентативно отобранных фекальных образцов, поступивших в диагностические лаборатории (Kushmukhanov et al., 2025). Кроме того, в другом исследовании была зарегистрирована средняя распространённость *Toxocara spp.* на уровне 4,6% у собак в 2004–2006 годах (Vrhovec et al., 2022). В 2015–2017 годах *Toxocara spp.* была выявлена в 3,8% – 5,9% фекальных образцах собак (Vrhovec et al., 2022, Rostami et al., 2020).

Согласно крупному систематическому обзору и мета-анализу, охватившему 250 исследований из 71 страны с общей выборкой более 265 000 человек, глобальная серопревалентность антител к *Toxocara* spp. у людей составляет примерно 19 % (95 % CI 16,6–21,4 %), что эквивалентно примерно 1,4 млрд человек во всём мире. Это свидетельствует о том, что примерно каждый пятый человек на планете контактировал с инфекцией *Toxocara* или имел с ней иммунологический ответ (Rostami et al., 2019).

Традиционные методы диагностики токсокароза у людей чаще всего основаны на серологических тестах (ELISA), однако они имеют ограничения в чувствительности и специфичности и часто не позволяют отличить активную или недавно перенесённую инфекцию от прошлых контактов с паразитом. Это особенно актуально в контексте раннего выявления и диагностики, особенно у пациентов с бессимптомным или легким течением болезни. Эффективная диагностика также затрудняется тем, что паразиты редко продуцируют яйца в организме человека, и обнаружение их в фекалиях маловероятно (Pinelli et al., 2013).

Молекулярная диагностика токсокароза основана на применении ПЦР в режиме реального времени, которая позволяет выявлять ДНК *Toxocara canis* с высокой чувствительностью и специфичностью. Важным этапом разработки ПЦР в режиме реального времени является конструирование специфических олигонуклеотидных праймеров и флуоресцентного зонда, направленных на консервативные участки генома паразита. Правильно подобранные праймеры и зонд обеспечивают селективную амплификацию целевой ДНК и точную детекцию возбудителя в исследуемом материале, что повышает эффективность лабораторной диагностики.

ПЦР в режиме реального времени позволяет обнаруживать и количественно определять ДНК *Toxocara* spp. прямо в клинических образцах. Это критически важно для раннего выявления инфекции, мониторинга эффективности лечения и эпидемиологических исследований.

Целью настоящего исследования является конструирование и биоинформатический анализ специфических олигонуклеотидных праймеров и флуоресцентного зонда для разработки высокочувствительного и специфичного метода ПЦР в режиме реального времени, предназначенного для молекулярного выявления *Toxocara canis*.

Материалы и методы

Биоматериалы

В качестве объекта исследования в работе использовали ДНК *Toxocara canis,* выделенные из образцов кала собак.

Выделение ДНК Toxocara canis

Геномную ДНК из яиц *Toxocara* spp. выделяли с помощью набора QIAamp DNA Mini Kit (Qiagen) в соответствии с инструкцией производителя. Образцы предварительно подвергали трем циклам замораживания-оттаивания, а обработку протеиназой К проводили в течение ночи (<16 ч) (Borecka&Gawor, 2008, Khademvatan et al., 2013).

Выравнивание нуклеотидных последовательностей

Для анализа и сравнения нуклеотидных последовательностей использовалась программа MEGA версии 11.0 (Molecular Evolutionary Genetics Analysis) (Tamura K.et al., 2021). Нуклеотидные последовательности целевых генов были получены из базы данных GenBank (NCBI) в формате FASTA и импортированы в MEGA 11 через модуль Align→Edit/Build Alignment. Выравнивание последовательностей проводилось с использованием встроенного алгоритма ClustalW, обеспечивающего оптимальное сопоставление гомологичных нуклеотидов.

Подбор и анализ праймеров в Vector NTI Advance™

Для конструирования пар праймеров использовалась программа Vector NTI Advance™ (Thermo Fisher Scientific, США) – интегрированная биоинформационная платформа для молекулярно-биологических расчетов и визуализации последовательностей. В «Primer Design» проводился автоматический подбор праймеров для амплификации и клонирования целевых генов. Нуклеотидная последовательность гена в формате FASTA была импортирована в модуль Vector NTI→Tools→Primer Design. (Invitrogen™ Vector NTI Advance™ 11 User Guide. Thermo Fisher Scientific). Параметры подбора устанавливали следующим образом: длина праймера 18-25 нуклеотидов; содержание GC 40–60 %; температура плавления 55–69 °C; отсутствие вторичных структур (димеров, шпилек, гомополимеров); отсутствие комплементарности между праймерами (Rozen& Skaletsky, 2000).

Постановка ПЦР и ПЦР в режиме реального времени

Для проведения ПЦР использовали амплификатор SimplyAmp™ Thermal Cycler (Thermo Fisher Scientific). ПЦР в режиме реального времени проводилась на термоциклере Rotor-Gene Q (Qiagen). Объем реакционной смеси составлял 25 мкл. Смесь для амплификации ДНК состоит из следующих компонентов: Taq ДНК полимераза – 0,5 мкл (5 ед/мкл); 10х ПЦР-буфер – 2,5 мкл; специфические праймеры (20 пМ) прямой и обратный праймер – по 0,5 мкл каждого (в случае проведения ПЦР в режиме реального времени используется дополнительно зонд 0,5 мкл /10 пМ); смесь дНТФ (10 мМ) – 1 мкл; 25 мМ раствор $MgCl_2$ – 1 мкл; ДНК – 5 мкл; деионизированная вода – до 25 мкл.

Температурно-временные параметры амплификации: предварительная денатурация при 94^0C – 2 мин, 30 циклов, состоящих из денатурации при 94^0C – 30 с, отжига праймеров при 58^0C – 20 с., элонгации 72^0C – 20 с; финальный синтез 72^0C – 7 мин.

Электрофоретический анализ ПЦР продуктов

Анализ продуктов ПЦР проведен при помощи электрофореза в 2 % агарозном геле, содержащем бромистый этидий (1 мкг/мл). Электрофорез проводят при напряжении 6 В/см2 на электрофоретическом аппарате (Biobase), в качестве электродного буфера использовали 1xTAE-буфер.

Результаты электрофореза учитывают в ультрафиолетовом свете с длиной волны 254 нм на гель документирующем приборе (Biobase). Размеры молекул анализируемых образцов ДНК определяли путем сопоставления их электрофоретической подвижности маркеров – фрагмента ДНК известной молекулярной массы. В качестве маркера молекулярных масс использовали 50 bp DNA Ladder (Biolabs). Положительными считаются пробы, в которых полосы в геле располагаются точно на таком же расстоянии от старта, что и полосы положительных контролей. При выявлении ДНК *Toxocara canis* наблюдаются полосы ДНК размером 125, 105, 98 п.о. В отрицательном контроле не должно выявляться никакие полосы.

Результаты и их обсуждение

Проведен выбор целевых генов, разработка праймеров и флуоресцентно-меченых зондов для ПЦР тест-системы в режиме реального времени для диагностики *Toxocara canis*

Ген рибосомной РНК, в частности внутренний транскрибируемый спейсер – ITS2, был ис-

пользован для быстрой и специфической идентификации *Toxocara canis* в образцах фекалий и почвы (Durant et al., 2012).

Для множественного выравнивания нуклеотидных последовательностей из генетической базы данных GenBank отобраны геномы изолятов из рода *Toxocara* spp. Из рода *Toxocara* spp анализировали гены ITS2 видов *Toxocara canis, Toxocara cati, Toxocara leonina, Toxocara vitulorum и Toxocara malaysiensis* (таблица 1).

Таблица 1

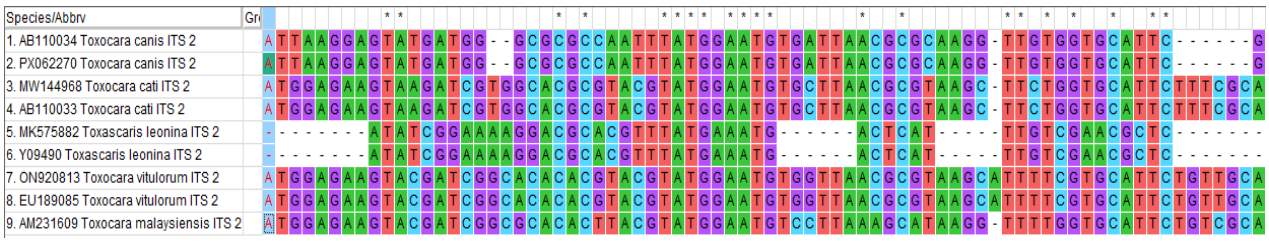
Номера регистрации в базе данных GenBank изолятов рода Toxocara spp

Наименование рода паразита	Идентификационные номера изолятов в базе данных GenBank
1	2
Toxocara spp	*Toxocara cati* [Genbank: AB110033], *Toxocara cati* [Genbank: MW144968], *Toxocara leonina* [Genbank:Y09490], *Toxocara leonina* [Genbank: MK575882], *Toxocara vitulorum* [Genbank:EU189085], *Toxocara vitulorum* [Genbank: ON920813], *Toxocara malaysiensis* [Genbank:AM231609], Toxocara canis [Genbank: AB110034], *Toxocara canis* [Genbank: PX062270], *Toxocara canis* [Genbank: MG214150], *Toxocara canis* [Genbank: KJ7771561], *Toxocara canis* [Genbank: LC133352], *Toxocara canis* [Genbank: KJ7771551], *Toxocara canis* [Genbank: LC762621], *Toxocara canis* [Genbank: AB110032], *Toxocara canis* [Genbank: MK728991]

Выравнивание нуклеотидных последовательностей проводили с использованием программы Mega v.11 по алгоритму ClustalW. На основе результатов множественного выравнивания нуклеотидных последовательностей определены участки гена внутреннего транскрибируемого спейсера ITS2, которые специфичны к *Toxocara canis* (рисунок 1).

Рисунок 1

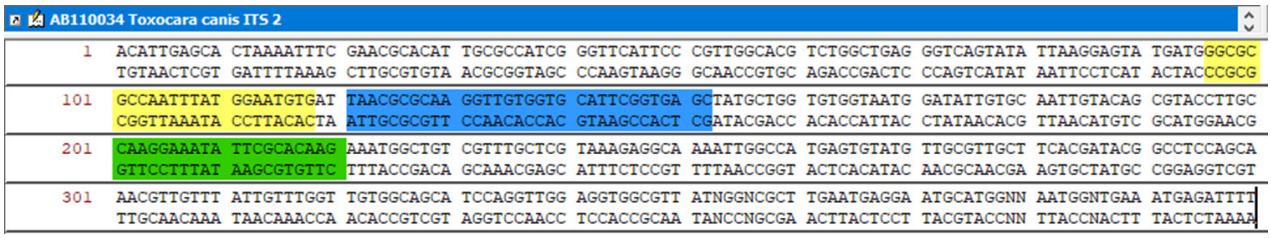
Фрагмент множественного выравнивания последовательностей нуклеотидов внутреннего транскрибируемого спейсера ITS2 рибосомной РНК рода Toxocara spp. в программе Mega 11



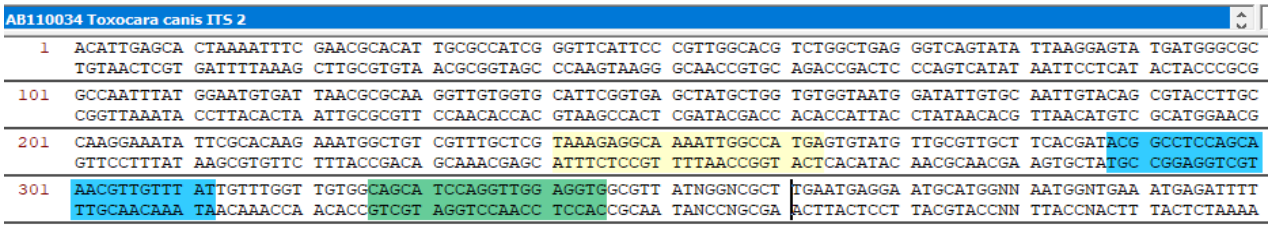
В наших исследованиях по подбору специфических праймеров и зондов, исследовали ген ITS2, поскольку в данном участке генома имеются специфические высококонсервативные сайты для идентификации *Toxocara canis*. Выравнивание демонстрирует как высококонсервативные, так и вариабельные участки исследуемого региона. Наиболее высокая степень сходства наблюдается между последовательностями *Toxocara canis*, что свидетельствует о низком уровне внутривидовой вариабельности ITS2. Последовательности *Toxocara cati* также характеризуются значительной гомологией с *Toxocara canis*, однако содержат ряд нуклеотидных замен, позволяющих дифференцировать данные виды. Нуклеотидные последовательности внутреннего транскрибируемого спейсера ITS2 рибосомной РНК рода *Toxocara* spp (виды *Toxocara canis, Toxocara cati, Toxocara leonina, Toxocara vitulorum и Toxocara malaysiensis*) отличаются друг от друга, включая нуклеотидные замены, вставки и делеции в выравнивании.

После множественного выравнивания последовательностей ITS2 различных видов *Toxocara* с использованием программы Vector NTI были разработаны праймеры и зонды для специфичной идентификации *T. canis* (рисунок 2).

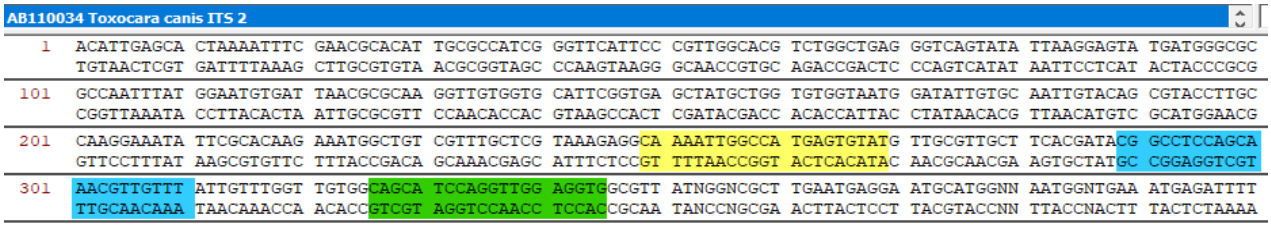
Рисунок 2
Подбор праймеров и зонда к ITS2 для выявления Toxocara canis с использованием программы Vector NTI



Олигонуклеотиды T_can F1, T_can R1, T_can Probe1



Олигонуклеотиды T_can F2, T_can R2, T_can Probe2



Олигонуклеотиды T_can F3, T_can R3, T_can Probe3

Выбранные олигонуклеотиды были протестированы in silico со всеми общедоступными базами данных нуклеотидных последовательностей с помощью BLASTN на сайте https://blast.ncbi.nlm.nih.gov

При конструировании праймеров и зондов соблюдали важные параметры, такие как: длина праймера; температура плавления, специфичность, комплементарная последовательность праймер, G/C содержание и полипиримидиновые или полипуриновые протяженные участки, вторичная структура сайта-мишени, вторичная структура праймера, гомо- и гетеродимеризация праймеров.

Для дальнейших работ были выбраны олигонуклеотиды, показывающие 100% специфичность с *Toxocara canis* (таблица 2).

Таблица 2
Параметры праймеров и зондов, специфичных к Toxocara canis по гену ITS2

Название праймера/зонда	Праймер/зонд (5′→3′)	Длина	Позиция	GC%	Tm, °C	Размер п.н.
T_can F1	GGCGCGCCAATTTATGGAATGTG	23	96–108	50,0	58,0	125
T_can R1	CTTGTGCGAATATTTCCTTG	20	201–220	40,0	56,0	
T_can Probe1	FAM-TAACGCGCAAGGTTGTGGTGCATTCGGTGAGC-BHQ1	32	221-153	56,25	69,0	

Продолжение таблицы

Название праймера/ зонда	Праймер/зонд (5′→3′)	Длина	Позиция	GC%	Tm, °C	Размер п.н.
T_can F2	TAAAGAGGCAAAATTGGCCATGA	23	241–263	39	58	105
T_can R2	CACCTCCAACCTGGATGCTG	20	326–345	60	57	
T_can Probe2	FAM-ACGGCCTCCAGCAAACGTTGTTTAT-BHQ1	25	288–312	48	67	
T_can F3	GCAAAATTGGCCATGAGTGTAT	22	248–269	40	55	98
T_can R3	CACCTCCAACCTGGATGCTG	20	326–345	60	57	
T_can Probe3	FAM-ACGGCCTCCAGCAAACGTTGTTT-BHQ1	23	288–310	52	64	

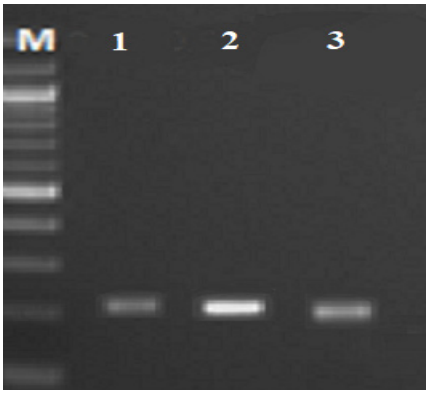
Анализ результатов ПЦР и ПЦР в режиме реального времени для выявления ДНК Toxocara canis

По результатам ПЦР получены специфические ампликоны для всех трёх пар праймеров. В дорожках наблюдаются фрагменты ожидаемого размера – 125 п.о. с праймерами T_can F1/R1, 105 п.о. с праймерами T_can F2/R2, 98 п.о. с праймерами T_can F3/R3. На рисунке 3А наиболее интенсивная полоса амплификации наблюдается с праймерами T_can F2/R2, что свидетельствует о более высокой эффективности амплификации данной пары праймеров.

