

Сведения об авторах:

Чеботько Надежда Константиновна* – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, «Казахский НИИ лесного хозяйства и агролесомелиорации им. А.Н. Букейхана», Республика Казахстан 021704, г. Щучинск, ул. Кирова, 58, тел.: 87759492158, e-mail: chebotkon@mail.ru.

Крекова Яна Алексеевна – PhD, заведующая отделом интродукции, «Казахский НИИ лесного хозяйства и агролесомелиорации им. А.Н. Букейхана», Республика Казахстан, 021704, г. Щучинск, ул. Кирова, 58, тел.: 87029191930, e-mail: yana24.ru@mail.ru.

Раушан Әрсен Берікұлы – магистрант 2 курса, «Кокшетауский университет им. Ш. Уалиханова», Республика Казахстан, 020000, Кокшетау, ул. Абая, 76, тел.: 87472431108, e-mail: berikuly003@mail.ru.

Чеботько Надежда Константиновна* – ауыл шаруашылығы ғылымдарының кандидаты, жетекші ғылыми қызметкер, «Ә.Н.Бөкейхан атындағы Қазақ орман шаруашылығы және агроорман-мелиорация ғылыми-зерттеу институты», Қазақстан Республикасы, 021704, Щучье қ., Киров көш, тел.: 87759492158, e-mail: chebotkon@mail.ru.

Крекова Яна Алексеевна – PhD, селекция бөлімінің меңгерушісі, «Ә.Н. Бөкейхан атындағы Қазақ орман шаруашылығы және агроорман мелиорация ғылыми-зерттеу институты», Қазақстан Республикасы, 021704, Щучье қ., Киров көш, тел.: 87029191930, e-mail: yana24.ru@mail.ru.

Раушан Әрсен Берікұлы – 2 курс магистранты, «Ш.Уәлиханов атындағы Көкшетау университеті», Қазақстан Республикасы 020000, Көкшетау қ., Абай көш, 76, тел.: 87472431108, e-mail: berikuly003@mail.ru.

Chebotko Nadezhda Konstantinovna* – Candidate of Agriculture, Leading Researcher, A.N. Bukeikhan Kazakh Research Institute of Forestry and Agroforestry, Republic of Kazakhstan, 021704, Shchuchinsk, 58 Kirov Str., tel.: 87759492158, e-mail: chebotkon@mail.ru.

Krekova Yana Alekseyevna – PhD, Head of the Plant introduction department, A.N. Bukeikhan Kazakh Research Institute of Forestry and Agroforestry, Republic of Kazakhstan, 021704, Shchuchinsk, 58 Kirov Str., tel.: 87029191930, e-mail: yana24.ru@mail.ru.

Raushan Arsen Berikuly – 2nd year Master student, Sh. Ualikhanov Kokshetau University, Republic of Kazakhstan, 020000, Kokshetau, 76 Abai Str., tel.: +77472431108, e-mail: berikuly003@mail.ru.

МРНТИ 87.21.07; 68.05.41

УДК 631.41:581.5

<https://doi.org/10.52269/SKVC2621239>

ОСОБЕННОСТИ БИОАККУМУЛЯЦИИ И ТРАНСЛОКАЦИИ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ В СИСТЕМЕ «ПОЧВА–РАСТЕНИЕ»: ФАКТОРЫ И МЕХАНИЗМЫ

Шынберген Ә.С.* – докторант ОП «8D08101 – Агрономия», НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», г. Костанай, Республика Казахстан.

Нугманов А.Б. – к.с.-х.н., декан факультета сельскохозяйственных наук, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», г. Костанай, Республика Казахстан.

Жумалынов К.А. – докторант ОП «8D05101 – Биология», НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», г. Костанай, Республика Казахстан.

Казбекова К.А. – магистр педагогических наук по ОП «7M01503 – Химия», НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», г. Костанай, Республика Казахстан.

