

Код МРНТИ 87.21.07

*К. У. Айтекова¹, Д. К. Сунакбаева², Д. Х. Юлдашбек², К. Т. Сарбаева²

¹Международный Таразский университет им. Шерхана Муртазы (г. Тараз, Казахстан),

²Международный казахско-турецкий университет им. Ходжи Ахмеда Ясави (г. Туркестан, Казахстан)

ФЕНОЛЬНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ РАСТЕНИЙ КАК БИОИНДИКАТОРЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ РЕГИОНОВ КАЗАХСТАНА В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

Аннотация. Антропогенное загрязнение тяжелыми металлами остается одной из наиболее значимых экологических проблем горнопромышленных регионов Казахстана. В работе проведен анализ литературных данных о содержании и роли фенольных соединений растений в условиях техногенного воздействия. Рассмотрены экологические особенности промышленных центров Казахстана – Риддера, Усть-Каменогорска, Жезказгана, Балхаша и Шымкента. Показано, что загрязнение свинцом, кадмием, медью и цинком вызывает окислительный стресс у растений и активирует синтез фенольных соединений. Установлено, что повышение содержания фенольных кислот, флавоноидов, танинов и суммарных полифенолов является адаптационной реакцией на действие тяжелых металлов. Обоснована возможность использования фенольных соединений как чувствительных биохимических маркеров техногенного загрязнения и перспективных инструментов экологического биомониторинга.

Ключевые слова: фенольные соединения, тяжелые металлы, биоиндикация, биомониторинг, окислительный стресс, горнопромышленные регионы, техногенное загрязнение, экологический мониторинг.

Ауыр металдармен ластану жағдайындағы Қазақстанның тау-кен өнеркәсібі өңірлерінің экологиялық жағдайының биоиндикаторлары ретіндегі өсімдіктердің фенолдық қосылыстары

Аңдатпа. Ауыр металдармен антропогендік ластану Қазақстанның тау-кен өнеркәсібі дамыған өңірлеріндегі ең маңызды экологиялық мәселелердің бірі болып табылады. Бұл жұмыста техногендік әсер жағдайындағы өсімдіктердің фенолдық қосылыстарының мөлшері мен ролі туралы әдеби деректерге талдау жүргізілді. Қазақстанның өнеркәсіптік орталықтары – Риддер, Өскемен, Жезказған, Балқаш және Шымкент қалаларының экологиялық ерекшеліктері қарастырылды. Қорғасын, кадмий, мыс және мырышпен ластану өсімдіктерде тотығу стрессін туындатып, фенолдық қосылыстардың синтезін белсендіретіні көрсетілді. Фенол қышқылдарының, флавоноидтардың, таниндердің және жалпы полифенолдардың мөлшерінің артуы ауыр металдардың әсеріне бейімделу реакциясы екені анықталды. Фенолдық қосылыстарды техногендік ластанудың сезімтал биохимиялық маркерлері және экологиялық биомониторингтің перспективалы құралдары ретінде пайдалану мүмкіндігі негізделді.

Түйінді сөздер: фенолдық қосылыстар, ауыр металдар, биоиндикация, биомониторинг, тотығу стрессі, тау-кен өнеркәсібі өңірлері, техногендік ластану, экологиялық мониторинг.

Plant phenolic compounds as bioindicators of the environmental condition of mining and industrial regions of Kazakhstan under heavy metal pollution

Abstract. Anthropogenic contamination by heavy metals remains one of the most significant environmental problems in the mining and industrial regions of Kazakhstan. This study presents an analysis of literature data on the content and role of plant phenolic compounds under technogenic impact conditions. The environmental characteristics of the industrial centres of Kazakhstan, including Ridder, Ust-Kamenogorsk, Zhezkazgan, Balkhash, and Shymkent, were examined. It was shown that contamination by lead, cadmium, copper, and zinc induces oxidative stress in plants and activates the synthesis of phenolic compounds. An increase in the content of phenolic acids, flavonoids, tannins, and total polyphenols was found to be an adaptive response to heavy metal exposure. The possibility of using phenolic compounds as sensitive biochemical markers of technogenic pollution and promising tools for environmental biomonitoring is substantiated.