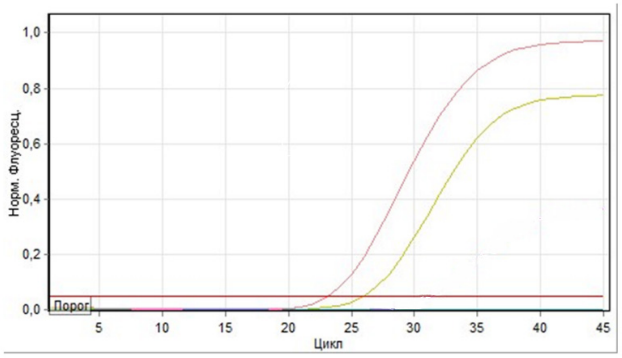
Для пар праймеров T_can F1/R1 и T_can F3/R3 также получены специфические продукты, однако интенсивность полос ниже, что может указывать на менее эффективную амплификацию или более низкую чувствительность (рисунок 3).

Рисунок 3

Результаты проведения ПЦР (3А) и ПЦР в режиме реального времени (3Б) с использованием олигонуклеотидов на Toxocara canis



А: Электрофореграмма ПЦР продуктов, полученных с использованием трех пар праймеров: 1 – T_canF1/R1 (125 п.о.); 2 – T_canF2/R2 (105 п.о.); 3 – T_canF3/R3 (98 п.о.); M – 50 bp DNA Ladder (Biolabs)



Б: Результаты выявления ДНК Toxocara canis в ПЦР в режиме реального времени с пороговыми значениями Ct23 и Ct26 с использованием праймеров T_can F2, T_can R2 и зонда T_can Probe2

На рисунке 3Б при ПЦР амплификации в режиме реального времени наблюдаются характерные кривые накопления флуоресцентного сигнала для исследуемых образцов *Toxocara canis*. Ct23 и Ct26 показывают о высокой концентрации целевой ДНК в образце. Обе кривые демонстрируют экспоненциальную фазу с последующим выходом на плато, что подтверждает корректное протекание ПЦР в режиме реального времени. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о специфической и эффективной амплификации целевого фрагмента гена ITS2 *Toxocara canis*.

Диагностика токсокароза остаётся актуальной проблемой паразитологии в связи с распространением паразитов и трудностями раннего выявления гельминтов у человека. Традиционные паразитологические методы для обнаружения яиц или личинок, применяются ограниченно, поскольку у человека *Toxocara canis* не достигает зрелой стадии и это существенно снижает диагностическую ценность копрологических исследований (Nikopoulou et al., 2025). В клинической практике наибольшее распространение получили серологические методы, прежде всего иммуноферментный анализ (ИФА), направленный на выявление антител к антигенам *Toxocara* (Jin et al., 2013). К другим диагностическим методам относятся иммуноблоттинг и непрямой флуоресцентный тест с антителами Однако из-за перекрестных реакций и автофлуоресценции эти методы могут быть ненадежными (Ebrahimi et al., 2025). В связи с этим большее значение имеют молекулярно-генетические методы, в частности ПЦР в режиме реального времени, обеспечивающая высокую специфичность за счёт детекции уникальных участков генома паразита, таких как ITS-регион (Cobzaru et al., 2025). Использование ПЦР в режиме реального времени повышает чувствительность анализа, позволяет проводить количественную оценку ДНК и снижает риск контаминации благодаря закрытому формату реакции (Thornton&Basu, 2011). Это приводит ПЦР в режиме реального времени к перспективному инструменту для ранней и точной диагностики токсокароза, особенно в сложных клинических случаях и при низкой паразитарной нагрузке.

Нами проведена оценка эффективности трёх пар праймеров, разработанных для детекции *Toxocara canis*, с целью выбора оптимального варианта для дальнейшего использования в ПЦР тест-системе.

В ПЦР анализе все исследованные пары праймеров обеспечивают амплификацию специфических фрагментов ожидаемого размера, что свидетельствует о корректности их дизайна и высокой специфичности к целевым участкам гена ITS2 ДНК *Toxocara canis*. Отсутствие неспецифических продуктов амплификации и праймер-димеров подтверждает соответствие разработанных праймеров общепринятым требованиям к дизайну олигонуклеотидов (Valieva et al., 2024). Наиболее интенсивная полоса наблюдалась для пары праймеров T_can F2/R2 (ампликон 105 п.о.), что указывает на её преимущество по сравнению с другими парами праймеров. Эффективность амплификации напрямую зависит от таких параметров, как длина праймеров, GC-состав, температура плавления и отсутствие вторичных структур, влияющих на стабильность гибридизации (Valieva et al., 2024). Слабые полосы для пар T_can F1/R1 и T_can F3/R3 могут быть связаны с условиями связывания праймеров с матрицей или частичным образованием вторичных структур, что снижает эффективность реакции.

Праймеры T_can F2/R2 обладает хорошими характеристиками и может быть рекомендованы для дальнейшего использования, в том числе при разработке диагностических ПЦР тест-систем. Анализ кривых амплификации ПЦР в режиме реального времени с использованием праймеров T_can F2, T_can R2 и зонда T_can Probe2 показал, что, кривые демонстрируют типичную сигмоидальную форму с выраженной экспоненциальной фазой и последующим выходом на плато, что подтверждает корректность протекания ПЦР в режиме реального времени. Таким образом, проведённый анализ позволил выбрать оптимальную пару праймеров и зонда для детекции *T_canis,* что является важным этапом в создании надежной и чувствительной молекулярно-диагностической системы.

Заключение

Разработанные праймеры обеспечивают специфичную амплификацию ДНК *Toxocara canis* в классической ПЦР, что подтверждает корректность их дизайна и пригодность для молекулярной диагностики. При этом наилучшие результаты получены праймерами T_can F2/R2, обеспечивающими наилучшее накопление ампликона. Таким образом, праймеры T_can F2, T_can R2 и зонд T_can Probe2 успешно функционируют в ПЦР в режиме реального времени, где осуществлена чувствительная и количественная детекция целевой ДНК *Toxocara canis*. Таким образом, предложенные олигонуклеотиды рекомендованы для разработки высокочувствительных диагностических тест-систем на основе ПЦР в режиме реального времени.

Конфликт интересов

Все авторы прочитали и ознакомлены с содержанием статьи и не имеют конфликта интересов.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке научно-технической программы Республики Казахстан на 2025–2027 годы. Финансирование предоставлено в рамках НТП «Научно-технологическое обеспечение биологической безопасности Республики Казахстан в области медицинской паразитологии», №270/25-27 от 26.09.2025 г.

Вклад авторов

Серикбай А.А.: разработка концепции, методологии, редактирование и доработка рукописи; Султанкулова К.Т.: разработка концепции, научное руководство, управление проектом, редактирование и доработка рукописи; Бармақ С.М.: проведение исследования, сбор и обработка данных, валидация данных, редактирование и доработка рукописи; Хайруллин Б.М.: разработка концепции, научное руководство, редактирование и доработка рукописи.

References

Alkhafaji, I. (2024) Investigation of the distribution of some gastrointestinal helminths and protozoa in free-ranging dogs in Karbala province. Journal of Kerbala for Agricultural Sciences, vol. 11, no. 1, pp. 57–64.

Borecka, A., Gawor, J. (2008) Modification of gDNA extraction from soil for PCR designed for the routine examination of soil samples contaminated with Toxocara spp. eggs. Journal of Helminthology, vol. 82, no. 2, pp. 119–122.

Chen, J., Liu, Q., Liu, G.-H., Zheng, W.-B., Hong, S.-J., Sugiyama, H., et al. (2018) Toxocariasis: A silent threat with a progressive public health impact. Infectious Diseases of Poverty, vol. 7, article 59. https://doi.org/10.1186/s40249-018-0437-0

Cobzaru, R.G., Ripa, C.V., Ursu, R.G., Damian, C., Iancu, L.S. (2025) Toxocara Seroprevalence in Europe and Considerations for Future Research. Pathogens, vol. 14, no. 11, article 1117. https://doi.org/10.3390/pathogens14111117

Dieffenbach, C.W., Lowe, T.M., Dveksler, G.S. (1993) General concepts for PCR primer design. PCR Methods and Applications, vol. 3, no. 3, pp. S30–S37.

Durant, J.-F., Irenge, L.M., Fogt-Wyrwas, R., Mizgajska-Wiktor, H., Gala, J.-L. (2012) Duplex quantitative real-time PCR assay for the detection and discrimination of the eggs of Toxocara canis and Toxocara cati (Nematoda, Ascaridoidea) in soil and fecal samples. Parasites & Vectors, vol. 5, article 288. https://doi.org/10.1186/1756-3305-5-288

Ebrahimi, M., Sadjjadi, S.M., Tahvildar Bidroni, F., Javadi Mamaghani, A., Mohammadzadeh, T., Heydarifard, Z., Seyyed Tabaei, S.J. (2025) Developing a serological test for the diagnosis of toxocarasis using a novel recombinant multi-epitope. Microbial Pathogenesis, vol. 204, article 107576. https://doi.org/10.1016/j.micpath.2025.107576

Jin, Y., Shen, C., Huh, S., Sohn, W.M., Choi, M.H., Hong, S.T. (2013) Serodiagnosis of toxocariasis by ELISA using crude antigen of Toxocara canis larvae. Korean Journal of Parasitology, vol. 51, no. 4, pp. 433–439. https://doi.org/10.3347/kjp.2013.51.4.433

Khademvatan, S., Rahim, F., Tavalla, M., Abdizadeh, R., Hashemitabar, M. (2013) PCR-Based Molecular Characterization of Toxocara spp. Using Feces of Stray Cats: A Study from Southwest Iran. PLoS ONE, vol. 8, no. 6, e65293. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065293

Kozan, E., Gonenc, B., Sarimehmetoglu, O., Aycicek, H. (2005) Prevalence of helminth eggs on raw vegetables used for salads. Food Control, vol. 16, no. 3, pp. 239–242. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2004.02.005

Kushmukhanov, Z., Sarybaeva, D., Yessenguloova, N., Zhumabaev, A. (2025) Prevalence and species diversity of helminth invasions in dogs from Oral city and surrounding areas. Green Biology Journal, vol. 1, no. 2, pp. 40–45.

Macpherson, C.N.L. (2013) The epidemiology and public health importance of toxocariasis: A zoonosis of global importance. International Journal for Parasitology, vol. 43, pp. 999–1008. https://doi.org/10.1016/j.ijpara.2013.07.004

Magnaval, J.F., Glickman, L.T., Dorchies, P., Morassin, B. (2001) Highlights of human toxocariasis. Korean Journal of Parasitology, vol. 39, no. 1, pp. 1–11. https://doi.org/10.3347/kjp.2001.39.1.1

Nikopoulou, A., Sideras, L., Peristeri, A.M., Ligda, P., Akritidou, O., Sotiraki, S. (2025) Human Toxocariasis: Presenting a Case Report of Eosinophilic Myocarditis Associated with Toxocara canis Infection and a Literature Review. Microbiology Research, vol. 16, no. 3, article 58. https://doi.org/10.3390/microbiolres16030058

Oge, H., Oge, S., Ozbakis, G., Gurcan, I.S. (2013) Presence of Toxocara eggs on the hair of dogs and cats. Ankara Universitesi Veteriner Fakultesi Dergisi, vol. 60, pp. 171–176. https://doi.org/10.1501/Vetfak_0000002573

Pinelli, E., Roelfsema, J.H., Brandes, S., Kortbeek, T. (2013) Detection and identification of Toxocara canis DNA in bronchoalveolar lavage of infected mice using a novel real-time PCR. Veterinary Parasitology, vol. 193, no. 4, pp. 337–341. https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2012.12.029

Raue, K., Heuer, L., Bohm, C., Wolken, S., Epe, C., Strube, C. (2017) 10-year parasitological examination results (2003–2012) of faecal samples from horses, ruminants, pigs, dogs, cats, rabbits and hedgehogs. Parasitology Research, vol. 116, pp. 3315–3330. https://doi.org/10.1007/s00436-017-5646-0

Rostami, A., Riahi, S.M., Holland, C.V., Taghipour, A., Khalili-Fomeshi, M., Fakhri, Y., et al. (2019) Seroprevalence estimates for toxocariasis in people worldwide: A systematic review and meta-analysis. PLoS Neglected Tropical Diseases, vol. 13, no. 12, e0007809. https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0007809

Rostami, A., Riahi, S.M., Hofmann, A., Ma, G., Wang, T., Behniafar, H., et al. (2020) Global prevalence of Toxocara infection in dogs. Advances in Parasitology, vol. 109, pp. 561–583. https://doi.org/10.1016/bs.apar.2020.01.017

Rozen, S., Skaletsky, H. (2000) Primer3 on the WWW for General Users and for Biologist Programmers. Methods in Molecular Biology, vol. 132, pp. 365–386. https://doi.org/10.1385/1-59259-192-2:365

Rustemova, A.Sh. (2012) Rasprostranennost' toksokaroza sredi sel'skogo i gorodskogo naseleniya Respubliki Kazakhstan [Prevalence of toxocariasis among rural and urban populations of the Republic of Kazakhstan]. Vestnik Kazakhskogo Natsional'nogo Meditsinskogo Universiteta [Bulletin of the Kazakh National Medical University], no. 4, pp. 25–27.

Strube, C., Heuer, L., Janecek, E. (2013) Toxocara spp. infections in paratenic hosts. Veterinary Parasitology, vol. 193, pp. 375–389. https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2012.12.033

Tamura, K., Stecher, G., Kumar, S. (2021) MEGA11: Molecular Evolutionary Genetics Analysis Version 11. Molecular Biology and Evolution, vol. 38, no. 7, pp. 3022–3027. https://doi.org/10.1093/molbev/msab120

Thornton, B., Basu, C. (2011) Real-time PCR (qPCR) primer design using free online software. Biochemistry and Molecular Biology Education, vol. 39, no. 2, pp. 145–154.

Valieva, Zh., Abekeshev, N., Sidikhov, B., Shalmenov, M., Svotina, M. (2024) Gel'minty tonkogo otdela kishechnika sobak [Helminths of the small intestine of dogs]. Green Biology Journal, vol. 1, no. 2 (75), pp. 31–39.

Vrhovec, M.G., Alnassan, A.A., Pantchev, N., Bauer, C. (2022) Is there any change in the prevalence of intestinal or cardiopulmonary parasite infections in companion animals (dogs and cats) in Germany between 2004–2006 and 2015–2017? An assessment of the impact of the first ESCCAP guidelines. Veterinary Parasitology, vol. 312, article 109836. https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2022.109836

Сведения об авторах:

Серикбай Арай Арманкызы (автор-корреспондент) – докторант Казахского национального университета имени аль-Фараби, преподаватель факультета естествознания Казахского национального женского педагогического университета (Алматы, Казахстан, e-mail: arai_00.0@mail.ru).

Султанкулова Куляйсан Турлыбаевна – главный научный сотрудник ТОО НИПЦ «MVA Group» (Алматы, Казахстан, e-mail: sultankul70@mail.ru).

Бармақ Сабырхан Мухитұлы – старший научный сотрудник ТОО НИПЦ «MVA Group» (Алматы, Казахстан, e-mail: sabyr95@mail.ru).

Хайруллин Берик Мухитович – главный научный сотрудник ТОО НИПЦ «MVA Group» (Алматы, Казахстан, e-mail: khirullin@mail.ru).

Information about the authors:

Serikbay Aray Armankyzy (Corresponding Author) – PhD student at Al-Farabi Kazakh National University, Lecturer at the Faculty of Natural Sciences, Kazakh National Women's Teacher Training University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: arai_00.0@mail.ru).

Sultankulova Kulyaisan Turlybayevna – Chief Researcher at MVA Group Research and Production Center LLP (Almaty, Kazakhstan, e-mail: sultankul70@mail.ru).

Barmak Sabyrkhan Mukhituly – Senior Researcher at MVA Group Research and Production Center LLP (Almaty, Kazakhstan, e-mail: sabyr95@mail.ru).

Khairullin Berik Mukhitovich – Chief Researcher at MVA Group Research and Production Center LLP (Almaty, Kazakhstan, e-mail: khirullin@mail.ru).

Авторлар туралы мәлімет:

Серикбай Арай Арманкызы (корреспонденттік автор) – әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің докторанты, Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университетінің Жаратылыстану факультетінің оқытушысы (Алматы, Қазақстан, e-mail: arai_00.0@mail.ru).

Султанкулова Куляйсан Турлыбаевна – «MVA Group» ҒЗӨО ЖШС-нің бас ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: sultankul70@mail.ru).

Бармақ Сабырхан Мухитұлы – «MVA Group» ҒЗӨО ЖШС-нің аға ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: sabyr95@mail.ru).

Хайруллин Берик Мухитович – «MVA Group» ҒЗӨО ЖШС-нің бас ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: khirullin@mail.ru).

Поступила 03 июня 2026 года
Принята 29 сентября 2026 года

IRSTI 578.821.2:578.5:602.4 https://doi.org/10.26577/EJE208831426

Ye.D. Burashev*, R.A. Rystaeva, Z.D. Omarova, T.U. Argimbaeva, N.A. Aubakir, A.B. Tulendibayev, T.T. Yermekbai, K.D. Zhugunisov, S.O. Sadikalieva, O.V. Chervyakova

Research Institute for Biological Safety Problems LLP, Zhambyl region, Kazakhstan
*e-mail: yerbol.bur@gmail.com

OPTIMIZATION AND VISUAL MONITORING OF SERUM-FREE CULTIVATION OF THE GFP-PRODUCING SHEEPPOX VIRUS STRAIN "SSPV (TK-) OMP16" IN VERO CELLS

This study optimized cultivation conditions for a GFP-producing sheeppox virus strain used as a model analogue of the recombinant strain "SSPV (TK-) OMP16". The virus was propagated in continuous Vero cell culture using serum-free OptiPRO medium supplemented with 1% L-glutamine. Cell monolayers were infected with virus doses of 0.01, 0.05, 0.1, and 0.3 $TCID_{50}$/cell and incubated at 37 °C for 120 h. Biological activity was assessed in the culture fluid and in virus-containing suspensions obtained after freeze–thaw treatment of the infected monolayer. Virus accumulation in the culture fluid was limited, whereas freeze–thaw treatment promoted more efficient release of infectious virus and clearer detection of cytopathic effect. The highest titer, 3.5 log $TCID_{50}/cm^3$, was recorded at 0.3 $TCID_{50}$/cell after 72 h of cultivation. These findings confirm the usefulness of GFP for visual monitoring and optimization of serum-free recombinant sheeppox virus cultivation in Vero cells and future veterinary vaccine platform quality control.