Загрязнение почв тяжёлыми металлами относится к наиболее устойчивым формам деградации агроэкосистем, поскольку металлы не подвергаются биодеструкции и накапливаются в почвенном профиле, постепенно переходя в растения и далее в трофические цепи. Цель обзора – систематизировать современные данные о биоаккумуляции и транслокации тяжёлых металлов в системе «почва–растение» и оценить роль ключевых физико-химических и биологических факторов в их подвижности. Задачи работы включают анализ источников поступления металлов в почву, рассмотрение форм нахождения и биодоступности, описание молекулярных механизмов корневого поглощения и ксилемного транспорта, а также обобщение количественных показателей биоаккумуляции и транслокации. Методология построена на обзоре научных публикаций, индексированных в базах данных Scopus, Web of Science, PubMed и eLibrary, преимущественно за 2011–2025 годы. Основные результаты показывают, что эффективность накопления и транспорта определяется типом металла, кислотностью почвы, содержанием органического вещества, окислительно-восстановительными условиями ризосферы и активностью специфических белков-переносчиков

семейств HMA, NRAMP, ZIP, ABC и YSL. Кадмий характеризуется максимальным коэффициентом биоаккумуляции, тогда как никель – наиболее высокой подвижностью в системе «корень–побег». Практическая значимость работы заключается в обобщении принципов выбора растений для фиторемедиации загрязнённых почв и обеспечения безопасности сельскохозяйственной продукции.

Ключевые слова: тяжёлые металлы, биоаккумуляция, транслокация, ризосфера, гипераккумуляторы, фиторемедиация, кадмий.

«ТОПЫРАҚ–ӨСІМДІК» ЖҮЙЕСІНДЕ АУЫР МЕТАЛДАРДЫҢ БИОАККУМУЛЯЦИЯСЫ МЕН ТРАНСЛОКАЦИЯСЫНЫҢ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ: ФАКТОРЛАР МЕН МЕХАНИЗМДЕР

Шынберген Ә.С.* – «8D08101 – Агрономия» ББ докторанты, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қостанай қ., Қазақстан Республикасы.

Нугманов А.Б. – а.ш.ғ.к., ауыл шаруашылығы ғылымдары факультетінің деканы, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қостанай қ., Қазақстан Республикасы
Жумалынов К.А. – «8D05101 – Биология» ББ бағдарламасының докторанты, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қостанай қ., Қазақстан Республикасы.

Казбекова К.А. – «7M01503 Химия» ББ бағдарламасы бойынша педагогика ғылымдарының магистрі, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қостанай қ., Қазақстан Республикасы.

Топырақтың ауыр металдармен ластануы агроэкожүйелердің деградациясының ең тұрақты түрлерінің бірі болып табылады, өйткені бұл элементтер биодеструкцияға ұшырамайды және топырақ профилінде жинақталып, өсімдікке, одан әрі қоректік тізбекке өтеді. Шолудың мақсаты – «топырақ–өсімдік» жүйесіндегі ауыр металдардың биоаккумуляциясы мен транслокациясы туралы заманауи деректерді жүйелеу және олардың қозғалғыштығына әсер ететін негізгі физика-химиялық және биологиялық факторлардың рөлін бағалау. Жұмыстың міндеттері металдардың топыраққа түсу көздерін талдауды, оларды кездесу формалары мен биожетімділігін қарастыруды, түбірлік сіңірудің және ксилемалық тасымалдаудың молекулалық механизмдерін сипаттауды, сондай-ақ биоаккумуляция мен транслокацияның сандық көрсеткіштерін жалпылауды қамтиды. Әдістеме негізінен 2011–2025 жылдары Scopus, Web of Science, PubMed және eLibrary дерекқорларында индекстелген ғылыми басылымдарға шолу жасауға негізделген. Негізгі нәтижелер жинақталудың және тасымалдаудың тиімділігі металдың түріне, топырақтың қышқылдығына, органикалық заттың құрамына, ризосфераның тотығу-тотықсыздану жағдайларына және HMA, NRAMP, ZIP, ABC, YSL тұқымдастарының тасымалдаушы ақуыздарының белсенділігіне байланысты екенін көрсетеді. Кадмий ең жоғары биоаккумуляция коэффициентімен сипатталса, никель түбір–өркен жүйесінде ең жоғары қозғалғыштыққа ие. Жұмыстың тәжірибелік маңыздылығы фиторемедиация үшін өсімдіктерді таңдау қағидаларын және ауыл шаруашылығы өнімінің қауіпсіздігін қамтамасыз ету бойынша ұсыныстарды жалпылауда жатыр.