Key words: phenolic compounds, heavy metals, bioindication, biomonitoring, oxidative stress, mining-industrial regions, technogenic pollution, environmental monitoring.

Введение

Горнодобывающая и металлургическая промышленность является одной из ведущих отраслей экономики Республики Казахстан, обеспечивающей значительную часть промышленного производства и экспортного потенциала страны. Вместе с тем интенсивная разработка месторождений полезных ископаемых и деятельность металлургических предприятий сопровождаются существенным антропогенным воздействием на окружающую среду, прежде всего на почвенный и растительный покров. Особую экологическую опасность представляет накопление в природных экосистемах тяжелых металлов, включая свинец (*Pb*), кадмий (*Cd*), медь (*Cu*), цинк (*Zn*), никель (*Ni*) и другие токсичные элементы [1, 2].

В Казахстане проблема загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами особенно актуальна для регионов с развитым горнодобывающим и металлургическим комплексом, таких как Восточно-Казахстанская, Карагандинская, Павлодарская и Улытауская области. Многолетняя эксплуатация полиметаллических месторождений, функционирование обогатительных фабрик и металлургических предприятий привели к формированию зон тех-

ногенного загрязнения, характеризующихся повышенным содержанием токсичных элементов в почвах, растительности и поверхностных водах [3, 4].

Тяжелые металлы относятся к числу наиболее опасных загрязнителей окружающей среды вследствие высокой устойчивости в природных условиях, способности к биологическому накоплению и выраженного токсического воздействия на живые организмы. Попадая в растения, они нарушают минеральное питание, подавляют фотосинтетическую активность, изменяют проницаемость клеточных мембран и вызывают избыточное образование активных форм кислорода. В результате развивается окислительный стресс, который рассматривается как один из основных механизмов токсического действия тяжелых металлов на растительный организм [5, 6].

Для противодействия негативному воздействию токсикантов растения формируют сложную систему защитных реакций, включающую активацию антиоксидантных ферментов и синтез низкомолекулярных защитных соединений. Особое место среди них занимают фенольные соединения – многочисленная группа вторичных метаболитов, включающая фенолкарбоновые кислоты, флавоноиды,

дубильные вещества, антоцианы и другие биологически активные компоненты. Современные исследования показывают, что фенольные вещества играют важную роль в нейтрализации активных форм кислорода, хелатировании ионов тяжелых металлов, стабилизации клеточных мембран и регуляции стресс-индуцированных метаболических процессов [7, 8].

Установлено, что воздействие тяжелых металлов активирует фенилпропаноидный путь метаболизма, ключевым ферментом которого является фенилаланинаммияк-лиаза. Усиление активности данного фермента приводит к накоплению различных групп фенольных соединений, обеспечивающих адаптацию растений к неблагоприятным условиям среды. В последние годы фенольные соединения рассматриваются не только как компоненты антиоксидантной системы, но и как важные сигнальные молекулы, участвующие в регуляции экспрессии генов стрессового ответа и формировании механизмов устойчивости растений к техногенным загрязнителям [9, 10, 11].

Особое внимание современных исследований уделяется использованию биохимических показателей растений для экологического мониторинга. В условиях техногенного загрязнения содержание фенольных соединений демонстрирует высокую чувствительность к изменению экологических факторов и коррелирует с уровнем накопления тяжелых металлов в растительных тканях. В связи с этим фенольные соединения рассматриваются как перспективные биомаркеры состояния окружающей среды, позволяющие проводить раннюю диагностику стрессовых воздействий и оценивать степень антропогенной трансформации экосистем.