Keywords: recombinant sheeppox virus, GFP-producing strain, SSPV (TK-) OMP16, Vero cell culture, biological activity.

Е.Д. Бурашев, Р.А. Рыстаева, З.Д. Омарова, Т.У. Аргимбаева, Н.А. Аубакир, А.Б. Тулендибаев, Т.Т. Ермекбай, К.Д. Жугунисов, С.О. Садикалиева, О.В. Червякова

«Биологиялық қауіпсіздік проблемалары ғылыми-зерттеу институты» ЖШС, Жамбыл облысы, Қазақстан
*e-mail: yerbol.bur@gmail.com

GFP-продукциялаушы штаммды қолдану арқылы «SSPV (TK-) OMP16» рекомбинантты қой шешегі вирусы штамының репликациясын визуалды бақылау

Бұл зерттеуде «SSPV (TK-) OMP16» рекомбинантты штамының модельдік аналогы ретінде қолданылған GFP-продукциялаушы қой шешегі вирусы штамын өсіру жағдайлары оңтайландырылды. Вирус 1% L-глютамин қосылған сарысусыз OptiPRO қоректік ортасын пайдалана отырып, Vero жасушаларының үздіксіз культурасында өсірілді. Жасуша моноқабаты 0,01; 0,05; 0,1 және 0,3 $ТЦД_{50}$/жасуша дозаларымен жұқтырылып, кейін 37 °С температурада 120 сағат бойы инкубацияланды. Биологиялық белсенділік культуралық сұйықтықта және жұқтырылған моноқабатты мұздату-еріту әдісінен кейін алынған вирусқұрамды суспензияда анықталды. Зерттеу нәтижесінде вирус жинақталуы культуралық сұйықтықта шектеулі болғаны, ал мұздату-еріту әдісі инфекциялық вирустың тиімді бөлінуін және цитопатикалық әсердің айқын анықталуын қамтамасыз еткені көрсетілді. Ең жоғары титр 0,3 $ТЦД_{50}$/жасуша дозасында, 72 сағат культивирлеуден кейін 3,5 $lgТЦД_{50}/см^3$ деңгейінде тіркелді. Алынған деректер GFP-маркерінің репликацияны визуалды бақылау, жұқтыру дозасын таңдау және Vero жасушаларында рекомбинантты қой шешегі вирусын сарысусыз өсіру технологиясын жетілдіру үшін тиімділігін дәлелдейді. Жұмыс ветеринариялық мақсаттағы рекомбинантты вакциналық платформаларды әзірлеу, өндірістік үдерістерді стандарттау және вирус биомассасының сапасын бақылау үшін келешек зерттеулерде маңызды практикалық маңызға ие болуы мүмкін.

Түйін сөздер: рекомбинантты қой шешегі вирусы, GFP-продукциялаушы штамм, SSPV (TK-) OMP16, Vero жасуша культурасы, биологиялық белсенділік.

 © 2026 Al-Farabi Kazakh National University

Е.Д. Бурашев*, Р.А. Рыстаева, З.Д. Омарова, Т.У. Аргимбаева,
Н.А. Аубакир, А.Б. Тулендибаев, Т.Т. Ермекбай, К.Д. Жугунисов,
С.О. Садикалиева, О.В. Червякова

ТОО «Научно-исследовательский институт проблем биологической безопасности»,
Жамбылская область, Казахстан
*e-mail: yerbol.bur@gmail.com

Оптимизация и визуальный контроль безсывороточного культивирования рекомбинантного штамма «SSPV (TK-) OMP16» вируса оспы овец с использованием GFP-продуцирующего штамма

В настоящем исследовании проведена оптимизация условий культивирования GFP-продуцирующего штамма вируса оспы овец, используемого как модельный аналог рекомбинантного штамма «SSPV (TK-) OMP16». Вирус культивировали в перевиваемой культуре клеток Vero с применением бессывороточной среды OptiPRO, дополненной 1% L-глютамином. Монослой клеток инфицировали различными дозами вируса: 0,01; 0,05; 0,1 и 0,3 $ТЦД_{50}$/кл, с последующим культивированием при 37 °С в течение 120 часов. Биологическую активность определяли в культуральной жидкости и вируссодержащей суспензии после замораживания-оттаивания инфицированного монослоя. Установлено, что накопление вируса в культуральной жидкости было ограниченным, тогда как метод замораживания-оттаивания обеспечивал более эффективное высвобождение инфекционного вируса и выявление цитопатического действия. Наиболее высокий титр, 3,5 $lgТЦД_{50}/см^3$, зарегистрирован при дозе 0,3 $ТЦД_{50}$/кл через 72 часа культивирования. Полученные данные подтверждают эффективность GFP-маркера для визуального контроля репликации, выбора оптимальной дозы инфицирования и совершенствования технологии накопления рекомбинантного вируса оспы овец в клетках Vero при бессывороточных условиях. Работа имеет практическое значение для дальнейшей разработки рекомбинантных вакцинных платформ ветеринарного назначения и контроля качества.

Ключевые слова: SSPV (TK-) OMP16, GFP-продуцирующий штамм, вирус оспы овец, клетки Vero, биологическая активность.

Introduction

Sheeppox is a highly contagious viral disease of small ruminants with significant veterinary and economic importance. The causative agent of the disease is sheeppox virus (SPPV), which belongs to the genus Capripoxvirus of the family Poxviridae. The disease is characterized by fever, lesions of the skin and mucous membranes, and the formation of papules and nodules. In severe cases, it may be accompanied by lesions of internal organs and animal mortality. Sheep pox and goat pox are considered transboundary infections and remain relevant in countries of Asia, the Middle East, Africa, and certain regions of Europe (Babiuk et al., 2008; Tuppurainen et al., 2017; World Organisation for Animal Health, 2024).

Due to the high epizootiological significance of capripoxvirus infections, special attention is given to the development of effective specific prophylactic measures and improvement of technologies for obtaining viral biomass. Representatives of the genus Capripoxvirus are considered not only as pathogens of animal diseases but also as promising viral vectors for the development of recombinant vaccines. Their restricted host range and ability to express foreign antigens make capripoxviruses a convenient platform for the construction of veterinary vector vaccines (Boshra et al., 2013; Teffera, 2019). Previous studies have also demonstrated the practical relevance of capripoxvirus-based vaccines for veterinary prophylaxis and protection against related capripoxvirus infections (Hamdi et al., 2020; Zhugunissov et al., 2020).

Recombinant sheeppox virus strains can be used for the expression of foreign antigens and the development of vaccine candidates with defined immunobiological properties. It has previously been shown that the sheeppox virus genome can be modified using genomic regions, including the thymidine kinase gene, for the insertion of foreign genes without substantially impairing viral replication in vitro (Chervyakova et al., 2021). This provides a basis for the development of recombinant strains that can simultaneously serve as models for studying viral replication and as platforms for producing vaccine preparations.

One of the promising antigens for inclusion in recombinant vaccines is the outer membrane protein Omp16 of Brucella spp. This protein is considered an immunologically significant component capable of inducing specific cellular and humoral immune

responses. Experimental studies have shown that recombinant Omp16 and Omp19 proteins induce protective immune responses against Brucella abortus, confirming the potential use of Omp16 as a target antigen in the development of vaccine constructs (Huy et al., 2021; Pasquevich et al., 2009).

Model strains containing reporter genes are of great importance for optimizing the cultivation technology of recombinant viruses. One of the most widely used reporter markers is green fluorescent protein (GFP). Its expression allows visual detection of infected cells and monitoring of viral replication processes in cell culture. The advantage of GFP lies in the possibility of direct fluorescence observation without the use of additional substrates, making this marker a convenient tool for assessing the dynamics of viral reproduction (Chalfie et al., 1994; Soboleski et al., 2005).

Virological studies and technological accumulation of viral biomass largely depend on the choice of the cell system. Vero cell culture is widely used for the production of viral vaccines and viral vectors due to its stable growth, high susceptibility to various viruses, and suitability for scaling up biotechnological processes (Kiesslich & Kamen, 2020). At the same time, the use of serum-free media is also important, as they reduce the risk of contamination with animal-derived components, increase the reproducibility of cultivation, and simplify subsequent standardization of the production process. In particular, Vero cells can be successfully cultivated in OptiPRO medium, which is used for cell growth and viral production (Lee et al., 2020).

In the present study, a GFP-producing strain was used to optimize the accumulation technology of the recombinant sheeppox virus strain "SSPV (TK-) OMP16". This strain was applied as a model analogue of the recombinant virus, allowing visual monitoring of viral replication and viral biomass accumulation in Vero cell culture. The aim of this study was to optimize the parameters for the accumulation of viral biomass of the GFP-producing sheeppox virus strain in Vero cell culture using serum-free OptiPRO medium.

Materials and methods

Virus. The study used a sheeppox virus strain producing the green fluorescent protein GFP. The strain was cultivated in a continuous Vero cell line using the serum-free OptiPRO medium. The biological activity of the strain was 4.0 log $TCID_{50}/cm^3$. The strain was obtained from the microorganism collection of the Research Institute for Biological Safety Problems.

Culture media and supplements. Serum-free OptiPRO medium supplemented with 1% L-glutamine was used as both the growth and maintenance medium for the continuous Vero cell line derived from African green monkey kidney epithelial cells.

Virus cultivation. Infection of the monolayer of the continuous Vero cell line in plastic cell culture flasks with surface areas of 150 and 300 cm^2 (TPP) was performed by adding 0.5 cm^3 of viral suspension. The infected cells were incubated at 37-38°C for 60 min, after which the inoculum was removed. The monolayer was washed several times with culture medium, maintenance OptiPRO medium was added, and the cells were further cultivated at 37-38°C for 4-5 days. During this period, the cell monolayer was examined daily by microscopy. The cytopathic effect of sheeppox virus on the cell monolayer was characterized by cell rounding, formation of grape-like cell clusters, followed by disruption of intercellular contacts and complete destruction of the cell monolayer.

Multiplicity of infection and cultivation period. Virus accumulation in Vero cell culture at different doses of viral suspension was assessed by infecting the cell monolayer at doses of 0.01, 0.05, 0.1, and 0.3 $TCID_{50}$/cell, followed by incubation at 37°C. At 12 h post-infection and subsequently every 6 h, four cell culture flasks were collected from each group over a total cultivation period of 120 h. The culture fluid was removed from the selected flasks, and the infected monolayer was covered with phosphate-buffered saline and frozen at −20°C. After 24 h, the flasks were thawed, and biological activity was determined in both the culture fluid and the thawed virus-containing suspension by titration on a Vero cell monolayer.

Determination of the biological activity of the viral strain. The virus titer was determined by the method of serial tenfold dilutions on a Vero cell monolayer in 96-well microplates. The experiments were performed in four replicates. The virus titer was calculated using the Reed–Muench method (Reed & Muench, 1938).

Results and their discussion

Multiplicity of infection

The multiplicity of infection and the optimal cultivation period required for the accumulation of viral biomass with high infectious activity were determined using different infection doses of the studied

virus and cultivation periods ranging from 12 to 120 h at 37°C. For this purpose, Vero cell monolayers were infected with the virus at doses of 0.01, 0.05, 0.1, and 0.3 $TCID_{50}$/cell and incubated at 37°C for 120 h, with replacement of the serum-free OptiPRO medium after 2-3 days.

At the beginning of the experiment, 12 h after infection, and subsequently every 6 h, cell culture flasks were collected from each group. The culture fluid was removed, the monolayer was covered with phosphate-buffered saline, and the flasks were frozen at -20°C. After thawing, biological activity (BA) was determined in the collected culture fluid (CF) and in the thawed cell suspension in phosphate-buffered saline (PBS) by titration in Vero cell culture. The results of the study are presented in Table 1.

Table 1

Multiplicity of infection and optimal cultivation time for the GFP-producing sheeppox virus strain

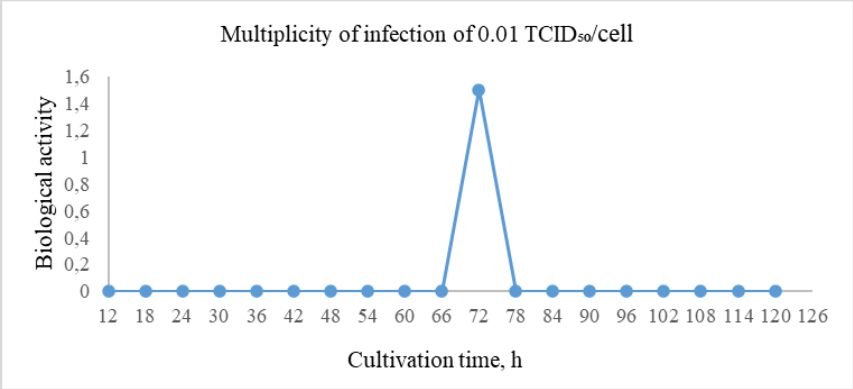
Cultivation time, h	Biological activity, log $TCID_{50}/cm^3$							
	Culture fluid (CF)				Phosphate-buffered saline (PBS)			
	Infection dose, $TCID_{50}$/cell							
	0.01 $TCID_{50}$/cell	0.05 $TCID_{50}$/cell	0.1 $TCID_{50}$/cell	0.3 $TCID_{50}$/cell	0.01 $TCID_{50}$/cell	0.05 $TCID_{50}$/cell	0.1 $TCID_{50}$/cell	0.3 $TCID_{50}$/cell
12	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	1.5
30	0	0	0	0	0	0	1.5	1.5
36	0	0	0	0	0	0	0	1.5
42	0	0	0	0	0	0	1.5	1.5
48	0	0	0	0	0	0	1.5	1.5
54	0	0	0	1.5	0	0	0	1.5
60	0	0	0	0	0	0	1.5	0
66	0	0	0	0	0	1.5	0	2.5
72	0	0	0	0	1.5	0	2.5	3.5
78	0	0	0	0	0	0	2.5	1.5
84	0	0	0	0	0	0	1.5	0
90	0	0	0	0	0	0	1.5	1.5
96	0	0	0	0	0	0	2.5	2.5
102	0	0	0	0	0	0	0	0
108	0	0	0	0	0	0	0	0
114	0	0	0	0	0	0	0	0
120	0	0	0	0	0	0	0	0

Analysis of the dynamics of biological activity (log $TCID_{50}/cm^3$) of the GFP strain of sheeppox virus, depending on the cultivation period (hours) on a Vero cell monolayer and the infecting virus dose, revealed substantial differences between the studied systems: culture fluid (CF) and infected cells in PBS after thawing.

It was found that viral reproduction in the culture fluid was characterized by limited intensity and a delayed increase in infectious activity. Detectable biological activity of the strain was recorded after 54 h of cultivation. It should be noted that, after 54 h of cultivation, biological activity of 1.5 log $TCID_{50}/cm^3$ was detected only at the infecting virus dose of 0.3 $TCID_{50}$/cell. Other time intervals did not support effective viral reproduction in this system.

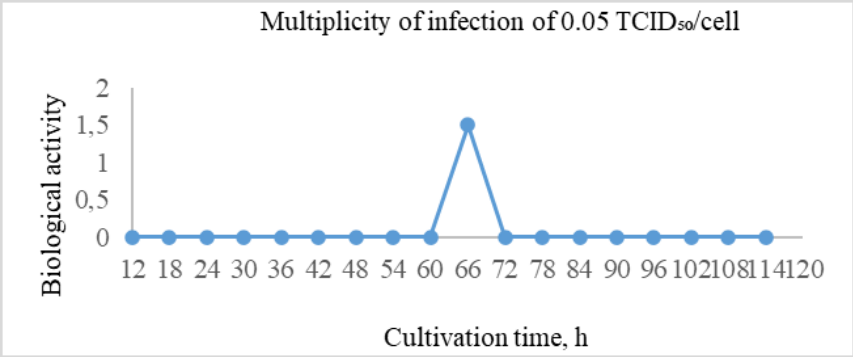
The accumulation dynamics of the fluorescent sheeppox virus strain depending on the infection dose are presented in Figures 1-4.

Figure 1
Accumulation of the fluorescent sheeppox virus strain in Vero cell culture at a multiplicity of infection of 0.01 $TCID_{50}$/cell



The data presented in the diagram show that, at a multiplicity of infection of 0.01 $TCID_{50}$/cell, the biological activity of the virus reached 1.5 log $TCID_{50}$/cm³ at 72 h of cultivation. Further cultivation up to 120 h inhibited the replication of the GFP strain of sheeppox virus in the Vero cell monolayer.

Figure 2
Accumulation of the GFP strain of sheeppox virus in Vero cell culture at a multiplicity of infection of 0.05 $TCID_{50}$/cell



Similar to the previous case, virus accumulation was observed after 66 h of cultivation, followed by a subsequent decrease in its biological activity.

Analysis of the diagram shows that, at a multiplicity of infection of 0.1 $TCID_{50}$/cell, the biological activity of the virus reached 1.5 log $TCID_{50}$/cm³ at 30, 42, 48, and 60 h of cultivation. Further cultivation up to 72 and 78 h increased the biological activity of the virus to 2.5 log $TCID_{50}$/cm³, followed by a subsequent decrease in infectious activity to 1.5 log $TCID_{50}$/cm³. After 96 h of cultivation, the infectivity of the virus increased again and reached 2.5 log $TCID_{50}$/cm³.

The results presented in the diagram show that viral biological activity was detected from 24 to 54 h of cultivation at a level of 1.5 log $TCID_{50}$/cm³. An increase in viral infectivity to 2.5 log $TCID_{50}$/cm³ was observed at 66 and 96 h. The highest biological activity of the GFP strain of sheeppox virus, 3.5 log $TCID_{50}$/cm³, was recorded after 72 h of cultivation at a multiplicity of infection of 0.3 $TCID_{50}$/cell.