Түйінді сөздер: ауыр металдар, биоаккумуляция, транслокация, ризосфера, гипераккумуляторлар, фиторемедиация, кадмий.

FEATURES OF BIOACCUMULATION AND TRANSLOCATION OF HEAVY METALS IN THE SOIL–PLANT SYSTEM: FACTORS AND MECHANISMS

Shynbergen A.S.* – PhD student, “8D08101 – Agronomy” educational program, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Kostanay, Republic of Kazakhstan.

Nugmanov A.B. – Candidate of Agricultural Sciences, Dean of the Faculty of agricultural sciences, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Kostanay, Republic of Kazakhstan.

Zhumalynov K.A. – PhD student, “8D05101 – Biology” educational program, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Kostanay, Republic of Kazakhstan.

Kazbekova K.A. – Master of Pedagogical Sciences, “7M01503 Chemistry” educational program, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Kostanay, Republic of Kazakhstan.

Soil contamination by heavy metals represents one of the most persistent forms of agroecosystem degradation, since metals are not biodegradable and gradually accumulate in the soil profile, subsequently entering plants and the food chain. The aim of this review is to systematise recent findings on bioaccumulation and translocation of heavy metals in the soil–plant system and to assess the role of key physical-chemical and biological factors that regulate metal mobility. The objectives include analysing anthropogenic and natural inputs of metals into soils, examining their occurrence forms and bioavailability, describing the molecular mechanisms of root uptake and xylem transport, and summarising quantitative indices of bioaccumulation and translocation. The methodology was based on a critical synthesis of scientific publications indexed in Scopus, Web of Science, PubMed and eLibrary, predominantly published between 2011 and 2025. The principal results demonstrate that the efficiency of accumulation and transport depends on metal type, soil pH, organic matter

content, redox conditions of the rhizosphere, and the activity of specific transporter proteins of the HMA, NRAMP, ZIP, ABC and YSL families. Cadmium exhibits the highest bioaccumulation factor, while nickel shows the highest root-to-shoot mobility. The practical value of the review lies in generalising the principles of plant selection for phytoremediation of contaminated soils and ensuring the safety of agricultural production.

Keywords: heavy metals, bioaccumulation, translocation, rhizosphere, hyperaccumulators, phytoremediation, cadmium.

Введение. Загрязнение почв тяжёлыми металлами (ТМ) занимает одно из центральных мест в перечне глобальных экологических проблем XXI века. В отличие от органических поллютантов, ТМ не подвергаются биологическому разложению, накапливаются в верхних горизонтах почв, постепенно мигрируют в системе «почва–растение» и попадают в трофические цепи, представляя серьёзную угрозу для здоровья человека и устойчивости агроэкосистем [1, с. 4; 2, с. 7]. Согласно современным оценкам, более 10 миллионов площадок по всему миру официально классифицированы как загрязнённые тяжёлыми металлами, а суммарная площадь таких территорий превышает 80 тыс. км² [3, с. 2].

Антропогенные источники поступления ТМ в почву многочисленны и включают атмосферное осаждение продуктов горнодобывающей и металлургической промышленности, сжигание угля и углеводородов, орошение сточными водами, внесение минеральных удобрений и пестицидов, применение животноводческих отходов и осадков сточных вод [4, с. 2; 5, с. 9; 6, с. 2]. В Казахстане проблема носит особенно острый характер в районах расположения металлургических предприятий, в том числе в Северном, Восточном и Южном регионах, где зафиксированы существенные превышения предельно допустимых концентраций приоритетных поллютантов – цинка, свинца, меди и кадмия [7, с. 93; 8, с. 77].

Степень изученности темы достаточно высокая: за последние два десятилетия выполнен значительный объём работ, посвящённых отдельным аспектам поведения ТМ в почве, биодоступности, генетике транспорта металлов в растениях, а также применению различных гипераккумуляторов в технологиях фиторемедиации [9, с. 169; 10, с. 1; 11, с. 4]. Вместе с тем стремительное накопление данных молекулярно-биологического и экологического характера, особенно после 2020 года, делает целесообразным новый обобщающий анализ. Обзорные публикации последних лет [1, с. 2; 4, с. 2; 12, с. 1] свидетельствуют о смене акцента: от описательных оценок концентраций ТМ к количественной интегральной оценке коэффициентов биоаккумуляции (BCF) и транслокации (TF).