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных влиянию тяжелых металлов на физиолого-биохимические процессы растений, особенности накопления фенольных соединений у древесных пород, произрастающих в условиях техногенного загрязнения Казахстана, остаются недостаточно изученными. В этой связи исследование содержания фенольных соединений в листьях древесных растений, произрастающих в районах горнодобывающей деятельности, представляет научный и практический интерес для оценки экологического состояния территорий и совершенствования методов биоиндикации окружающей среды.

Материалы и методы

Исследование выполнено на основе анализа современных отечественных и зарубежных научных публикаций, посвященных фенольным соединениям растений, экологическим последствиям горнодобывающей деятельности и биомониторингу загрязненных территорий. Проведен сравнительный анализ литературных данных о содержании и биологической роли фенольных соединений в растениях, произрастающих в условиях техногенного воздействия тяжелых металлов.

Для оценки экологического состояния горнопромышленных регионов Казахстана были обобщены сведения о загрязнении окружающей среды свинцом (*Pb*), кадмием (*Cd*), медью (*Cu*) и цинком (*Zn*), а также данные о физи-

олого-биохимических реакциях растений на воздействие данных поллютантов. При анализе использованы результаты исследований в области физиологии растений, экологической биохимии, биоиндикации и экологического мониторинга.

Проведено сравнение крупнейших горнопромышленных регионов Казахстана, характеризующихся различным уровнем техногенной нагрузки и спецификой загрязнения тяжелыми металлами. Особое внимание уделено изменениям фенольного профиля растений как одному из наиболее чувствительных показателей стрессового воздействия загрязнителей.

Теоретической основой исследования послужила концепция биоиндикаторной роли фенольных соединений, согласно которой воздействие тяжелых металлов вызывает развитие окислительного стресса, активацию фенилпропаноидного пути метаболизма и усиление синтеза фенольных соединений. Накопление данных веществ способствует антиоксидантной защите клеток, связыванию токсичных ионов металлов и может рассматриваться в качестве информативного биохимического маркера техногенного загрязнения (рис. 1).

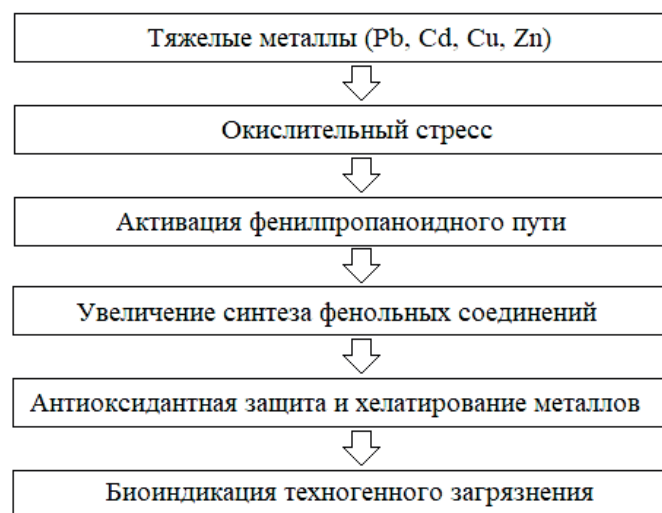


Рис. 1. Биоиндикаторная роль фенольных соединений растений в условиях загрязнения тяжелыми металлами.

Сурет 1. Ауыр металдармен ластану жағдайындағы өсімдіктердің фенолдық қосылыстарының биоиндикаторлық рөлі.

Figure 1. Bioindicator role of plant phenolic compounds under heavy metal pollution.

Для систематизации информации выполнен сравнительный анализ экологического состояния крупнейших горнопромышленных регионов Казахстана (таблица 1).

Таким образом, методологической основой исследования послужил сравнительный анализ литературных данных о реакции растений на загрязнение тяжелыми металлами и оценка возможности использования фенольных соединений в качестве биоиндикаторов экологического состояния горнопромышленных территорий Казахстана.