Figure 3
Accumulation of the GFP strain of sheeppox virus in Vero cell culture at a multiplicity of infection of 0.1 $TCID_{50}$/cell

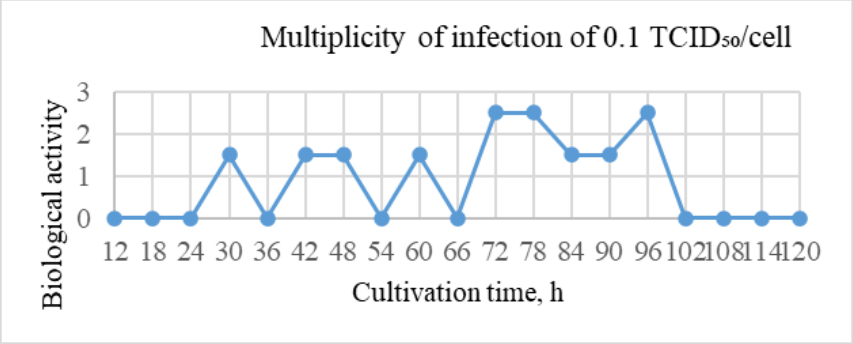
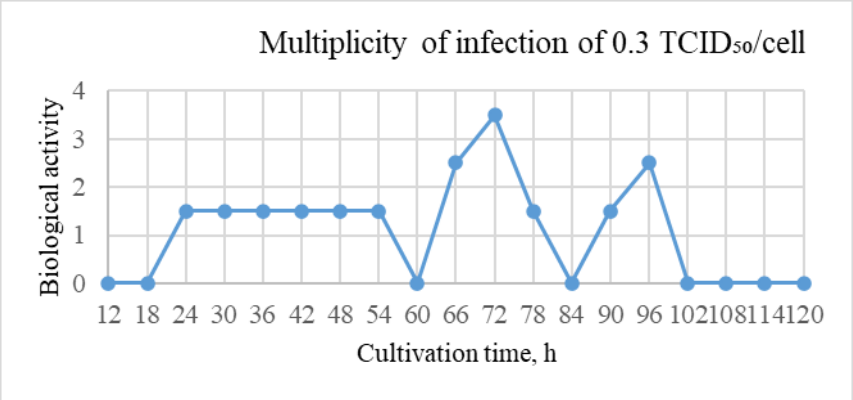


Figure 4.
Accumulation of the GFP strain of sheeppox virus in Vero cell culture at a multiplicity of infection of 0.3 $TCID_{50}$/cell



Biological activity of the virus

After the required incubation period at 37°C, the culture fluid was removed from the flasks, and the biological activity of the virus was determined. Viral reproduction in the culture fluid is shown in Figure 5.

In contrast, when phosphate-buffered saline was added to the cell monolayer followed by freezing and thawing after 24 h, an earlier onset of viral replication was observed, with infectious activity detected as early as 24 h of cultivation. The subsequent dynamics were characterized by a steady increase in biological activity, reaching maximum values of 2.5-3.5 log $TCID_{50}/cm^3$ within 66-96 h, predominantly at infection doses of 0.1-0.3 $TCID_{50}$/cell.

The cytopathic effect of the fluorescent sheeppox virus strain in Vero cell culture during determination of biological activity (BA) at different cultivation times and virus doses is presented in Figures 6–8.

Figure 5
Cytopathic effect of the GFP strain of sheeppox virus on Vero cells during determination of biological activity in the culture fluid: multiplicity of infection 0.3 $TCID_{50}$/cell, virus dilution 10^{-1}, cultivation time 54 h.

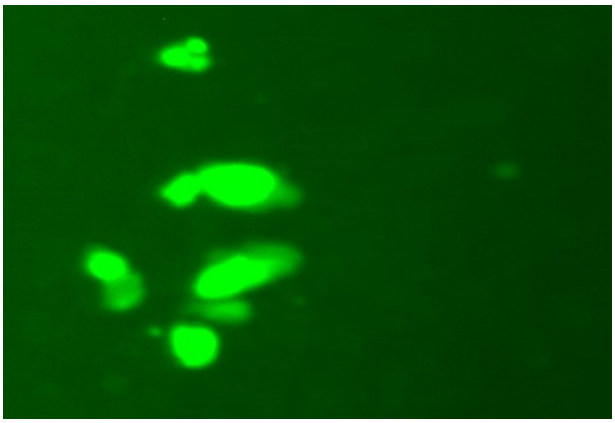
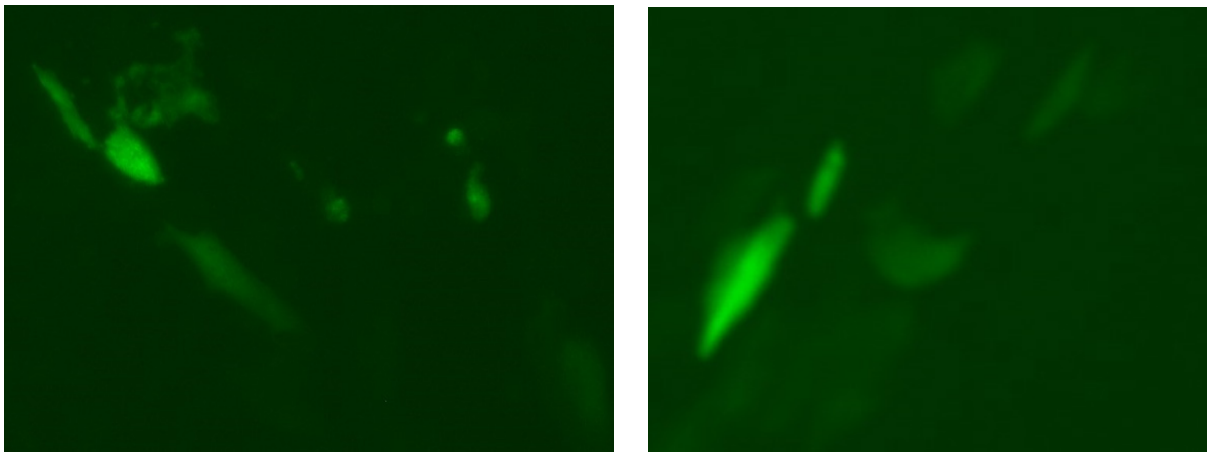


Figure 6
Cytopathic effect of the fluorescent sheeppox virus strain on Vero cells during determination of biological activity in thawed cells: (a) multiplicity of infection 0.01 $TCID_{50}$/cell, cultivation time 72 h; (b) multiplicity of infection 0.05 $TCID_{50}$/cell, cultivation time 66 h

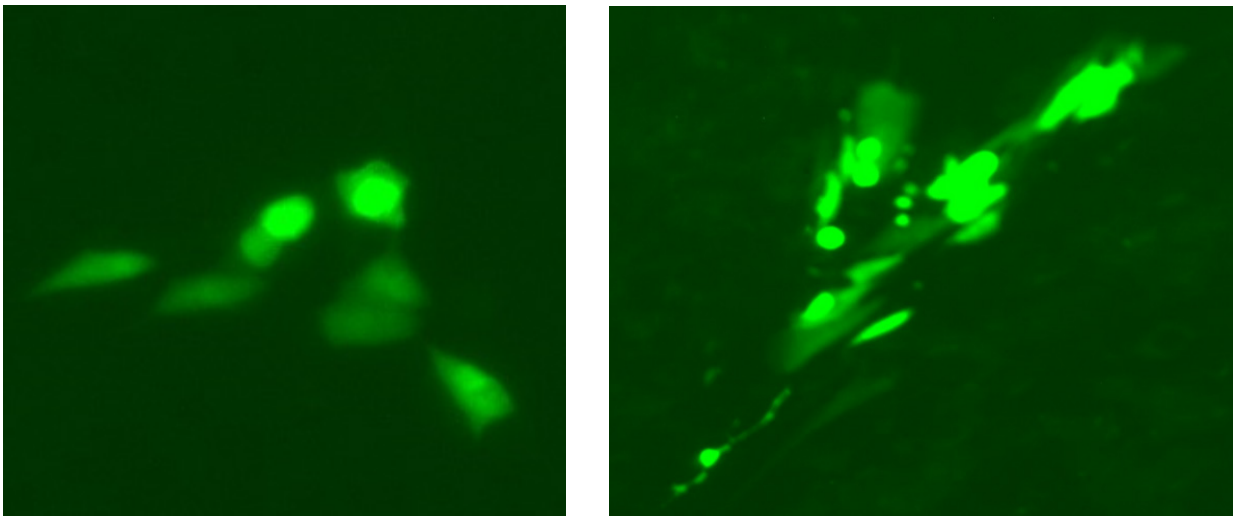


a **b**

At low infection doses, namely 0.01 and 0.05 $TCID_{50}$/cell, the cytopathic effect of the virus was manifested by weak fluorescence in the Vero cell monolayer. It should also be noted that the infectious activity of the virus at a dose of 0.01 $TCID_{50}$/cell developed more slowly and became detectable on the third day of cultivation, whereas the virus at a dose of 0.05 $TCID_{50}$/cell infected the cells 6 h earlier than the lower dose.

As shown in Figures 7 and 8, after the freeze–thaw process in phosphate-buffered saline, the cytopathic effect of the GFP strain on Vero cells at 24 and 48 h of cultivation, at an infection dose of 0.1 $TCID_{50}$/cell and a tenfold dilution of the viral suspension, was characterized by multiple fluorescent foci in the cell monolayer. At a higher infection dose of 0.3 $TCID_{50}$/cell, viral CPE was detected at higher dilutions of the viral suspension: at 72 h of cultivation, the cytopathic effect was observed at a dilution of 10^{-3}, whereas at 96 h, it was detected at a dilution of 10^{-2}.

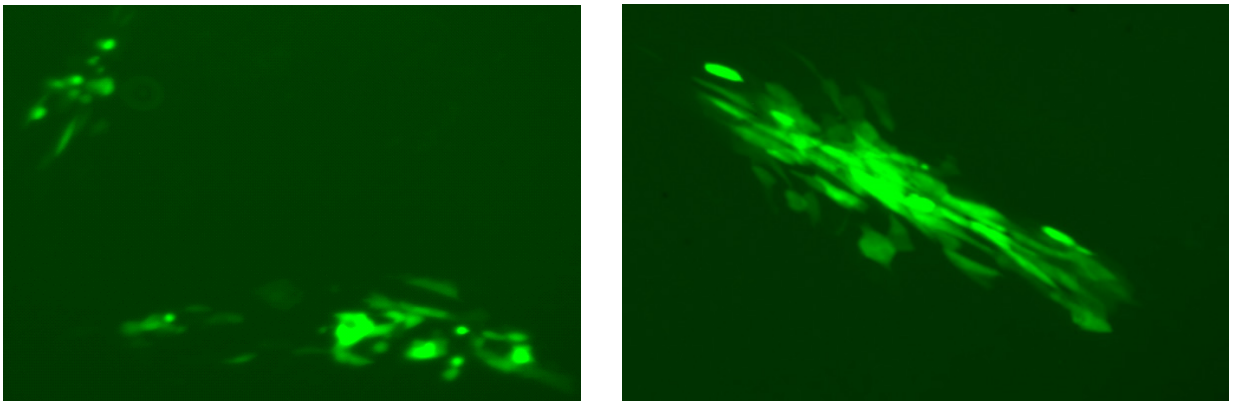
Figure 7
Cytopathic effect of the fluorescent sheeppox virus strain on Vero cells during determination of biological activity in thawed cells: (c) multiplicity of infection 0.1 $TCID_{50}$/cell, virus dilution 10^{-1}, cultivation time 24 h; (d) multiplicity of infection 0.1 $TCID_{50}$/cell, virus dilution 10^{-1}, cultivation time 48 h.



c **d**

Figure 8

Cytopathic effect of the fluorescent sheeppox virus strain on Vero cells during determination of biological activity: (e) multiplicity of infection 0.3 $TCID_{50}$/cell, virus dilution 10^{-3}, cultivation time 72 h; (f) multiplicity of infection 0.3 $TCID_{50}$/cell, virus dilution 10^{-2}, cultivation time 96 h.



e **f**

Thus, the obtained results demonstrate that the biological activity of the virus in the culture fluid collected after a defined period of incubation on the Vero cell monolayer was low and was detected only after 54 h of cultivation. In contrast, when phosphate-buffered saline was used, a clear dose-dependent pattern was observed: an increase in the infection dose was accompanied by enhanced viral replication and earlier achievement of maximum titers. At the minimum dose of 0.01 $TCID_{50}$/cell, virus accumulation was delayed and less pronounced in both systems; however, it remained more intensive after freeze–thaw treatment of the monolayer with phosphate-buffered saline.

This indicates that ice crystals formed during freezing damage the cell membranes. During thawing, the disrupted membrane can no longer retain the cellular contents, allowing viral particles accumulated in the cytoplasm or nucleus to be released. Therefore, the freeze–thaw method applied to the infected monolayer using PBS demonstrated a clear advantage over virus accumulation in the culture fluid and ensured more efficient replication of the pathogen in this system.

The obtained results show that the GFP-producing sheeppox virus strain can be effectively used as a model system for visual monitoring of viral replication and optimization of viral biomass accumulation conditions in Vero cell culture. The use of this approach is justified, since sheeppox virus belongs to the genus Capripoxvirus and is of considerable interest both for veterinary prophylaxis and as a potential platform for the development of recombinant viral vaccines (Babiuk et al., 2008; Boshra et al., 2013; Teffera, 2019; Tuppurainen et al., 2017; World Organisation for Animal Health, 2024). Previous studies have also demonstrated the practical relevance of capripoxvirus-based vaccines and their potential application in veterinary prophylaxis (Hamdi et al., 2020; Zhugunissov et al., 2020). The use of a model strain carrying a fluorescent marker makes it possible to assess the dynamics of viral replication without additional complex visualization procedures, which is particularly important when optimizing technological cultivation parameters.

In the present study, virus accumulation in the culture fluid was characterized by low intensity and limited biological activity. Infectious activity in the culture fluid was detected only under specific conditions, which may indicate the predominantly cell-associated nature of virus accumulation in the studied system. This is consistent with the replication features of poxviruses, in which a considerable proportion of viral particles may remain associated with infected cells during the early and intermediate stages of the reproductive cycle (Boulter & Appleyard, 1973; Chervyakova et al., 2021; World Organisation for Animal Health, 2024). Therefore, analysis of the culture fluid alone does not always reflect the actual level of infectious virus accumulation in cell culture.

The most pronounced virus accumulation was observed after treatment of the infected monolayer by the freeze–thaw method in phosphate-buffered saline. This approach promoted the release of viral particles from disrupted cells and allowed higher levels of biological activity to be detected compared with the culture fluid. These findings indicate that,

during cultivation of the GFP strain of sheeppox virus, a significant proportion of the infectious material accumulates intracellularly or remains associated with the cell monolayer. Therefore, inclusion of the freeze–thaw step is technologically important for obtaining a virus-containing suspension with a higher infectious titer (Boulter & Appleyard, 1973).

Analysis of the effect of multiplicity of infection revealed a dose-dependent pattern. At low infection doses, such as 0.01 and 0.05 $TCID_{50}$/cell, viral replication developed more slowly and was accompanied by weaker fluorescence in the Vero cell monolayer. When the infection dose was increased to 0.1 and 0.3 $TCID_{50}$/cell, earlier manifestation of the cytopathic effect and more pronounced accumulation of viral biomass were observed. This indicates that the initial infectious load is one of the key factors determining the rate of virus spread through the cell monolayer and the achievement of the maximum infectious titer.

The best results were obtained at a multiplicity of infection of 0.3 $TCID_{50}$/cell and a cultivation period of 72 h, when the infectious titer reached 3.5 log $TCID_{50}/cm^3$. This regime can be considered the most optimal among the tested variants, as it provided a high level of biological activity without excessive prolongation of the cultivation period. Extension of the cultivation period to 96-120 h did not lead to a stable further increase in infectious activity, which may be associated with progressive destruction of the cell monolayer, reduced cell viability, and depletion of the culture medium.

The use of the GFP marker is of particular importance in this study. Green fluorescent protein is widely used as a reporter of gene expression and allows infected cells to be visually detected by microscopy (Chalfie et al., 1994; Soboleski et al., 2005). In the present work, the presence of GFP enabled observation of fluorescent foci formation in the Vero cell monolayer, which made it possible to assess the intensity of viral replication at different cultivation times. This approach may be useful during the initial optimization of recombinant virus cultivation conditions, as it combines classical infectious titer determination with visual assessment of virus spread in cell culture.

The obtained data are also important for the further development of the recombinant sheeppox virus strain “SSPV (TK-) OMP16”. Previous studies have shown that the sheeppox virus genome can be used for the insertion and expression of foreign antigens, including recombinant constructs based on capripoxviruses (Boshra et al., 2013; Chervyakova et al., 2021; Teffera, 2019). The Omp16 protein of Brucella spp. is considered an immunologically significant antigen capable of inducing a specific immune response (Huy et al., 2021; Pasquevich et al., 2009). In this regard, optimization of accumulation parameters for the model GFP-producing strain represents an important stage for subsequent development of cultivation technology for the recombinant strain expressing OMP16.

The use of Vero cell culture and serum-free OptiPRO medium is also technologically justified. Vero cells are widely used in the production of viral vaccines and viral vectors due to their stable growth, susceptibility to a broad range of viruses, and suitability for scale-up (Kiesslich & Kamen, 2020). Serum-free media improve the reproducibility of cultivation, reduce the risk of introducing undesirable animal-derived components, and simplify standardization of the production process. It has previously been shown that Vero cells can be successfully cultivated in OptiPRO medium and used for viral production (Lee et al., 2020). Therefore, the selected cultivation system is promising for further technological adaptation.