Цель работы – обобщить и критически проанализировать современные представления о биоаккумуляции и транслокации тяжёлых металлов в системе «почва–растение», уделяя особое внимание физико-химическим, физиологическим и молекулярно-генетическим механизмам, определяющим эффективность перемещения металлов из почвы в надземные органы растений.

Для достижения цели поставлены следующие **задачи**:

- 1) систематизировать данные об источниках и формах нахождения ТМ в почвах;
- 2) рассмотреть факторы биодоступности ТМ в ризосфере;
- 3) описать механизмы корневого поглощения и ксилемно-флоэмной транслокации;
- 4) охарактеризовать стратегии гипераккумуляторов;
- 5) обобщить количественные показатели биоаккумуляции и транслокации;
- 6) оценить практическое значение полученных результатов для фиторемедиации и пищевой безопасности.

Научная новизна работы заключается в интегральном анализе данных молекулярно-генетических исследований последних лет в сочетании с количественными показателями биоаккумуляции и транслокации, полученными в недавних метаанализах и региональных эмпирических исследованиях. Практическая значимость состоит в систематизации знаний, необходимых для разработки агроэкологических рекомендаций, нацеленных на минимизацию накопления токсичных металлов в продовольственных культурах, а также для обоснования стратегий фиторемедиации территорий, подвергшихся техногенному воздействию.

Материалы и методы исследования. Работа выполнена в виде описательно-аналитического обзора с элементами систематизированного литературного анализа. Поиск источников проводился в международных базах данных Scopus, Web of Science, PubMed, Google Scholar, а также в национальных и региональных платформах eLibrary, КиберЛенинка и научных журналах Казахстана с открытым доступом. Использовались поисковые запросы на русском и английском языках, включая комбинации ключевых слов «тяжёлые металлы», «биоаккумуляция», «транслокация», «гиперакумуляторы», «фиторемедиация», «почва–растение», «heavy metals», «bioaccumulation», «translocation», «hyperaccumulator», «soil–plant system», «phytoremediation», «cadmium uptake», «metal transporters».

В обзор включались публикации, удовлетворяющие следующим критериям: принадлежность к рецензируемым научным журналам или специализированным монографиям; индексация в базах Scopus и/или Web of Science (для зарубежных источников); тематическая сосредоточенность на механизмах поглощения, транспорта и накопления ТМ растениями; предпочтительно – публикации, вышедшие в период с 2011 по 2025 год, при этом для базовых концептуальных работ допускались более ранние издания. Особое внимание уделялось обзорным статьям и метаанализам, поскольку именно они отражают консолидированное состояние знаний в данной предметной области.

Анализ собранного материала проводился по тематическим блокам: а) источники и формы ТМ в почве; б) факторы биодоступности; в) механизмы поглощения и переноса; г) экологические стратегии растений; д) количественные индикаторы (коэффициенты биоаккумуляции и транслокации); е) практические приложения. Качественный синтез данных дополнен сопоставлением количественных показателей по приоритетным элементам: кадмию (Cd), свинцу (Pb), цинку (Zn), никелю (Ni), меди (Cu), хрому (Cr) и мышьяку (As). Всего в окончательный анализ включено 19 ключевых источников, из которых более 70 % опубликованы в последние пять лет, что соответствует современному состоянию проблемы.

Результаты. Источники тяжёлых металлов в почве традиционно подразделяются на природные (геогенные) и антропогенные. К природным относятся выветривание материнских пород, вулканическая деятельность и атмосферные процессы переноса минеральной пыли. Антропогенные источники существенно превосходят природные по интенсивности и включают добычу полезных ископаемых, металлургию, сжигание ископаемого топлива, транспорт, агрохимическую обработку (применение фосфорных удобрений, пестицидов, осадков сточных вод, навоза), а также бытовые и промышленные отходы. Именно антропогенный вклад определяет основную часть избыточного содержания приоритетных металлов (Cd, Pb, Zn, Cu, As) в почвах сельскохозяйственного назначения [4, с. 2; 6, с. 2].