Таблица 1

Сравнительная характеристика горнопромышленных регионов Казахстана

Кесте 1

Қазақстанның тау-кен өнеркәсібі өңірлерінің салыстырмалы сипаттамасы

Table 1

Comparative characteristics of the mining and industrial regions of Kazakhstan

Регион	Источник загрязнения	Основные металлы	Реакция растений	Роль фенольных соединений
Риддер	Полиметаллические руды	<i>Pb, Zn, Cd, Cu</i>	Окислительный стресс	Рост флавоноидов и фенольных кислот
Усть-Каменогорск	Цветная металлургия	<i>Pb, Cd, Zn, Cu</i>	Накопление металлов	Биохимические маркеры загрязнения
Шымкент	Свинцовое производство	<i>Pb, Cd</i>	Стресс городских экосистем	Рост антиоксидантной активности
Жезказган	Меднорудная промышленность	<i>Cu, Pb, Zn</i>	Нарушение физиологических процессов	Активация синтеза фенолов
Балхаш	Медеплавильное производство	<i>Cu, Zn, Pb, Cd</i>	Техногенная нагрузка	Усиление антиоксидантной защиты

Результаты и обсуждение

Установлено, что в районах добычи и переработки полиметаллических руд наблюдается повышенное накопление *Pb, Cd, Cu* и *Zn* в компонентах экосистем. В ответ на воздействие тяжелых металлов растения активируют фенилпропаноидный путь метаболизма, что приводит к усиленному синтезу фенольных кислот, флавоноидов и других полифенольных соединений. Наиболее выраженные реакции отмечаются в Риддере, Усть-Каменогорске и Шымкенте. Повышение содержания фенольных соединений сопровождается усилением антиоксидантной защиты, стабилизацией клеточных мембран и связыванием токсичных ионов металлов.

Горнопромышленные регионы Казахстана характеризуются различными типами техногенного воздействия, однако общим фактором является накопление тяжелых металлов в почвах и растительности (таблица 2).

Анализ литературных данных показывает, что независимо от химической природы загрязнителя воздействие тяжелых металлов сопровождается развитием окислительного стресса и активацией антиоксидантной системы растений. Одним из наиболее устойчивых проявлений данной реакции является повышение содержания фенольных соединений.

Риддерский промышленный узел является одним из старейших центров добычи полиметаллических руд. Основными загрязнителями являются свинец, цинк, кадмий и медь. Воздействие данных элементов сопровождается развитием выраженного окислительного стресса у растений, что приводит к повышению содержания флавоноидов и фенольных кислот.

Усть-Каменогорск представляет собой крупный центр цветной металлургии, где формируются сложные зоны полиметаллического загрязнения. В растениях наблю-

Таблица 2

Влияние тяжелых металлов на физиолого-биохимические показатели растений

Кесте 2

Ауыр металдардың өсімдіктердің физиологиялық-биохимиялық көрсеткіштеріне әсері

Table 2

Effects of heavy metals on the physiological and biochemical parameters of plants

Тяжелый металл	Основное токсическое действие	Реакция растений	Изменение содержания фенольных соединений
<i>Pb</i> (свинец)	Нарушение фотосинтеза, угнетение роста	Развитие окислительного стресса	Значительное увеличение флавоноидов и фенольных кислот
<i>Cd</i> (кадмий)	Повреждение клеточных мембран	Активация антиоксидантной системы	Повышение содержания полифенолов
<i>Cu</i> (медь)	Усиление образования активных форм кислорода	Активация защитного метаболизма	Увеличение синтеза фенольных соединений
<i>Zn</i> (цинк)	Нарушение ферментативной активности при избытке	Метаболическая адаптация	Рост содержания антиоксидантных фенолов

дается усиление синтеза полифенолов, выполняющих функцию антиоксидантной защиты и связывания токсичных металлов.

Шымкентский промышленный регион отличается преобладанием свинцового загрязнения. Исследования показывают, что в условиях высокой концентрации свинца растения увеличивают содержание фенольных соединений, способствующих снижению токсического воздействия металла на клеточные структуры.