At the same time, it should be noted that the present study was aimed at optimizing the in vitro accumulation conditions of a model GFP-producing strain. The obtained results characterize the replication features of the virus in Vero cell culture but do not reflect the immunogenic properties of the recombinant strain “SSPV (TK-) OMP16”. Further development of the vaccine candidate requires additional studies, including assessment of recombinant insert stability, expression level of the target OMP16 protein, genetic stability of the strain during passaging, as well as evaluation of immunogenicity and safety in vivo.

Thus, the conducted studies demonstrated that the GFP-producing sheeppox virus strain is a convenient model for visual monitoring of viral replication and optimization of viral biomass accumulation conditions. The most effective cultivation regime involved infection of the Vero cell monolayer at a dose of 0.3 $TCID_{50}$/cell, followed by cultivation for 72 h and application of the freeze-thaw method to the infected monolayer in phosphate-buffered saline. The obtained data can be used as a basis for further optimization of the accumulation technology for the recombinant sheeppox virus strain “SSPV (TK-) OMP16”.

Conclusion

As a result of the conducted studies, the technology for accumulating viral biomass with a high level

of infectious activity was optimized for the fluorescent sheeppox virus strain using different infection doses of 0.01, 0.05, 0.1, and 0.3 $TCID_{50}$/cell and cultivation periods ranging from 12 to 120 h at 6 h intervals.

The best results were obtained at a multiplicity of infection of 0.3 $TCID_{50}$/cell and a virus incubation period of 72 h. Under these conditions, the infectious titer reached 3.5 log $TCID_{50}/cm^3$ in the Vero cell monolayer using the serum-free OptiPRO maintenance medium.

Funding

This work was supported by the Ministry of Healthcare of the Republic of Kazakhstan within the framework of the scientific and technical program IRN BR25293294 "Brucellosis Vaccine Based on Genomic Technologies".

References

Babiuk, S., Bowden, T. R., Boyle, D. B., Wallace, D. B., & Kitching, R. P. (2008). Capripoxviruses: An emerging worldwide threat to sheep, goats and cattle. *Transboundary and Emerging Diseases*, *55*(7), 263–272. https://doi.org/10.1111/j.1865-1682.2008.01043.x

Boshra, H., Truong, T., Nfon, C., Gerdts, V., Tikoo, S., Babiuk, L. A., Kara, P., Mather, A., Wallace, D. B., & Babiuk, S. (2013). Capripoxvirus-vectored vaccines against livestock diseases in Africa. *Antiviral Research*, *98*(2), 217–227. https://doi.org/10.1016/j.antiviral.2013.02.016

Boulter, E. A., & Appleyard, G. (1973). Differences between extracellular and intracellular forms of poxvirus and their implications. *Progress in Medical Virology*, *16*, 86–108.

Chalfie, M., Tu, Y., Euskirchen, G., Ward, W. W., & Prasher, D. C. (1994). Green fluorescent protein as a marker for gene expression. *Science*, *263*(5148), 802–805. https://doi.org/10.1126/science.8303295

Chervyakova, O., Tailakova, E., Kozhabergenov, N., Sadikaliyeva, S., Sultankulova, K., Zakarya, K., Maksyutov, R. A., Strochkov, V., & Sandybayev, N. (2021). Engineering of recombinant sheep pox viruses expressing foreign antigens. *Microorganisms*, *9*(5), 1005. https://doi.org/10.3390/microorganisms9051005

Hamdi, J., Bamouh, Z., Jazouli, M., Boumart, Z., Tadlaoui, K. O., Fihri, O. F., & El Harrak, M. (2020). Experimental evaluation of the cross-protection between sheeppox and bovine lumpy skin vaccines. *Scientific Reports*, *10*, 8888. https://doi.org/10.1038/s41598-020-65856-7

Huy, T. X. N., Nguyen, T. T., Reyes, A. W. B., Vu, S. H., Min, W., Lee, H. J., Lee, J. H., & Kim, S. (2021). Immunization with a combination of four recombinant Brucella abortus proteins Omp16, Omp19, Omp28, and L7/L12 induces T helper 1 immune response against virulent B. abortus 544 infection in BALB/c mice. *Frontiers in Veterinary Science*, *7*, 577026. https://doi.org/10.3389/fvets.2020.577026

Kiesslich, S., & Kamen, A. (2020). Vero cell upstream bioprocess development for the production of viral vectors and vaccines. *Biotechnology Advances*, *44*, 107608. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107608

Lee, D. K., Park, J., & Seo, D. W. (2020). Suspension culture of Vero cells for the production of adenovirus type 5. *Clinical and Experimental Vaccine Research*, *9*(1), 48–55. https://doi.org/10.7774/cevr.2020.9.1.48

Pasquevich, K. A., Estein, S. M., García Samartino, C., Zwerdling, A., Coria, L. M., Barrionuevo, P., Fossati, C. A., Giambartolomei, G. H., & Cassataro, J. (2009). Immunization with recombinant Brucella species outer membrane protein Omp16 or Omp19 in adjuvant induces specific CD4+ and CD8+ T cells as well as systemic and oral protection against Brucella abortus infection. *Infection and Immunity*, *77*(1), 436–445. https://doi.org/10.1128/IAI.01151-08

Reed, L. J., & Muench, H. (1938). A simple method of estimating fifty percent endpoints. *American Journal of Hygiene*, *27*(3), 493–497. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a118408

Soboleski, M. R., Oaks, J., & Halford, W. P. (2005). Green fluorescent protein is a quantitative reporter of gene expression in individual eukaryotic cells. *The FASEB Journal*, *19*(3), 440–442. https://doi.org/10.1096/fj.04-3180fje

Teffera, M. (2019). Potential of using capripoxvirus-vectored vaccines against arboviruses in sheep, goats, and cattle. *Frontiers in Veterinary Science*, *6*, 450. https://doi.org/10.3389/fvets.2019.00450

Tuppurainen, E. S. M., Venter, E. H., Shisler, J. L., Gari, G., Mekonnen, G. A., Juleff, N., Lyons, N. A., De Clercq, K., Upton, C., Bowden, T. R., Babiuk, S., & Babiuk, L. A. (2017). Review: Capripoxvirus diseases: Current status and opportunities for control. *Transboundary and Emerging Diseases*, *64*(3), 729–745. https://doi.org/10.1111/tbed.12444

World Organisation for Animal Health. (2024). Sheep pox and goat pox. In *Manual of diagnostic tests and vaccines for terrestrial animals* (Chapter 3.8.12).

Zhugunissov, K., Bulatov, Y. E., Orynbayev, M., Kutumbetov, L., Abduraimov, Y. E., Shayakhmetov, Y. E., Taranov, D., Amanova, Z., Mambetaliyev, M., Absatova, Z., Azanbekova, M., Khairullin, B., Zakarya, K., & Tuppurainen, E. (2020). Goatpox virus (G20-LKV) vaccine strain elicits a protective response in cattle against lumpy skin disease at challenge with lumpy skin disease virulent field strain in a comparative study. *Veterinary Microbiology*, *245*, 108695. https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2020.108695

Information about the authors:

Burashev Yerbol Dosanovich – PhD, Research Institute for Biological Safety Problems LLP (Gvardeiskiy settlement, 25/1, 080409, Kazakhstan, e-mail: yerbol.bur@gmail.com).

Rystayeva Rashida Ausekanovna – Master of Natural Sciences, Research Institute for Biological Safety Problems LLP (Gvardeiskiy settlement, 25/1, 080409, Kazakhstan, e-mail: r.ausekanovna@biosafety.kz).

Omarova Zamira Dauletkyzy – Master of Natural Sciences, Research Institute for Biological Safety Problems LLP (Gvardeiskiy settlement, 25/1, 080409, Kazakhstan, e-mail: zarina-omarova-80@mail.ru).

Argimbayeva Takhmina Urazbekovna – Master of Natural Sciences, Research Institute for Biological Safety Problems LLP (Gvardeiskiy settlement, 25/1, 080409, Kazakhstan, e-mail: t.argimbayeva@biosafety.kz).

Aubakir Nurdos Amanzhanuly – Master of Natural Sciences, Research Institute for Biological Safety Problems LLP (Gvardeiskiy settlement, 25/1, 080409, Kazakhstan, e-mail: nurdos.aubakirov@mail.ru).

Tulendibayev Ali Bakhytzhanovich – Master of Veterinary Sciences, Research Institute for Biological Safety Problems LLP (Gvardeiskiy settlement, 25/1, 080409, Kazakhstan, e-mail: a.tulendibaev@biosafety.kz).

Yermekbay Tanat Talaibekuly – Master of Natural Sciences, Research Institute for Biological Safety Problems LLP (Gvardeiskiy settlement, 25/1, 080409, Kazakhstan, e-mail: t.yermekbay@biosafety.kz).

Zhugunisov Kuandyk Dauletbayevich – Candidate of Biological Sciences, Research Institute for Biological Safety Problems LLP (Gvardeiskiy settlement, 25/1, 080409, Kazakhstan, e-mail: k.Zhugunisov@biosafety.kz).

Sadikaliyeva Sandugash Orazbekovna – Master of Chemistry, Research Institute for Biological Safety Problems LLP (Gvardeiskiy settlement, 25/1, 080409, Kazakhstan, e-mail: s.sadikalieva@biosafety.kz).

Chervyakova Olga Viktorovna – Candidate of Biological Sciences, Research Institute for Biological Safety Problems LLP (Gvardeiskiy settlement, 25/1, 080409, Kazakhstan, e-mail: o.chervyakova@biosafety.kz).

Авторлар туралы мәлімет:

Бурашев Ербол Досанұлы – PhD, «Биологиялық қауіпсіздік проблемалары ғылыми-зерттеу институты» ЖШС (Гвардейский кенті, 25/1, 080409, Қазақстан, e-mail: yerbol.bur@gmail.com).

Рыстаева Рашида Әуесқанқызы – жаратылыстану ғылымдарының магистрі, «Биологиялық қауіпсіздік проблемалары ғылыми-зерттеу институты» ЖШС (Гвардейский кенті, 25/1, 080409, Қазақстан, e-mail: r.ausekanovna@biosafety.kz).

Омарова Замира Дәулетқызы – жаратылыстану ғылымдарының магистрі, «Биологиялық қауіпсіздік проблемалары ғылыми-зерттеу институты» ЖШС (Гвардейский кенті, 25/1, 080409, Қазақстан, e-mail: zarina-omarova-80@mail.ru).

Аргимбаева Тахмина Уразбекқызы – жаратылыстану ғылымдарының магистрі, «Биологиялық қауіпсіздік проблемалары ғылыми-зерттеу институты» ЖШС (Гвардейский кенті, 25/1, 080409, Қазақстан, e-mail: t.argimbayeva@biosafety.kz).

Әубәкір Нурдос Аманжанұлы – жаратылыстану ғылымдарының магистрі, «Биологиялық қауіпсіздік проблемалары ғылыми-зерттеу институты» ЖШС (Гвардейский кенті, 25/1, 080409, Қазақстан, e-mail: nurdos.aubakirov@mail.ru).

Тулендибаев Али Бахытжанович – ветеринария ғылымдарының магистрі, «Биологиялық қауіпсіздік проблемалары ғылыми-зерттеу институты» ЖШС (Гвардейский кенті, 25/1, 080409, Қазақстан, e-mail: a.tulendibaev@biosafety.kz).

Ермекбай Таңат Талайбекұлы – жаратылыстану ғылымдарының магистрі, «Биологиялық қауіпсіздік проблемалары ғылыми-зерттеу институты» ЖШС (Гвардейский кенті, 25/1, 080409, Қазақстан, e-mail: t.yermekbay@biosafety.kz).

Жугунисов Куандык Даулетбаевич – биология ғылымдарының кандидаты, «Биологиялық қауіпсіздік проблемалары ғылыми-зерттеу институты» ЖШС (Гвардейский кенті, 25/1, 080409, Қазақстан, e-mail: k.Zhugunisov@biosafety.kz).

Садикалиева Сандугаш Оразбековна – химия магистрі, «Биологиялық қауіпсіздік проблемалары ғылыми-зерттеу институты» ЖШС (Гвардейский кенті, 25/1, 080409, Қазақстан, e-mail: s.sadikalieva@biosafety.kz).

Червякова Ольга Викторовна – биология ғылымдарының кандидаты, «Биологиялық қауіпсіздік проблемалары ғылыми-зерттеу институты» ЖШС (Гвардейский кенті, 25/1, 080409, Қазақстан, e-mail: o.chervyakova@biosafety.kz).

Сведения об авторах:

Бурашев Ербол Досанович – PhD, ТОО «Научно-исследовательский институт проблем биологической безопасности» (пгт Гвардейский, 25/1, 080409, Казахстан, e-mail: yerbol.bur@gmail.com).

Рыстаева Рашида Аусекановна – магистр естественных наук, ТОО «Научно-исследовательский институт проблем биологической безопасности» (пгт Гвардейский, 25/1, 080409, Казахстан, e-mail: r.ausekanovna@biosafety.kz).

Омарова Замира Даулетқызы – магистр естественных наук, ТОО «Научно-исследовательский институт проблем биологической безопасности» (пгт Гвардейский, 25/1, 080409, Казахстан, e-mail: zarina-omarova-80@mail.ru).

Аргимбаева Тахмина Уразбековна – магистр естественных наук, ТОО «Научно-исследовательский институт проблем биологической безопасности» (пгт Гвардейский, 25/1, 080409, Казахстан, e-mail: t.argimbayeva@biosafety.kz).

Әубәкір Нурдос Аманжанұлы – магистр естественных наук, ТОО «Научно-исследовательский институт проблем биологической безопасности» (пгт Гвардейский, 25/1, 080409, Казахстан, e-mail: nurdos.aubakirov@mail.ru).

Тулендибаев Али Бахытжанович – магистр ветеринарных наук, ТОО «Научно-исследовательский институт проблем биологической безопасности» (пгт Гвардейский, 25/1, 080409, Казахстан, e-mail: a.tulendibaev@biosafety.kz).

Ермекбай Таңат Талайбекұлы – магистр естественных наук, ТОО «Научно-исследовательский институт проблем биологической безопасности» (пгт Гвардейский, 25/1, 080409, Казахстан, e-mail: t.yermekbay@biosafety.kz).

Жугунисов Куандык Даулетбаевич – кандидат биологических наук, ТОО «Научно-исследовательский институт проблем биологической безопасности» (пгт Гвардейский, 25/1, 080409, Казахстан, e-mail: k.Zhugunisov@biosafety.kz).

Садикалиева Сандугаш Оразбековна – магистр химии, ТОО «Научно-исследовательский институт проблем биологической безопасности» (пгт Гвардейский, 25/1, 080409, Казахстан, e-mail: s.sadikalieva@biosafety.kz).

Червякова Ольга Викторовна – кандидат биологических наук, ТОО «Научно-исследовательский институт проблем биологической безопасности» (пгт Гвардейский, 25/1, 080409, Казахстан, e-mail: o.chervyakova@biosafety.kz).

Received June 09, 2026
Accepted September 29, 2026

ШОЛУ МАҚАЛАЛАР

REVIEW ARTICLES

ОБЗОРНЫЕ СТАТЬИ

IRSTI 34.33.15 https://doi.org/10.26577/EJE208831526

B.A. Kozhizhanova[1], Abdulhakeem Idris Abdulhakeem[1], N.S. Sapargaliyeva[1*], Naser AGH[2]

[1]Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
[2]Artemia and Aquatic Animals Research Institute, Urmia, Iran
[*]e-mail: sapargalyeva.nazym@gmail.com

CYTOGENETICS OF *ARTEMIA*: A COMPREHENSIVE REVIEW

The genus Artemia containing brine shrimps, is a landmark model organism in cytogenetics research due to its remarkable adaptability to hypersaline, anoxic and high-altitude environments, as well as its diverse reproductive modes, including bisexual reproduction and parthenogenesis. This exhaustive review reflects progress in Artemia cytogenetics, with a major focus on chromosome scale genome assemblies, karyotypic polymorphisms, sex chromosome evolution, molecular cytogenetic techniques e.g. fluorescence in situ hybridisation (FISH).

A significant taxonomic update is the recent description of Artemia amati by Asem et al. (2023), a bisexual species native to Kazakhstan (previously "Artemia sp. Kazakhstan"), which provides a new framework for studying Central Asian populations. One of the most important findings is the chromosome-scale genome assembly of the Qinghai-Tibet Plateau species A. tibetiana, which contains 21 pseudochromosomes and provides insights into adaptations to high-altitude stress.

Assemblies of the A. franciscana have defined ZW sex determination systems with differentiated evolutionary strata and possible meiotic silencing pathway. The population-genomic studies of Chinese Artemia define the four different clades, which, in turn, were affected by the geologic uplift, climatic variations, and anthropogenic effects, with high nucleotide diversity in Tibetan populations. Single-nucleus profiling shows that the Z chromosome was repressed in germline oogenesis indicating that the meiotic sex chromosomal inactivation had taken place.

The diapause termination networks controlled by the transcriptional factors include SVP, MYC, RXR, and SMAD6 that regulate cell adhesion, signal transduction, and redox homeostasis. These findings shed light on the evolutionary cytogenetics, stress-adaptation, and biotechnological perspectives of aquaculture and conservation of the species Artemia. Future research needs to capitalize on integrative multi-omics to solve the remaining problems, such as full W chromosome-level resolution and interspecies dynamic-hybridisation.

Keywords: Artemia cytogenetics, Artemia amati, genome assembly, karyotype variation, sex chromosomes, parthenogenesis, population genetics, diapause regulation

Б.А. Кожижанова[1], Абдулхаким Идрис Абдулхаким[1], Н.С. Сапарғалиева[1*], Насер АГХ[2]

[1]Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан
[2]Артемия және су жануарларын зерттеу институты, Урмия
[*]e-mail: sapargalyeva.nazym@gmail.com

Artemia цитогенетикасы: кешенді шолу

Желбезекаяқты шаянтәрізділерге жататын Artemia туысы гипертұзды, анаэробты және биік таулы орта жағдайларына ерекше бейімделу қабілетіне, сондай-ақ дара жыныстылық пен партеногенезді қамтитын көбею стратегияларының алуан түрлілігіне байланысты цитогенетикалық зерттеулердегі маңызды модельдік организмдер тобына жатады. Бұл шолу Artemia цитогенетика саласындағы заманауи жетістіктерді жинақтай отырып, хромосомалық деңгейдегі геномдық жинақтарға, кариотиптік полиморфизмге, жыныс хромосомаларының эволюциясына және in situ жағдайында флуоресцентті гибридизация (FISH) сияқты молекулалық-цитогенетикалық әдістерге ерекше назар аударады.