В почве металлы могут находиться в нескольких химических формах: водорастворимой, обменной, связанной с органическим веществом, оксидами Fe и Mn, карбонатами и остаточной (литогенной) фракции. Биологически наиболее значимы первые две формы, поскольку именно они определяют непосредственную доступность для корневой системы. Соотношение между подвижными и связанными формами зависит от типа почвы, её гранулометрического состава, содержания органического вещества, реакции среды и окислительно-восстановительных условий [13, с. 45]. По данным казахстанских исследований, в техногенно нарушенных почвах ТМ концентрируются преимущественно в поверхностном слое, причём в районах металлургических предприятий регистрируется превышение ПДК как по валовым, так и по подвижным формам [7, с. 93; 8, с. 77].

Биодоступность ТМ определяет фактическое поступление элементов в растение и контролируется комплексом почвенных и биологических факторов. Кислотность почвенного раствора является одним из решающих параметров: снижение pH ведёт к десорбции металлов с поверхности минералов и органических коллоидов, увеличению их подвижности и усиленному поглощению корнями. Глобальный метаанализ, выполненный на основе 547 пар наблюдений из 82 исследований, показал, что коэффициент биоаккумуляции (BF) кадмия и цинка экспоненциально снижается с ростом pH, тогда как для свинца наблюдается обратная зависимость – подвижность увеличивается в щелочных условиях из-за специфики химического поведения иона Pb^{2+} [3, с. 4–5; 5, с. 9].

Содержание органического вещества также является важным фактором: гумусовые кислоты способны прочно связывать металлы в стабильные хелатные комплексы, уменьшая их подвижность; вместе с тем некоторые низкомолекулярные органические лиганды, напротив, повышают растворимость металлов. Важное значение имеют окислительно-восстановительные условия: на затопленных почвах создаются восстановительные условия, при которых поведение мышьяка кардинально меняется – он переходит в более подвижную форму As(III) и усиленно накапливается рисом и другими гидрофитами [4, с. 4].

Существенную роль играют ризосферные процессы. Растения активно изменяют химию ризосферы за счёт выделения протонов (H^+), органических кислот (лимонной, яблочной, малоновой), низкомолекулярных пептидов и фенольных соединений. Эти выделения могут как мобилизовать металлы (повышая их доступность), так и иммобилизовать их (формируя нерастворимые комплексы), что является важным звеном защитной стратегии корней [14, с. 5]. Микроорганизмы ризосферы – ризобактерии, способствующие росту растений (PGPR), и арбускулярно-микоризные грибы – способны существенно изменять биодоступность металлов посредством секреции хелаторов, изменения pH и активизации специфических механизмов резистентности [1, с. 6; 15, с. 2-3].

Концентрация металла в почве также определяет эффективность накопления. Установлены пороговые значения общего содержания ТМ, при превышении которых коэффициент биоаккумуляции опускается ниже 1,0: для кадмия – 214,8 мг/кг, для меди – 669,5 мг/кг, для свинца – 31 352,3 мг/кг, для мышьяка – 8 291,1 мг/кг, для цинка – 18 657,3 мг/кг. Снижение BF выше указанных порогов связано с проявлением фитотоксических эффектов, нарушающих ростовые процессы и блокирующих механизмы поглощения. Температура и влажность выступают важными климатическими модификаторами биодоступности: для кадмия наблюдается выраженная положительная корреляция коэффициента биоаккумуляции со среднегодовой температурой ($p < 0,001$) – при значениях среднегодовой температуры менее 10 °C средний BF составляет 4,06, тогда как при среднегодовой температуре выше 20 °C достигает 8,43 [3, с. 5, 11].

Гранулометрический и минералогический состав почвы оказывает существенное влияние на удержание ТМ. Глинистые минералы (монтмориллонит, иллит, каолинит), оксиды и гидроксиды Fe и Mn, а также гумусовые вещества являются основными сорбентами, удерживающими катионы металлов и снижающими их подвижность [13, с. 112]. Содержание Cd, Pb и Zn в почвах в значительной степени определяется составом почвообразующих пород: на лёгких песчаных почвах металлы более подвижны

и доступны растениям, тогда как на тяжёлых суглинистых и торфяных почвах – значительно более прочно фиксированы [6, с. 3-4].