В Жезказганском регионе основным источником техногенной нагрузки является меднорудная промышленность. Воздействие меди приводит к активации фенилпропаноидного пути и накоплению соединений фенольной природы, обеспечивающих защиту от свободнорадикального окисления.

Балхашский промышленный узел характеризуется многолетним влиянием медеплавильного производства. Для местной растительности характерно повышение антиоксидантной активности и накопление полифенольных соединений как ответная реакция на загрязнение почв тяжелыми металлами.

Сравнительный анализ показывает, что независимо от специфики загрязнения растения всех исследуемых регионов демонстрируют сходную биохимическую реакцию, выражающуюся в увеличении содержания фенольных соединений. Это свидетельствует о возможности использования данных показателей в качестве универсальных биомаркеров техногенного стресса.

Научное обоснование фенольных соединений как биоиндикаторов

Фенольные соединения обладают рядом свойств, определяющих их высокую диагностическую ценность. Во-первых, они быстро реагируют на изменение экологических условий. Во-вторых, их синтез непосредственно связан с интенсивностью окислительного стресса. В-третьих, многие фенольные соединения способны образовывать устойчивые комплексы с ионами тяжелых металлов, снижая их токсичность (таблица 3).

Повышение содержания фенольных кислот, флавоноидов и танинов рассматривается как адаптационная реакция растений на загрязнение окружающей среды. При этом степень накопления данных соединений коррелирует с уровнем антропогенной нагрузки, что позволяет использовать их в системах экологического мониторинга и оценки экологического риска.

Полученные данные свидетельствуют о том, что различные группы фенольных соединений выполняют взаимодополняющие функции в обеспечении устойчивости растений к техногенному воздействию. Наибольшую диагностическую ценность представляют флавоноиды и суммарное содержание полифенолов (таблица 4).

Фенольные соединения выполняют двойную функцию: участвуют в физиологической адаптации растений и одновременно отражают уровень экологического стресса. Благодаря высокой чувствительности к загрязнению тяжелыми металлами они могут использоваться в системах биоиндикации.

Таблица 3

Основные функции фенольных соединений в условиях техногенного загрязнения

Кесте 3

Техногендік ластану жағдайындағы фенолдық қосылыстардың негізгі қызметтері

Table 3

Main functions of phenolic compounds under technogenic pollution conditions

Группа фенольных соединений	Биологическая функция	Значение для биоиндикации
Фенольные кислоты	Антиоксидантная защита клеток	Индикаторы окислительного стресса
Флавоноиды	Нейтрализация свободных радикалов	Маркеры устойчивости растений
Танины	Связывание ионов металлов	Показатели адаптации к загрязнению
Полифенолы (суммарное содержание)	Комплексная защита клеток	Интегральный показатель экологического стресса

Таблица 4

Сравнительная оценка методов экологического мониторинга

Кесте 4

Экологиялық мониторинг әдістерінің салыстырмалы бағасы

Table 4

Comparative evaluation of environmental monitoring methods

Критерий оценки	Химический анализ почв	Анализ фенольных соединений растений
Оценка факта загрязнения	Высокая	Высокая
Отражение биологического эффекта загрязнения	Ограниченное	Высокое
Выявление ранних стадий стресса	Низкое	Высокое
Оценка адаптационных реакций растений	Отсутствует	Высокая
Возможность биомониторинга	Средняя	Высокая

В отличие от традиционных методов химического контроля, анализ фенольного профиля позволяет вы-

являть ранние стадии воздействия загрязнителей. Для горнопромышленных территорий Казахстана это особенно важно в связи с длительным накоплением поллютантов и необходимостью разработки эффективных программ экологического мониторинга и рекультивации.

Заключение

Проведенный анализ литературных данных показал, что загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами в горнопромышленных регионах Казахстана сопровождается развитием окислительного стресса и значительными изменениями физиолого-биохимического состояния растений. Одной из наиболее устойчивых адаптационных реакций является усиление синтеза фенольных соединений, включая фенольные кислоты, флавоноиды, танины и другие полифенольные компоненты.