Маңызды таксономиялық жаңалықтардың біріне – жақында сипатталған Artemia amati Asem et al. (2023) түрі жатады. Бұл Қазақстанда эндемик болып табылатын дара жынысты түр (бұрын «Artemia sp. Kazakhstan» ретінде белгіленген) және Орталық Азия популяцияларын зерттеуге жаңа негіз қалыптастырды. Ең маңызды жетістіктердің бірі – Цинхай–Тибет үстіртінен шыққан биік таулы A. tibetiana түрінің 21 псевдохромосомадан тұратын хромосомалық деңгейдегі геномдық жинағының жасалуы. Бұл жинақ биік таулы орта стрессіне бейімделу механизмдері туралы жаңа мәліметтер береді.

 © 2026 Al-Farabi Kazakh National University

A. franciscana геномының жинақтары дифференциацияланған эволюциялық страталары және ықтимал мейоздық сайленсинг механизмі бар ZW типті жынысты анықтау жүйесін сипаттауға мүмкіндік берді. Қытайдағы Artemia популяцияларына жүргізілген популяциялық-геномдық зерттеулер төрт түрлі кладаның бар екенін көрсетті. Олардың қалыптасуына аумақтардың геологиялық өзгерістері, климаттық өзгерістер және антропогендік әсер ықпал еткен. Сонымен қатар, Тибет популяциялары нуклеотидтік әртүрліліктің жоғары деңгейімен сипатталады. Жеке ядроларды профильдеу нәтижелері ұрықтық линияның оогенезі барысында Z-хромосоманың репрессияға ұшырайтынын көрсетті, бұл жыныс хромосомаларында мейоздық инактивация механизмі бар екенін дәлелдейді.

Артеминяың диапауза сатысынан шығуды реттейтін жасушалық адгезияны, сигналдық трансдукцияны және редокс-гомеостазды реттеуге қатысатын SVP, MYC, RXR және SMAD6 транскрипциялық факторлар арқылы бақыланатыны анықталды. Алынған нәтижелер эволюциялық цитогенетика, стресс-төзімділік механизмдер және Artemia-ның аквакультура мен биоалуантүрлілікті сақтау салаларындағы биотехнологиялық ерекшеліктері туралы түсініктерді кеңейтеді. Болашақ зерттеулер W-хромосоманы толық карталау және тұраралық динамикалық гибридизацияны зерттеу сияқты өзекті мәселелерді шешу үшін интегративті мультиомдық тәсілдерге негізделуі тиіс.

Түйін сөздер: Artemia цитогенетикасы, Artemia amati, геномдық жинақ, кариотиптік өзгергіштік, жыныс хромосомалары, партеногенез, популяциялық генетика, диапаузаны реттеу.

Б.А. Кожижанова[1], Абдулхаким Идрис Абдулхаким[1],
Н.С. Сапаргалиева[1*], Насер АГХ[2]

[1]Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан
[2]Научно-исследовательский институт артемии и водных животных, Урмия, Иран
[*]e-mail: sapargalyeva.nazym@gmail.com

Цитогенетика *Artemia*: всесторонний обзор

Род Artemia, включающий жаброногих рачков, является важной модельной группой организмов в цитогенетических исследованиях благодаря своей исключительной способности адаптироваться к гиперсолёным, анаэробным и высокогорным условиям среды, а также разнообразию репродуктивных стратегий, включая двуполое размножение и партеногенез. Настоящий обзор обобщает современные достижения в области цитогенетики Artemia, уделяя особое внимание сборкам геномов хромосомного уровня, кариотипическому полиморфизму, эволюции половых хромосом и молекулярно-цитогенетическим методам, таким как флуоресцентная гибридизация in situ (FSH).

Существенным таксономическим обновлением стало недавнее описание Artemia amati Asem et al. (2023) – двуполого вида, эндемичного для Казахстана (ранее обозначавшегося как “Artemia sp. Kazakhstan”), что создало новую основу для изучения центральноазиатских популяций. Одним из наиболее значимых достижений является создание сборки генома хромосомного уровня для высокогорного вида A. tibetiana с Цинхай-Тибетского плато, включающей 21 псевдохромосому и предоставляющей новые данные о механизмах адаптации к высокогорному стрессу.

Сборки генома A. franciscana позволили охарактеризовать систему определения пола типа ZW с дифференцированными эволюционными стратами и возможным механизмом мейотического сайленсинга. Популяционно-геномные исследования китайских популяций Artemia выявили существование четырёх различных клад, формирование которых было обусловлено геологическим изменением территорий, климатическими изменениями и антропогенным воздействием; при этом тибетские популяции характеризуются высоким уровнем нуклеотидного разнообразия. Профилирование отдельных ядер показало репрессию Z-хромосомы в процессе оогенеза зародышевой линии, что свидетельствует о наличии механизма мейотической инактивации половых хромосом.

Установлено, что сети регуляции выхода из диапаузы контролируются транскрипционными факторами SVP, MYC, RXR и SMAD6, участвующими в регуляции клеточной адгезии, сигнальной трансдукции и поддержании редокс-гомеостаза. Полученные результаты расширяют представления об эволюционной цитогенетике, механизмах стрессоустойчивости и биотехнологическом потенциале Artemia в аквакультуре и сохранении биоразнообразия. Перспективные исследования должны основываться на интегративных мультиомных подходах для решения сохраняющихся проблем, включая полное картирование W-хромосомы и изучение межвидовой динамической гибридизации.

Ключевые слова: цитогенетика Artemia, Artemia amati, сборка генома, вариации кариотипа, половые хромосомы, партеногенез, популяционная генетика, регуляция диапаузы.

Introduction

The genus *Artemia* (Leach, 1819), belonging to the order *Anostraca* and the class *Branchiopoda*, lives in hyper-salty habitats all over the world such as coastal salt-water marshes in the Americas and inland lakes in Asia. Such crustaceans are physiologically resilient, as they can withstand salinities well above 300 g/L, long-term anoxia, desiccation, and low temperatures down to -18^{o}C and high temperatures up to 40^{o}C (De Vos et al., 2021). There are also cytogenetically interesting aspects of the organism, such as varying modes of reproduction: bisexual species have the standard diploid number of chromosomes (2n = 42), but the parthenogenetic populations can be polyploid or aneuploid, with a maximum of 84 chromosomes or more (Abetzopoulos et al., 2009; Bett et al., 2024). Early cytogenetic studies involved the use of traditional karyotyping and banding methods which showed metacentric and submetacentric chromosomes where heterochromatin was mainly concentrated in centromere areas (Parraguez et al., 2009).

The latest technological advances, such as *next-generation sequencing (NGS)*, long-read sequencing such as *Oxford Nanopore*, and *chromosome-conformation capture (Hi-C),* have brought cytogenetics of the *Artemia* to chromosome-resolutions. Conserved synteny, expansions in stress-response gene families and complex sex-determination systems have been revealed by genome assemblies of several species, such as *A. franciscana, A. tibetiana* and *A. sinica*. In aquaculture, the live feed provided by cysts of the *Artemia* species has generated huge revenues, and the diapause ability has provided useful models of cryptobiosis and biomedical applications (Gajardo, 2012). However, the native population is threatened by the processes of climate change, habitat deterioration, and invasive species, which also highlights the need to conserve these species with cytogenetic-based conservation (Sainz-Escudero et al., 2022).

The review is carefully incorporated with a combination of karyotype variations, genome assemblies, sex chromosomes, molecular cytogenetics, population dynamics, and diapause regulation as well as practical uses. The synthesis describes evolution pathways, including contagious parthenogenesis and *ZW* chromosome divergence, while identifying gaps, including molecular bases of polyploidy stability. This work will help develop improvements in the field of cytogenetics of the organism, *Artemia*.

Karyotype Analysis in *Artemia* Species

Classical Karyotyping and Chromosomal Morphology

Karyotypic investigations constitute the bedrock of *Artemia* cytogenetics. Bisexual species, such as *A. franciscana*, *A. sinica*, and *A. tibetiana*, predominantly possess 2n=42 chromosomes, organized into 21 pairs with primarily metacentric and submetacentric morphologies (Dhont & Sorgeloos, 2002; Chen et al., 2025). Crucially, the recent taxonomic revision by Asem et al. (2023) has officially described *Artemia amati* (n. sp.) from Kazakhstan. This species, which was long referred to as "*Artemia sp*. Kazakhstan" in genetic studies, represents a key bisexual taxon in Central Asia. There are inter- and intra-specific diversifications; one instance is that 2n= 44 of *A. persimilis* is a product of chromosomal duplication that sets it apart of *A. franciscana* (Rodriguez-Gil et al., 2009). Parthenogenetic lineages often exhibit a polyploidy, with tetraploid (4n=84) configurations being common in the Eurasian populations, possibly reflecting an increased resilience to environmental stresses (Bett et al., 2024).

Heterochromatin composition is quite variable, having an effect on genome size and stability. Heterochromatin in the genome of, and up to 26% in the *A. franciscana*, can contribute to greatly to the size of the absolute chromosomes compared to *A. persimilis* (Rodríquez Gil et al., 2009). Chromocentres are detected using *DAPI stain*, and Yucatlan populations have 1-8 chromocentres, which in some populations represent heteromorphic sex chromosomes (Lipko et al., 2004).

Evolutionary Dynamics of Karyotypic Polymorphisms

The process of karyotype evolution in the organism reflects the phylogenetic divergence of the organism, and this phenomenon is observed in the case of the organism, namely, in the case of the organism, *Artemia*. Synteny analysis of the genome of a species, namely *A. tibetiana*, reveals that it shares chromosome numbers with the genome of the species, Asian species, *A. sinica*, without significant rearrangements, which suggests that the Asian clades possess a similar structure (Chen et al., 2025). On the contrary, conservation species like the New World species, i.e. species of *A. franciscana* and *A. monica*, exhibit heterochromatin expansion related to speciation (Papeschi et al., 2000). Aneuploidy in

parthenogenetic forms are probably adoptive and result from meiotic anomalies and give a selective advantage in volatile habitats (Lima et al., 2021).

The changes in heterochromatin are associated with ionic content and size of the nucleus. Interphase heterochromatin of American populations is low in Yucatcan, and high in San Francisco Bay, which may be correlates of adaptation to environmental saline gradient (Torrentera 2004). The cytogenetic observations of the Iranian populations indicate that bisexual *A. urminae* share a consistent 2n=42 along with parthenogenetic ones experiencing ploidy ranging between 2n and 5n (Asem et al., 2025).

Table 1
Comparative Karyotype Features Across Major Artemia Species

Species	Diploid Number (2n)	Assembly Size (Gb)	Notable Variations
A. franciscana	42	1.27	*ZW* sex system, high heterochromatin blocks
A. amati	42		New species (Kazakhstan), previously "sp. Kazakhstan"
A. tibetiana	42	1.69	Adapted to high altitude
A. sinica	42	1.12	Asian lineage stability
A. persimilis	44		Smaller genome, low heterochromatin
A. urmiana	42		Altitude-related variations
Parthenogenetic spp.	42-84 (up to 105)		Tetraploidy in Eurasia, pentaploidy rare

This table encapsulates key cytogenetic attributes, highlighting evolutionary divergences (Data synthesized from Bett et al., 2024; Chen et al., 2025; Li et al., 2024c).

Genome Assemblies and Chromosomal Organization

Technological Advances in Sequencing and Assembly

Contemporary genome assemblies have elevated *Artemia* cytogenetics to unprecedented detail. The *A. tibetian* genome, which is derived in a high-altitude Tibetan lake (4 620 m), has 1.69 Gb of genome size, 21 pseudo-chromosomes, 79.7% of repetitive DNA, and 24,370 protein-coding genes (Chen et al., 2025). The findings of the Hi -C mapping supported the integrity of chromosomes, with a contig N50 of 81.9 Mb. Relatively, the female *A. franciscana* assembly has a 1.27 Gb scaffold N50 of 45.3 Mb and 26 923 genes, naming chromosome 1 as Z and finding fragments of putative W (Jo et al., 2024). An additional *A. franciscana* assembly from the Great Salt Lake is estimated to be 1Gb, crosslinked into 21 linkage groups (Bett et al., 2024).

The extremophile *Artemia* genome discloses expansions in ion transport, oxidative stress response, and DNA repair orthogroups, facilitating tolerance to hypersalinity (De Vos et al., 2021).

Synteny, Repeat Elements, and Functional Annotations

Comparative genomics between *A. franciscana* and *A. tibetiana* show little rearrangement of their genome structures, and repetitive material is dominated by transposable elements (TEs) like LINEs and LTRs, making up 67-80% of genomes (Chen et al., 2025; Jo et al., 2024). These repeats may drive karyotypic evolution by insertions/deletions. Functional annotations indicate enrichment in pathways such as protein processing in the endoplasmic reticulum, pointing to adaptive features.

Sex Chromosomes and Determination Systems

Structure and Differentiation of *ZW* Chromosomes

Artemia utilizes a *ZW* sex determination system, with females heterogametic (*ZW*) and males homogametic (*ZZ*) (Bowen, 1963). In *A. franciscana*, chromosome 1 functions as the Z chromosome that expands by nearly 100Mb with a 13Mb differentiated region comprising evolutionary strata (S0-S2) through recombination suppression (Bett et al., 2024). The W chromosome persists as fragmented, but candidates include five contigs that contain female-specific sequences (Jo et al., 2024).

Single-nucleus RNA-seq reveals Z-repression in the female germ line, similar to meiotic sex chromosome inactivation (MSCI), equivalent to the dynamics of the XY in mammals (Elkrewi & Vicoso, 2024). The dosage compensation balances the expression between Z and autosomes (Huylmans et al., 2019).

Contagious Parthenogenesis and Sex Chromosome Evolution

There are cases of contagious parthenogenesis in Eurasian taxa, including in examples of asexual reproduction (e.g. *Artemia sinica*), where rare males produced by asexual reproduction can mate with sexually reproducing females to transmit the asexual model of reproduction (Elkrewi et al., 2022). This is a paradoxical evolution, which is closely connected to the evolution of *ZW* sex chromosomes, since the parthenogenetic individuals do not have differentiated sex chromosomes in most cases. The similarity of the *ZW* regions between species is a strong implication of a deeper ancestral origin, and that parthenogenesis is, at least in some degree, controlled by genes present at the *Z* chromosome.

The result of sex-biased gene expression reveals no significant *Z*-autosome differences, which is a sign of strong dosage compensation (Huylmans et al., 2019). The *Z* has evolutionary strata, implying progressive cessation of recombination, dated millions of years ago.

Molecular Cytogenetics and Genomic Insights

The *ZW* Sex Determination System

Sex determination in the sexual species of *Artemia* takes the form of a female heterogametic *ZW* system, where females have sex chromosomes composed of *ZW*, maternal homogametic *ZZ* sex chromosomes. Such a system is typical of birds, part of the fish and some insects, but its discovery and characterization in *Artemia* has played a key role in understanding sex evolution in crustaceans (Asem et al., 2025).

The *Artemia ZW* system is comparatively young and dynamic, and that has made it difficult to identify the master sex-determining gene. Initial molecular methods made use of genetic linkage maps to localize sex-linked markers but the physical location of sex chromosomes was never identified until the discovery of high-quality genome sequencing (Jo et al., 2024).

Identification of Sex Chromosomes: A Genomic Breakthrough

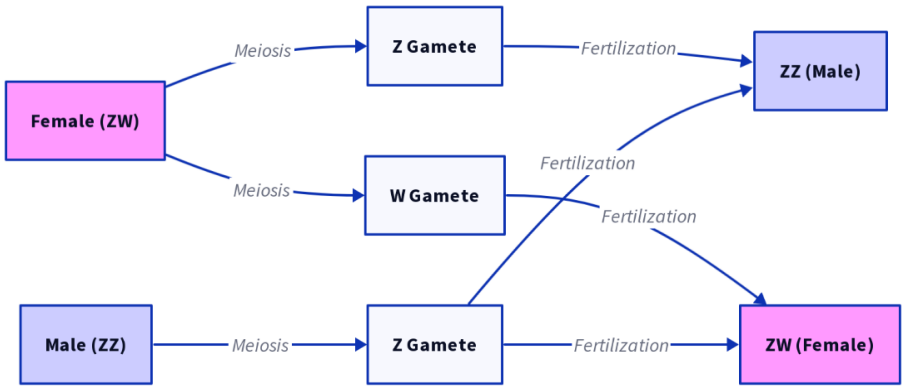
High-quality, chromosome-scale assemblies of genome have now been published as the most important recent development in *Artemia* cytogenetics. These assemblies have enabled the physical mapping and identification of the sex chromosomes and have brought the field out of the theoretical models and into real-world cytogenetic reality (Elkrewi et al., 2024).

In a recent study, Jo et al. (2024) reported a high-quality chromosome level genome assembly of female *A. franciscana*. This collection that led to the formation of 21 chromosomal scaffolds was the first conclusive information to the physical position of the sex chromosomes.

It was indicated that chromosome 1 was a sex chromosome Z, and five contigs of putative W chromosome fragments and the candidate sex-determining genes were proposed (Elkrewi et al., 2024).

This result is transformative as it ascertains that the Z chromosome of *A. franciscana* is one of largest chromosomes of the complement and which offers physical framework upon which sex-linked genes will be researched. Recovery of fragments of the very repetitive and gene-poor W chromosome is also an essential step since the W chromosome is usually hard to assemble owing to its heterochromatic nature. This recent work by Jo et al. (2024) serves as the most current and critical citation for the field of *Artemia* cytogenetics.