Установлено, что накопление фенольных соединений тесно связано с воздействием свинца, кадмия, меди и цинка и отражает степень техногенной нагрузки на экосистемы. Выполняя антиоксидантные, хелатирующие

и защитные функции, данные вещества способствуют повышению устойчивости растений к загрязнению и одновременно могут служить информативными показателями экологического состояния территорий.

Сравнительный анализ горнопромышленных регионов Казахстана показал сходство биохимических реакций растений независимо от специфики источников загрязнения, что подтверждает универсальность фенольных соединений как маркеров техногенного стресса. В отличие от традиционных методов химического контроля, оценка фенольного профиля растений позволяет выявлять ранние стадии негативного воздействия загрязнителей и отражает биологические последствия загрязнения.

Таким образом, фенольные соединения представляют собой перспективные биохимические индикаторы экологического состояния горнопромышленных регионов Казахстана и могут быть рекомендованы для использования в комплексных системах экологического мониторинга, биоиндикации и оценки экологических рисков на техногенно нарушенных территориях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Растения как эффективные биоиндикаторы для мониторинга загрязнения тяжелыми металлами / A. Cakaj [и др.] // *Environmental Research*. – 2024. – Т. 256. – Ст. 119222 (на английском языке)
2. Asiminicesei D.-M., Fertu D. I., Gavrilescu M. Влияние загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами на метаболический профиль лекарственных растений и их терапевтический потенциал / *Plants*. – 2024. – Т. 13 (6). – Ст. 913 (на английском языке)
3. Sunakbaeva D. K. Экологическая роль фенольных соединений и их вклад в биологическую активность растений // *Wah Academia Journal of Health and Nutrition*. – 2026. – Т. 2. – № 1. – С. 1–4 (на турецком языке)
4. Goncharuk E. A., Zagoskina N. V. Тяжелые металлы, их фитотоксичность и роль фенольных антиоксидантов в стрессовых реакциях растений с акцентом на кадмий: обзор / *Molecules*. – 2023. – Т. 28 (9). – Ст. 3921 (на английском языке)
5. Инокуляция устойчивыми к тяжелым металлам бактериями снижает показатели окислительного стресса у шпината (*Spinacia oleracea* L.) / M. Jamil [и др.] // *BMC Plant Biology*. – 2024. – Т. 24. – Ст. 221 (на английском языке)
6. Фенольные соединения как природные регуляторы стресс-устойчивости растений: комплексный обзор / N. Saini [и др.] // *Physiological and Molecular Plant Pathology*. – 2024. – Т. 133. – Ст. 102383 (на английском языке)
7. Bhadwal Sh., Sharma S., Singh D. Влияние селена и мышьяка на фенольные соединения и антиоксидантную активность риса (*Oryza sativa* L.) // *Chemosphere*. – 2024. – Т. 350. – Ст. 141071 (на английском языке)
8. Altun H., Orcan P. Реакции риса (*Oryza sativa* L.) на экзогенные элиситоры при свинцовом стрессе // *BMC Plant Biology*. – 2024. – Т. 24. – Ст. 897 (на английском языке)
9. Био- и фиторемедиация: растения и микроорганизмы для восстановления почв, загрязненных тяжелыми металлами / A. Sánchez-Jiménez [и др.] // *Discover Applied Sciences*. – 2022. – Т. 4. – Ст. 59 (на английском языке)
10. Антиоксидантный ответ травянистых растений различных видов на загрязнение тяжелыми металлами / A. S. Petukhov [и др.] // *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*. – 2024. – Т. 2. – С. 25–36 (на английском языке)
11. Petruľová V., Bačkorová M. Определение фитохимического качества листьев *Vaccinium vitis-idaea* L. и *Vaccinium myrtillus* L. из загрязненных и незагрязненных районов // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2024. – Т. 196. – Ст. 1135 (на английском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Өсімдіктер ауыр металдармен ластануды мониторингтеудің тиімді биоиндикаторлары ретінде / A. Cakaj [және т. б.] // *Environmental Research*. – 2024. – Т. 256. – 119222 (ағылшын тілінде)

2. Asiminicesei D.-M., Fertu D. I., Gavrilesco M. Қоршаған ортаның ауыр металдармен ластануының дәрілік өсімдіктердің метаболикалық профилі мен олардың емдік әлеуетіне әсері // *Plants*. – 2024. – Т. 13 (6). – 913 (ағылшын тілінде)
3. Sunakbaeva D. K. Фенолдық қосылыстардың экологиялық рөлі және олардың өсімдіктердің биологиялық белсенділігіне қосқан үлесі // *Wah Academia Journal of Health and Nutrition*. – 2026. – Т. 2. – № 1. – Б. 1–4 (түрік тілінде)
4. Goncharuk E. A., Zagoskina N. V. Ауыр металдар, олардың фитоуыттылығы және өсімдіктердің стресс жағдайындағы фенолдық антиоксиданттарының рөлі: кадмий мысалындағы шолу // *Molecules*. – 2023. – Т. 28 (9). – 3921 (ағылшын тілінде)
5. Ауыр металдарға төзімді бактерияларды енгізу шпинаттағы (*Spinacia oleracea* L.) ауыр металдар тудырған тотығу стрессінің көрсеткіштерін төмендетті / M. Jamil [және т. б.] // *BMC Plant Biology*. – 2024. – Т. 24. – 221 (ағылшын тілінде)
6. Фенолдық қосылыстар өсімдіктердегі стрессті төмендететін табиғи факторлар ретінде: кешенді шолу / N. Saini [және т. б.] // *Physiological and Molecular Plant Pathology*. – 2024. – Т. 133. – 102383 (ағылшын тілінде)
7. Bhadwal Sh., Sharma S., Singh D. Селен мен мышьяқтың күріш (*Oryza sativa* L.) құрамындағы фенолдық қосылыстар мен антиоксиданттық белсенділікке әсері // *Chemosphere*. – 2024. – Т. 350. – 41071 (ағылшын тілінде)
8. Altun H., Orcan P. Қорғасынмен стресс жағдайындағы күріштің (*Oryza sativa* L.) экзогендік элиситорларға жауап реакциясы // *BMC Plant Biology*. – 2024. – Т. 24. – 897 (ағылшын тілінде)
9. Био- және фиторемедиация: ауыр металдармен ластанған топырақты қалпына келтірудегі өсімдіктер мен микроорганизмдер / A. Sánchez-Jiménez [және т. б.] // *Discover Applied Sciences*. – 2022. – Т. 4. – 59 (ағылшын тілінде)
10. Әртүрлі шөптесін өсімдіктердің ауыр металдармен ластанған ортаға антиоксиданттық жауабы / A. S. Petukhov [және т. б.] // *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*. – 2024. – Т. 2. – Б. 25–36 (ағылшын тілінде)
11. Petruřová V., Bařkorová M. Ластанған және ластанбаған аймақтардан жиналған *Vaccinium vitis-idaea* L. және *Vaccinium myrtillus* L. жапырақтарының фитохимиялық сапасын анықтау // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2024. – Т. 196. – 1135 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. *Plants as effective bioindicators for heavy metal pollution monitoring* / A. Cakaj et al. // *Environmental Research*. – 2024. – Vol. 256. – Article 119222 (in English)
2. Asiminicesei D.-M., Fertu D. I., Gavrilesco M. Impact of Heavy Metal Pollution in the Environment on the Metabolic Profile of Medicinal Plants and Their Therapeutic Potential // *Plants*. – 2024. – Vol. 13 (6). – Article 913 (in English)
3. Sunakbaeva D. K. Ecological Roles of Phenolic Compounds and Their Contribution to the Biological Activities of Plants // *Wah Academia Journal of Health and Nutrition*. – 2026. – P. 1 – 4 (in Turkish)
4. Goncharuk E. A., Zagoskina N. V. Heavy Metals, Their Phytotoxicity, and the Role of Phenolic Antioxidants in Plant Stress Responses with Focus on Cadmium: Review // *Molecules*. – 2023. – Vol. 28 (9). – Article 3921 (in English)
5. Inoculation of heavy metal resistant bacteria alleviated heavy metal-induced oxidative stress biomarkers in spinach (*Spinacia oleracea* L.) / M. Jamil et al. // *BMC Plant Biology*. – 2024. – Vol. 24. – Article 221 (in English)
6. Exploring phenolic compounds as natural stress alleviators in plants- a comprehensive review / N. Saini et al. // *Physiological and Molecular Plant Pathology*. – 2024. – Vol. 133. – Article 102383 (in English)
7. Bhadwal Sh., Sharma S., Singh D. Interactive effects of selenium and arsenic on phenolic constituents and antioxidant activity in rice (*Oryza sativa* L.) // *Chemosphere*. – 2024. – Vol. 350. – Article 141071 (in English)
8. Altun H., Orcan P. Responses to exogenous elicitor treatment in lead-stressed *Oryza sativa* L. // *BMC Plant Biology*. – 2024. – Vol. 24. – Article 897 (in English)
9. Bio- and phytoremediation: Plants and microbes to the rescue of heavy metal polluted soils / A. Sánchez-Jiménez et al. // *Discover Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 4. – Article 59 (in English)
10. Antioxidative response of herbs of various species to heavy metal environmental pollution / A. S. Petukhov et al. // *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*. – 2024. – Vol. 2. – P. 25–36 (in English)
11. Petruřová V., Bařkorová M. Determination of phytochemical quality of leaves *Vaccinium vitis-idaea* L. and *Vaccinium myrtillus* L. from the polluted and non-polluted areas // *Environ Monit Assess*. – 2024. – Vol. 196. – Article 1135 (in English)