Figure 1
The ZW Sex Determination System in Artemia



This diagram schematically represents the female heterogametic *ZW* sex determination system, where females (*ZW*) produce Z and W gametes, and males (*ZZ*) produce only Z gametes. Fertilization results in a 1:1 ratio of *ZW* (female) and *ZZ* (male) offspring.

Genome Organization and Evolution

The new chromosome-level assemblies have provided unprecedented detail on the overall genome organization of *Artemia*. The *A. franciscana* genome is approximately 1.27 Gb in length, with a high proportion of repetitive sequences (Elkrewi et al., 2024).

Key Genomic Statistics

The comparison of genomic statistics across the newly assembled *Artemia* species highlights the rapid progress in the field:

Table 3
Key Genomic Statistics for Recent Chromosome-Level Artemia Assemblies

Species	Assembly Year	Genome Size (Gb)	Chromosome Scaffolds	Repetitive Sequence Content	Key Finding
A. franciscana	2024 (Jo et al., 2024)	1.27	21	67.26%	Z chromosome (Chr 1) identified
A. sinica	2023 (Jo, Lee, & Park, 2023)	~1.2	21	High	First chromosome-level assembly in the genus
A. tibetiana	2025 (Chen et al., 2025)	~1.1	21	High	High-altitude species assembly

A notable cytogenetic characteristic is the high proportion of repetitive sequences (more than 67 % in *A. franciscana*). These features such as transposable elements and the satellite DNA are significant contributors to the size of the genome and are commonly found in the areas of heterochromatin. Their prominence implies that they play an important role in the evolutionary dynamics and differentiation in karyotype in the genus.

Hox Gene Cluster Cytogenetics

The Hox genes are a set of associated genes that regulate the embryo body plan along the axis of anterior posteriors. The Hox cluster of their localization at the chromosome is highly conserved throughout the animal phyla. *Artemia* genome assemblies have explained the cytogenetic structure of this cluster. The ten canonical Hox genes were also found in *A. franciscana* and localized to Chromosome 14 (Elkrewi et al., 2024). The cluster is further divided into two sub clusters with a significant distance in between, a designation that is very conserved within Anostraca (Jo et al., 2024). The discovery gives an important cytogenetic predictor of comparative genomics, showing that although the *Artemia* karyotype is small overall and uniform, the synteny of major clusters of developmental genes is retained, which is indicative of a strong evolutionary limitation.

Population Cytogenetics and Phylogenetic Insights

Chinese *Artemia* populations segregate into four groups: Tibetan Plateau, Qinghai, Inner Mongolia/Xinjiang, and coastal, with high FST values denoting isolation (Li et al., 2024). Bird-mediated dispersal shapes gene flow in the *A. urmiana* complex (Li et al., 2024c).

Table 4
Genetic Diversity and Differentiation Indices for Chinese Artemia Populations

Population Group	Nucleotide Diversity (π)	FST (vs. Tibetan)	Gene Flow (Nm)	Effective Population Size (Ne)
Tibetan Plateau	0.015	-	-	High
Qinghai	0.012	0.25	0.75	Moderate
Inner Mongolia/Xinjiang	0.010	0.32	0.53	Low
Coastal	0.008	0.40	0.38	Low

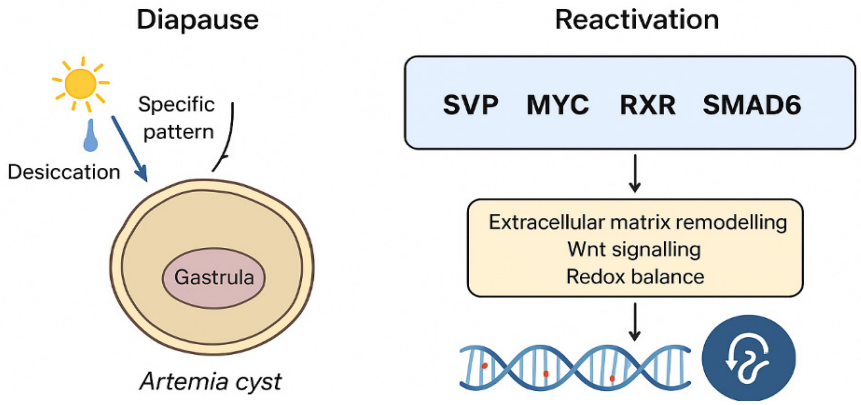
(Data from Li et al., 2024).

Transcriptional Regulation in Diapause

The cysts of *Artemia* are in the diapause state with a developmental arrest in the gastrula stage. This can be aborted when the environmental signal such as desiccation, a fall in temperature or even a specific pattern of light exposure. Complex regulatory networks, involving a group of fundamental transcription factors, such as SVP, MYC, RXR, and SMAD6, coordinate the reactivation of development, which in turn regulates the extracellular matrix remodelling, Wnt signalling pathways and the preservation of the redox balance during diapause exit (Wang et al., 2025). Recent integrative approaches to genomics studies using ATAC-seq and RNA-seq have further revealed that G-protein-coupled receptors appear to play key roles in the re-activation process, involving dynamic changes in chromatin accessibility and transcriptional activity that are responsible for the re-inception of embryogenesis (Li et al, 2024a).

Figure 3

Mechanism of Diapause and Developmental Reactivation in Artemia Cysts



Cytogenetic Adaptations to Salinity Stress

Parthenogenetic *Artemia* lineages exhibit diverse cytogenetic response to salinity in which ploidy level can determine reproductive and lifespan traits in adverse environments. Studies on diploid (2n, Ga Hai Lake, China), triploid (3n, Ankiembe Saltern, Madagascar), tetraploid (4n, Hoh Lake, China), and pentaploid (5n, Yinggehai Saltern, China) lineages show no direct relationship between ploidy and salinity tolerance in any way. Tetraploid lineages are more euryhinaline, reproduce best at 150 ppt but are inhibited at 50 ppt with pentaploids being stenohaline and short-lived. Verification of ploidy through C-banding karyotype analysis using microscope is critical in making rightful evaluation, and ploidy-specific reactions to low salinity as a stressor promoting oviparity (Asem et al., 2025).

Salinity (50, 100, 150 ppt) sets up heterogeneous reproductive patterns in diploid and tetraploid lineages, contrary to homogeneous ones in triploid and pentaploid. The analysis of group discrimination is so high that they discriminate groups based on multifactorial effect on cytogenetic stability under environmental pressure (Asem et al., 2025).

Applications in Aquaculture, Conservation, and Biotechnology

Aquaculture Applications

Selective breeding of stress-tolerant breeds in aquaculture is made possible by cytogenetic markers such as ploidy levels and polymorphisms of chromosomes, and allows the production of *Artemia* strains with improved salinity tolerance and reproductive performance (FAO, 2024). An example is the use of genome assemblies, which indicate the increase of ion transport and oxidative stress genes, to inform breeding to produce a maximum amount of cyst and a high-quality naupliar to feed fish and shrimp larvae on live feed (FAO, 2024). There are strain-specific characteristics, including the small cysts and high hatching rates in Vinh Chau *A. franciscana*, which are used to commercially produce eggs, and biofloc technology has increased fecundity rate by 30-50%, while recycling nutrients (FAO, 2024). Genetic information is used in order to prevent loss of biodiversity during introductions to support sustainable harvesting of solar salt ponds and integrated multi-trophic systems (Li et al., 2024). The applications promote aquaculture across the world by supplying

nutrient-rich feed with the consumption of about 1,700 tonnes of dry *Artemia* product every year in China highlighting the economic importance of the product (FAO, 2024).

Conservation Applications

The conservation initiative uses the data of single-nucleotide polymorphisms (SNP) and population genetic frameworks to conserve diversity in the endangered *Artemia* populations and offers clear clades susceptible to habitat deterioration and intrusions (Li et al., 2024). Research shows that there are four genetic clusters in China, the nucleotide diversity of Tibetans is high, directing the resistance against shrinking the habitats of climate changes (Li et al., 2024b). Resurrection ecology employs genetic archives of the extirpated species in the form of diapausing cysts of sediment cores, which can be used to revive the lost species and monitor evolutionary dynamics over time (Lenormand et al., 2018). Banks of cysts that are viable over decades and stored in laboratories are used to reintroduce cysts and monitor biodiversity in hypersaline wetlands (Lenormand et al., 2018). Risk assessment of anthropogenic effects, based on cytogenetics, including the ploidy change in parthenogenetic stocks, will help manage the situation sustainably during geological and climatic changes (Asem et al., 2025).

Biotechnology Applications

Artemia cytogenetics have biotechnological potential in cryptobiosis models to explore space, cyst tolerance models to space environments (UV, anoxia, desiccation) informs life-supports and pharmaceutical preservation (Lenormand et al., 2018). Transcription factors such as SVP and MYC regulate diapause mechanisms and are an insight into suspended animation to be used in medical practice such as organ storage (Wang et al., 2025). *Artemia* is used as a toxicity test model in ecotoxicology, and genetic markers are used to measure the effects of pollutants on growth and reproduction (FAO, 2024). Genome-guided bioencapsulation improves nutrient delivery, vectors probiotics and high-unsaturated fatty acids (HUFA) in aquaculture, and ancient DNA in cysts allows research on long-term adaptation, linking the fields of evolutionary biology and biotech innovations (De Vos et al., 2021).

Conclusion

This comprehensive review synthesizes the recent progress in the cytogenetics of *Artemia*, including variation of karyotype, genome assemblies, sex chromosome dynamics, molecular methods, population structures, and transcriptional networks during diapause. These shows the preserved chromosomal setup across species, the complexity of *ZW* sex determination, and the adaptive processes to survive in harsh environmental conditions. Multi-omics and comparative genomics approaches are likely to provoke answers to some unresolved questions such as the full characterisation of the W chromosome, the molecular basis of stability in polyploidy, and the evolutionary forces behind parthenogenesis. This field of study combines the classical cytogenetics with the use of the latest sequencing technology, which not only increases our knowledge on the evolutionary biology of *Artemia* but also improves its use in aquaculture, conservation, and biotechnology. The interdisciplinary collaborations should be given priority in the future in order to investigate cytogenetic response to new environmental challenges to sustainably manage this useful model organism.

Author Contributions

Conceptualization, S.N.; methodology, K.B., A.I.; software, A.I.; validation, A.I., K.B., and N.AGH; formal analysis, S.N.; investigation A.I., K.B.; resources, A.I.; data curation A.I., K.B., and N.AGH.; writing–original draft preparation, S.N., A.I., K.B. and N.AGH.; writing–review and editing, A.I. and K.B.; visualization, S.N.; supervision, S.N. and Naser .AGH.; project administration, S.N.; funding acquisition, K.B.

References

Asem, A., Li, Y., Yan, X., Zhang, Y., Zhu, Y., Kangarloei, B. A., & Yang, C. (2025). Effects of Salinity on the Reproductive and Lifespan Traits of *Artemia* Parthenogenetic Lineages with Different Ploidy Levels. Biology, 14(8), 1055. https://doi.org/10.3390/biology14081055

Asem, A., Yang, C., Eimanifar, A., Hontoria, F., Varó, I., Mahmoudi, F., Fu, C.-Z., Shen, C.-Y., Rastegar-Pouyani, N., Wang, P.-Z., Li, W., Yao, L., Meng, X., Dan, Y.-T., Rogers, D. C., & Gajardo, G. (2023). Phylogenetic analysis of problematic Asian species of *Artemia* Leach, 1819 (Crustacea, Anostraca), with the descriptions of two new species. *Journal of Crustacean Biology, 43*(1), ruad002. https://doi.org/10.1093/jcbiol/ruad002

Bett, V. K., Macon, A., Vicoso, B., & Elkrewi, M. (2024). Chromosome-level assembly of *Artemia franciscana* sheds light on sex chromosome differentiation. *Genome Biology and Evolution, 16*(1), evae006. https://doi.org/10.1093/gbe/evae006

Bowen S. T. (1965). The genetics of *Artemia* salina. V. Crossing over between the X and Y chromosomes. *Genetics*, *52*(3), 695–710. https://doi.org/10.1093/genetics/52.3.695

Chen, P., Zhong, Z., Jin, W. X., Sun, J., & Sun, S. C. (2025). Chromosome-scale assembly of *Artemia tibetiana* genome, first aquatic invertebrate genome from Tibet Plateau. *Scientific data*, *12*(1), 777. https://doi.org/10.1038/s41597-025-05136-z

De Vos, S., Rombauts, S., Coussement, L., Dermauw, W., Vuylsteke, M., Sorgeloos, P., Clegg, J. S., Nambu, Z., Van Nieuwerburgh, F., Norouzitallab, P., Van Leeuwen, T., De Meyer, T., Van Stappen, G., Van de Peer, Y., & Bossier, P. (2021). The genome of the extremophile *Artemia* provides insight into strategies to cope with extreme environments. BMC Genomics, 22(1), 635. https://doi.org/10.1186/s12864-021-07937-z

Dhont, J., & Sorgeloos, P. (2002). *Applications of Artemia*. In T. J. Abatzopoulos, J. A. Beardmore, J. S. Clegg, & P. Sorgeloos (Eds.), *Artemia: Basic and applied biology* (Vol. 1). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0791-6_6

Elkrewi, M. N., & Vicoso, B. (2024). Single-nucleus atlas of the *Artemia* female reproductive system suggests germline repression of the Z chromosome. *PLOS Genetics, 20*(8), e1011376. https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1011376

Elkrewi, M. N., Khauratovich, U., Toups, M. A., Bett, V. K., Mrnjavac, A., Macon, A., Fraisse, C., Sax, L., Huylmans, A. K., Hontoria, F., & Vicoso, B. (2022). *ZW* sex-chromosome evolution and contagious parthenogenesis in *Artemia* brine shrimp. *Genetics, 222*(2), iyac123. https://doi.org/10.1093/genetics/iyac123

FAO. (2024). Manual on *Artemia* production and use. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. XXX. Rome. https://users.ugent.be/~psorgelo/A4BreportClosingMayJune2024/FAO%20*Artemia*%20Manual%202024.pdf

Gajardo, G. M., & Beardmore, J. A. (2012). The brine shrimp *Artemia*: Adapted to critical life conditions. *Frontiers in Physiology, 3*, 185. https://doi.org/10.3389/fphys.2012.00185

Huylmans, A. K., Toups, M. A., Macon, A., Gammerdinger, W. J., & Vicoso, B. (2019). Sex-biased gene expression and dosage compensation on the *Artemia franciscana* Z-chromosome. *Genome Biology and Evolution, 11*(4), 1033–1044. https://doi.org/10.1093/gbe/evz053

Jo, E., Cho, M., Choi, S., Lee, S. J., Choi, E., Kim, J., Kim, J. Y., Kwon, S., Lee, J. H., & Park, H. (2024). High-quality chromosome-level genome assembly of female *Artemia franciscana* reveals sex chromosome and Hox gene organization. *Heliyon, 10*(19), e38687. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38687

Lenormand, T., Nougué, O., Joven, N., Tran, F., Sureteau, L., Cheptou, P. O., & Pool, J. E. (2018). Resurrection ecology in *Artemia*. Evolutionary Applications, 11(1), 76–83. https://doi.org/10.1111/eva.12522

Li, A., Song, Z., Zhang, M., Duan, H., Sui, L., Wang, B., & Hao, T. (2024a). Integrating ATAC-Seq and RNA-Seq reveals the signal regulation involved in the *Artemia* embryonic reactivation process. *Genes, 15*(8), 1083. https://doi.org/10.3390/genes15081083

Li, K., Zhang, R., Sui, L.-Y., Zhang, C., & Han, X.-K. (2024b). Genetic structure of ten *Artemia* populations from China: Cumulative effects of ancient geological events, climatic changes, and human activities. *Frontiers in Marine Science, 11*, 1375641. https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1375641

Li, W. J., Guo, Y., & Sun, S. C. (2024c). Population genetics of *Artemia* urmiana species complex (Crustacea, Anostraca): A group with asymmetrical dispersal and gene flow mediated by migratory waterfowl. *Gene*, *894*, 147957. https://doi.org/10.1016/j.gene.2023.147957

Lima, L. V., Sousa, S. M., Almeida, T. E., & Salino, A. (2021). State of the art in cytogenetics, insights into chromosome number evolution, and new C-value reports for the fern family Gleicheniaceae. *Anais da Academia Brasileira de Ciências, 93*(Suppl. 3), e20201881. https://repositorio.ufmg.br/server/api/core/bitstreams/c907df73-fd3b-4b2f-98b6-25cdc9b7af15/content

Lipko, P., Papeschi, A. G., & Cohen, R. G. (2004). Cytogenetic analysis of four Argentinean populations of *Artemia* (Crustacea, Branchiopoda: Anostraca). *Caryologia, 57*(3), 283–289. https://doi.org/10.1080/00087114.2004.10589406

Papeschi, A. G., Cohen, R. G., Pastorino, X. I., & Amat, F. (2000). Cytogenetic proof that the brine shrimp *Artemia franciscana* (Crustacea, Branchiopoda) is found in Argentina. *Hereditas, 133*(2), 159–166. https://doi.org/10.1111/j.1601-5223.2000.00159.x

Parraguez, M., Gajardo, G., & Beardmore, J. A. (2009). The New World *Artemia* species *A. franciscana* and *A. persimilis* are highly differentiated for chromosome size and heterochromatin content. *Hereditas, 146*(2), 93–103. https://doi.org/10.1111/j.1601-5223.2009.02109.x

Sainz-Escudero, L., López-Estrada, E. K., Rodríguez-Flores, P. C., & García-París, M. (2022). Brine shrimps adrift: Historical species turnover in Western Mediterranean *Artemia* (Anostraca). *Biological Invasions, 24*, 2477–2498. https://doi.org/10.1007/s10530-022-02779

Wang, B., He, Z., Zhang, M., Zhang, R., Song, Z., Li, A., & Hao, T. (2025). Transcriptional Regulatory Network of the Embryonic Diapause Termination Process in *Artemia*. *Genes*, *16*(2), 175. https://doi.org/10.3390/genes16020175

Information about authors:

Kozhizhanova Bayan Abuevna – 2 year PhD student of the Kazakh National University named after Al-Farabi (Almaty, Kazakhstan, e-mail: bayan.kozhizhanova@gmail.com)