Сведения об авторах:

Айтекова К. У., к. т. н., ассистент профессора, Международный Таразский университет им. Шерхана Муртазы (г. Тараз, Казахстан), Aytekova1972@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8439-944X>

Сунакбаева Д. К., к. т. н., Международный казахско-турецкий университет им. Ходжи Ахмеда Ясави (г. Туркестан, Казахстан), dilara.sunakbayeva@ayu.edu.kz; <https://orcid.org/0009-0006-3727-4891>

Юлдашбек Д. Х., магистр химии, ст. научный сотрудник НИИ «Экология», Международный казахско-турецкий университет им. Ходжи Ахмеда Ясави (г. Туркестан, Казахстан), davlat.yuldashbek@ayu.edu.kz; <https://orcid.org/0000-0001-9342-7502>

Сарбаева К. Т., к. х. н., Международный казахско-турецкий университет им. Ходжи Ахмеда Ясави (г. Туркестан, Казахстан), karlyga.sarbayeva@ayu.edu.kz; <https://orcid.org/0000-0003-1150-1620>

Авторлар туралы мәліметтер:

Айтекова К. У., т. ғ. к., профессордың ассистенті, Шерхан Мұртаза атындағы Халықаралық Тараз университеті (Тараз қ., Қазақстан)

Сунакбаева Д. К., т. ғ. к., Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті (Түркістан қ., Қазақстан)

Юлдашбек Д. Х., химия магистрі, «Экология» ҒЗИ-ның аға ғылыми қызметкері, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті (Түркістан қ., Қазақстан)

Сарбаева К. Т., х. ғ. к., Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті (Түркістан қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Aitekova K. U., candidate of technical sciences, assistant professor, Sherkhan Murtaza International Taraz University (Taraz, Kazakhstan)

Sunakbayeva D. K., candidate of technical sciences, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University (Turkestan, Kazakhstan)

Yuldashbek D. Kh., Master of Chemistry, Senior Researcher of the Research Institute «Ecology», Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University (Turkestan, Kazakhstan)

Sarbayeva K. T., candidate of Chemical Sciences, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University (Turkestan, Kazakhstan)