Abdulhakeem Idris Abdulhakeem – Master of the Aquaculture and aquatic biological resources of the Kazakh National University named after Al-Farabi (Almaty, Kazakhstan, e-mail: idrisabdulhakeem@yahoo.com)

Sapargaliyeva Nazym Sapargalikyzy – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Faculty of Biology and Biotechnology of the Kazakh National University named after Al-Farabi (Almaty, Kazakhstan, e-mail: sapargalyeva.nazym@gmail.com)

Naser AGH – PhD, Professor of Urmia university (Iran, e-mail: naseragh@gmail.com)

Авторлар туралы мәлімет:

Қожижанова Баян Абуевна – Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің биология және биотехнология факультетінің 2 курс докторанты (Алматы, Қазақстан, e-mail: bayan.kozhizhanova@gmail.com)

Абдулхаким Идрис – Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің биология және биотехнология факультетінің Аквакультура және су биологиялық ресурстары саласындағы магистрі (Алматы, Қазақстан, e-mail: idrisabdulhakeem@yahoo.com)

Сапаргалиева Назым Сапаргалиқызы – биология ғылымдарының кандидаты, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің биология және биотехнология факультетінің доценті (Алматы, Қазақстан, e-mail: sapargalyeva.nazym@gmail.com)

Насер АГХ – PhD, Урмия университетінің профессоры (Иран республикасы, e-mail: naseragh@gmail.com)

Сведения об авторах:

Сапаргалиева Назым Сапаргаликызы – кандидат биологических наук, доцент факультета биологии и биотехнологии Казахского национального университета имени Аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail:sapargalyeva.nazym@gmail.com)

Кожижанова Баян Абуевна – докторант 2 года обучения факультета биологии и биотехнологии Казахского национального университета имени Аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: bayan.kozhizhanova@gmail.com)

Абдулхаким Идрис – магистр сельскохозяйственных наук в области Аквакультура и водные биологические ресурсы факультета биологии и биотехнологии Казахского национального университета имени Аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: idrisabdulhakeem@yahoo.com)

Насер АГХ – PhD, Профессор университета Урмия (Республика Иран, e-mail: naseragh@gmail.com)

Received May 09, 2026
Accepted September 25, 2026

АВТОРЛАРҒА АРНАЛҒАН АҚПАРАТ

«ҚазҰУ хабаршысы. Экология сериясы» журналы 1992 жылы құрылған. Журналдың құрылтайшысы және шығарушысы әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті болып табылады. Журналдың жоғары оқу орны көрсетілген мұқабасы мен титулдық парақтары, шығыс деректері, ISSN, eISSN, редакциялық алқа құрамы, редакциялық саясаты, жарияланымдық этикасы және веб-сайты бар.

Журнал жылына 4 рет шығарылады.

Журнал авторлардың жарияланымдарының ақпараттық ашықтығы және қол жетімділігі саясатына сәйкес келеді, мақалалар журналдың сайтында орналастырылады https://bulletin-ecology.kaznu.kz үш тілде толық мәтінді қолжетімділікте

Журналдың мақсаты – экология және табиғи ресурстар саласындағы алдыңғы қатарлы зерттеулердің нәтижелері мен жан-жақты көрсетілімін қамтамасыз ету. Журнал экологиялық проблемалар мен қоршаған ортаны қорғауға ғылыми қызығушылық танытатын ғылыми қызметкерлерге, оқытушыларға, докторанттар мен түрлі мамандықтағы студенттерге арналған.

Журнал міндеттері:

- Экология және қоршаған ортаны қорғау бойынша фундаменталды және қолданбалы ғылымның түрлі салаларында маңызды мәнге ие жаңа ғылыми нәтижелерді жариялау.
- Диссертацияларды қорғауға және ғылыми мамандықтар бойынша ғылыми дәрежелер алуға үміткер магистранттар мен докторанттардың ғылыми жұмыстарының нәтижелерін кең жариялаудың ашықтығы мен қол жетімділігі ортасын құру.
- Ғылыми қоғамдастықтың, сондай-ақ жас және жаңа бастаған ғалымдардың журналға деген тұрақты қызығушылығын қалыптастыру, оның экология мәселелерін зерттейтін мамандардың кәсіби ортасында өсіп келе жатқан қажеттілігін қалыптастыру.

Журнал материалдары экология және қоршаған ортаның ластануы саласындағы проблемалардың кең ауқымын қамтиды. Мақалалар **экологияның келесі тақырыптық бөлімдері** бойынша жарияланады:

- Жер туралы ғалым;
- Қоршаған ортаны ластау және қорғау;
- Экологиялық биотехнология;
- Адам, өсімдіктер, жануарлар және микроорганизмдер экологиясы;
- Климаттың ғаламдық өзгеруі, су ресурстарын басқару,
- Бұзылған экожүйелерді қалпына келтіру;
- Қоршаған орта және көші-қон;
- Қалалар және климаттың өзгеруі;
- Экологиялық ойлау және адамзат стратегиясы.

«ҚазҰУ хабаршысы. Экология сериясы» журналының тақырыптық бағыттарына сәйкес келетін және қолжазбаны ресімдеу талаптары бойынша қатаң ресімделген, автордың (авторлардың) қазақ, орыс немесе ағылшын тілдерінде бұрын жарияланбаған мақалалары қабылданады.

«ҚазҰУ хабаршысы. Экология сериясы» журналы авторлардың ғылыми жұмысқа құқығын сақтайды және журналға бірінші жариялау құқығын жұмыспен бірге береді, оны бір уақытта Creative Commons Attribution License (CC BY-NC-ND 4.0) бойынша лицензиялайды.

Жариялау процесінің барлық қатысушылары, атап айтқанда, әрбір автор, ғылыми редактор, рецензент, жауапты хатшы, «ҚазҰУ хабаршысы. Экология сериясы» ғылыми журналының редакциялық алқасының мүшелері міндетті түрде жариялау этикасының қағидаларын, нормалары мен стандарттарын ұстануға міндетті. Этикалық қағидаларды сақтау ғылыми журналдың сапасын қамтамасыз ету және сақтау үшін де, жариялау процесіне қатысушылар арасында сенімді және құрметті қарым-қатынас құру үшін де маңызды.

Мақаланы жариялау төлемі тек редакцияның мақаланың қабылданған шешімі хабарламасынан кейін ғана жүргізіледі. Жарияланым құны – 2000 теңге/бет WORD форматында (шрифт 12, Times New Roman).

Реквизиттер:

«Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ» коммерциялық емес акционерлік қоғамы
Индекс 050040
Мекенжайы: Алматы қаласы, Әл-Фараби даңғылы, 71
БИН 990140001154
КВЕ 16 «Бірінші Heartland Jusan Bank» АҚ
ИИК KZ19998CTB0000567141 – теңге
ИИК KZ40998CTB0000567151 – АҚШ доллары
БИК TSESKZKA

INFORMATION FOR AUTHORS

Journal «Vestnik KazNU. Ecological Series» was founded in 1992. In 2007 was renamed as **«Eurasian Journal of Ecology»** (in the English version). The founder and publisher of the journal are the Al-Farabi Kazakh National University. The journal has a developed and approved cover and title pages with an indication of the institution, imprint of the issue, ISSN, eISSN, editorial board, editorial policy, publication ethics, and website. The journal is published 4 times a year.

The journal follows the policy of information openness and accessibility of authors' publications, articles are posted on the journal's website https://bulletin-ecology.kaznu.kz in three languages in full-text access.

The aim of the journal is to provide a comprehensive presentation and results of cutting-edge research in the field of ecology and natural resources. The journal is intended for researchers, teachers, doctoral students, and students of various specialties who show scientific interest in environmental problems and environmental protection.

Journal objectives:

- To highlight new scientific results of significant importance in various fields of fundamental and applied science in ecology and environmental protection.
- To create an environment of openness and accessibility of wide coverage of the results of scientific work of undergraduates and doctoral students applying for the defense of dissertations and obtaining academic degrees in scientific specialties of dissertation councils in various fields of ecology.
- To form a constant stable interest among the scientific community, as well as among young and novice scientists in the journal, its growing demand in professional circles of specialists researching environmental issues.

The journal's materials cover a wide range of problems in the field of ecology and environmental pollution. Articles are published in the following thematic sections of ecology:

- Earth Science;
- Pollution and environmental protection;
- Environmental biotechnology;
- Ecology of humans, plants, animals and microorganisms;
- Global climate change, water resources management,
- Restoration of damaged ecosystems;
- Environment and migration;
- Cities and climate change;
- Environmental thinking and human strategy.

For publication in the «Eurasian Journal of Ecology» articles previously unpublished by the author (authors) are accepted – in Kazakh, Russian or English, which correspond to the thematic areas of the journal and are designed strictly according to the requirements of the manuscript format.

Authors of articles in the «Eurasian Journal of Ecology» retain the author's right to scientific work and transfer to the journal the right of first publication along with the work, licensing it at a time under the Creative Commons Attribution License (CC BY-NC-ND 4.0).

All participants in the publication process, namely, each author, scientific editor, reviewer, executive secretary, members of the editorial board of the scientific «Eurasian Journal of Ecology» are obliged to unconditionally adhere to the principles, norms and standards of publication ethics. Compliance with ethical principles is important both to ensure and maintain the quality of a scientific journal, and also to create trust and respect between participants in the publication process.

Payment is made only after the article is accepted for publication and the editors have notified it. Publication cost – 2000 tenge/ page in WORD format (font 12, Times New Roman)

Requisites:

Non-profit joint-stock company «Al-Farabi Kazakh National University»
Index 050040
Address: Almaty, Al-Farabi Ave. 71
BIN 990140001154
KBE 16 JSC «First Heartland Jusan Bank»
IIK KZ19998CTB0000567141 – tenge
IIK KZ40998CTB0000567151 – USD
BIC TSESKZKA

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

Журнал «Вестник КазНУ. Серия экологическая» был основан в 1992 году. Учредителем и издателем журнала является Казахский национальный университет имени аль-Фараби. Журнал имеет разработанные и утвержденные обложку и титульные листы с указанием вуза, выходные данные номера, ISSN, eISSN, состав редколлегии, редакционную политику, публикационную этику и веб-сайт. Журнал выпускается периодичностью 4 раза в год.

Журнал следует политике информационной открытости и доступности публикаций авторов, статьи размещаются на сайте журнала https://bulletin-ecology.kaznu.kz на трех языках в полнотекстовом доступе.

Цель журнала – обеспечить всестороннее представление и результаты передовых исследований в области экологии и природных ресурсов. Журнал предназначен для научных сотрудников, преподавателей, докторантов и студентов различных специальностей, проявляющих научный интерес к экологическим проблемам и охране окружающей среды.

Задачи журнала:

- Освещать новые научные результаты, имеющие существенное значение в различных областях фундаментальной и прикладной науки по экологии и охране окружающей среды.
- Создавать среду открытости и доступности широкого освещения результатов научных работ магистрантов и докторантов, претендующих на защиту диссертаций и получение ученых степеней по научным специальностям диссертационных советов в различных областях экологии.
- Формировать постоянный устойчивый интерес у научной общественности, а также у молодых и начинающих ученых к журналу, его растущую востребованность в профессиональных кругах специалистов, исследующих вопросы экологии.

Материалы журнала освещают широкий круг проблем в области экологии и загрязнения окружающей среды. Статьи публикуются по следующим **тематическим разделам экологии:**

- Наука о земле;
- Загрязнение и охрана окружающей среды;
- Экологическая биотехнология;
- Экология человека, растений, животных и микроорганизмов;
- Глобальное изменение климата, управление водными ресурсами,
- Восстановление нарушенных экосистем;
- Окружающая среда и миграция;
- Экологическое мышление и стратегия человечества.

Для публикации в журнале «Вестник КазНУ. Серия экологическая» принимаются ранее не опубликованные автором (авторами) статьи на русском, казахском или английском языке, которые соответствуют тематическим направлениям журнала и оформлены строго по требованиям оформления рукописи.

Авторы статей журнала «Вестник КазНУ. Серия экологическая» сохраняют за собой право автора на научную работу и передают журналу право первой публикации вместе с работой, единовременно лицензируя ее по лицензии Creative Commons Attribution License (CC BY-NC-ND 4.0).

Все участники процесса публикации, а именно, каждый автор, научный редактор, рецензент, ответственный секретарь, члены редакционной коллегии научного журнала «Вестник КазНУ. Серия экологическая» обязаны безусловно придерживаться принципов, норм и стандартов публикационной этики. Соблюдение этических принципов является важным как для обеспечения и поддержания качества научного журнала, также и для создания доверительных и уважительных отношении между участниками процесса публикации.

Оплата производится только после принятия статьи к публикации и сообщения редакции. Стоимость публикации – 2000 тенге/страница в формате WORD (шрифт 12, Times New Roman).

Реквизиты:

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный университет имени аль-Фараби»
Индекс 050040
Адрес: г. Алматы, пр. Аль-Фараби, 71
БИН 990140001154
КБЕ 16 АО «First Heartland Jýsan Bank»
ИИК KZ19998CTB0000567141 – тенге
ИИК KZ40998CTB0000567151 – USD
БИК TSESKZKA

МАЗМҰНЫ – CONTENTS – СОДЕРЖАНИЕ

1-бөлім
Қоршаған ортаны қорғау және қоршаған ортаға антропогендік факторлардың әсері

Section 1
Environmental impact of anthropogenic factors and environmental protectiony

Раздел 1
Воздействие на окружающую среду антропогенных факторов и защита окружающей среды

Адильбаева Г.М., Акназаров С.Х. , Байракова О.С., Бийсенбаев М.А.
Құрылыс керамикасы технологиясында механоактивтендірілген үшпа күлді қолдану 4

Булатов Н.К., Ахметжанова А.Б., Касымжанова К.С., Елюбаев С.З., Оразов О.Ш.
Математическое моделирование и алгоритм управления температурными режимами в процессе биогазового топлива 9

Г.С. Кенжибаева, С.Д. Балыбек, А.А. Абдуова, Ж.Д. Пернебаев, А.М. Есимова, Е.К. Есимов
Комплексная экологическая оценка техногенных отходов промышленных предприятий и их влияние на окружающую среду (на примере г. Шымкента) 21

A.M. Belkozhayev, P. Neumyvakin, R.N. Tuleyeva, M. Mussalimova, G. Yelemessova, G. Nargiz, G. Toleutay
Effects of cultivation parameters on bacterial nanocellulose production by Komagataeibacter xylinus DSM 2325..... 44

B.D. Kossalbayev, M. Lyu, A. K. Sadvakasova, D. E. Zaletova, M. O. Bauenova, D. Kelden, J. Wang, Zh. Huang
Effects of a ten-bacterial consortium on rice growth and rhizosphere microbial community composition 63

A. Mamirova, N. Akhmetalina, A. Assan, A. Baubekova, N. Ermekova, A. Nurmagambetova, R. Berzhanova, V. Pidlisnyuk
Rechar-M2C: microbial isolation from legacy-contaminated soils 78

A.A.Samadova, H.L.Rafiyeva, A.A.Guliyeva,.Khalilova
Adsorption of copper and zinc ions by natural zeolites in soil and aquatic ecosystems and as-sessment of their biological and ecological impacts..... 100

2-бөлім
Қоршаған орта ластаушыларының биотаға және тұрғындар денсаулығына әсерін бағалау

Section 2
Assessment of environmental pollution on biota and health

Раздел 2
Оценка действия загрязнителей окружающей среды на биоту и здоровье населения

Tlenshieva A.M., Kozhakhmetova D.D., Chekimbayeva D.
Integrated hydrochemical and biochemical evaluation of enviromental pollution in lake Balkhash 112

Халматова Р.Р., Мамедова Е.Р. , Ловинская А.В. , Ыргынбаева Ш.М. , Шалахметова Т.М. , Колумбаева С.Ж.
ПЭТ микропластигінің сүзілген сулы сығындыларының арпа (Hordeum vulgare L.) өсімдігінің ерте өну кезеңдеріне фитотоксикалық әсері..... 128

3-бөлім
Биологиялық алуантүрлілікті сақтаудың өзекті мәселелері

Section 3
Actual problems of biodiversity conservation

Раздел 3
Актуальные проблемы сохранения биологического разнообразия

К.Ж. Адилова, Т.С. Ибрагимов, Ж. Койлыбаев, А.Е. Кусниева, С.А. Манкибаева
Қызылқұмның оңтүстік шығыс бөлігіндегі Bryonia melanocarpa nabiev. қатысындағы өсімдік қауымдастығының тіршілік формасы 144

Б. Дулат, Р.Т. Кенжебекова, З.К. Даирбекова , А.Н. Махамбетов, А.О. Сағитов, Д.А. Гриценко
Қазақстанның оңтүстігіндегі инвазиялық зиянкес Tuta absoluta-ның экологиясы және молекулалық идентификациясы..... 156

М.Н. Оразбекова, А.А. Аметов
Оценка современного состояния ценопопуляций и фитохимического состава Nelumbo nucifera Gaertn. во флоре реки Кигаш Атырауской области 166

А.А. Серикбай, К.Т. Султанкулова, С.М. Бармақ , Б.М. Хайруллин
Конструирование олигонуклеотидных праймеров и зонда для выявления Toxocara canis методом ПЦР в режиме реального времени 184

Ye. D. Burashev, R.A. Rystaeva, Z.D. Omarova, T.U. Argimbaeva, N.A. Aubakir, A.B. Tulendibayev, T.T. Yermekbai, K.D. Zhugunisov, S.O. Sadikalieva, O.V. Chervyakova.
Optimization and visual monitoring of serum-free cultivation of the GFP-producing sheeppox virus strain “SSPV (TK-) OMP16” in vero cells 194

Шолу мақалалар – Review articles – Обзорные статьи

B.A. Kozhizhanova, Abdulhakeem Idris Abdulhakeem, N.S. Sapargaliyeva , Naser AGH
Cytogenetics of Artemia: a comprehensive review 206

Авторларға арналған ақпарат..... 216