Поглощение ТМ корневой системой осуществляется по двум основным путям: апопластному (через клеточные стенки и межклеточные пространства) и симпластному (через цитоплазму с участием мембранных переносчиков). Апопластный транспорт ограничен поясками Каспари в эндодерме, поэтому для проникновения в проводящую систему металлы должны быть перенесены через плазматическую мембрану корневых клеток. На этом этапе ключевую роль играют специализированные транспортные белки. Поскольку для большинства токсичных ТМ (Cd, Pb, As) в растениях отсутствуют специфические переносчики, их поступление осуществляется через белки, предназначенные для поглощения эссенциальных элементов – Fe, Zn, Mn, Ca, что связано с близкими физико-химическими свойствами иона металла и его аналога. Установлено, что в поглощении кадмия задействованы по меньшей мере пять семейств транспортных белков: NRAMP, HMA, ZIP, ABC и YSL. Обобщённая характеристика этих семейств приведена в таблице 1 [10, с. 3].

Таблица 1 – Основные семейства мембранных переносчиков, участвующих в транспорте тяжёлых металлов в растениях [10, с. 3; 14, с. 7]

Семейство	Функциональная роль	Транспортируемые металлы	Примеры белков
NRAMP	Поглощение из почвы; ремобилизация металлов из вакуоли	Fe, Mn, Cd, Zn, Ni	<i>AtNRAMP1</i> , <i>AtNRAMP3–4</i> , <i>OsNramp5</i>
HMA (P1B-ATPase)	Загрузка ксилемы; вакуольная секвестрация; экспорт металлов из цитоплазмы	Zn, Cd, Pb, Cu, Co	<i>AtHMA2–4</i> , <i>AhHMA4</i> , <i>OsHMA2–3</i>
ZIP	Захват двухвалентных катионов корневыми клетками	Zn, Fe, Mn, Cd	<i>AtIRT1</i> , <i>OsZIP5–9</i> , <i>AtZIP1–12</i>
ABC	АТФ-зависимый транспорт металл-хелатных комплексов в вакуоль и из клетки	Cd, Pb, As	<i>AtABCC1–3</i> , <i>OsABCC9</i> , <i>AtPDR8</i>
YSL	Транспорт металл-никотинаминовых комплексов; межорганное распределение	Fe, Zn, Cu, Ni, Mn	<i>OsYSL2</i> , <i>AtYSL1–3</i> , <i>TcYSL3</i>
CAX	Антипорт катион/H ⁺ ; гомеостаз Ca и других катионов	Ca, Mn, Cd, Ni	<i>AtCAX1–4</i> , <i>OsCAX</i>
CDF (MTP)	Секвестрация металлов в вакуоль и аппарат Гольджи	Zn, Mn, Ni, Co, Cd	<i>AtMTP1</i> , <i>AhMTP1–3</i> , <i>OsMTP11</i>

У риса (*Oryza sativa*) поглощение Cd корнями опосредуется преимущественно белками *OsNramp1*, *OsNramp5*, *OsZIP5*, *OsZIP6*, *OsZIP9*, *OsiIRT1* и *OsiIRT2*. Особое значение имеет *OsNramp5*, мутации которого приводят к резкому снижению накопления кадмия в зерне – этот факт активно используется в селекционных программах для создания низкокадмиевых сортов риса. У модельного растения *Arabidopsis thaliana* захват Cd корнями осуществляется через *AtIRT1* – основной переносчик железа двухвалентного, обладающий низкой специфичностью к субстрату. После проникновения в корневую клетку часть металла сразу же изолируется в вакуоли, что предотвращает токсическое действие на цитоплазматические процессы. У *Arabidopsis* вакуольная секвестрация Cd обеспечивается белками *AtHMA3*, *AtABCC1*, *AtABCC2*, *AtABCC3* и *AtMRP7*; у риса – *OsHMA3* и *OsABCC9*. Особое значение имеет *AtHMA3*, гиперэкспрессия которого приводит к удержанию Cd в корнях и резкому снижению его транспорта в надземные органы [4, с. 6; 10, с. 5, 7].

Транслокация ТМ из корня в побег является вторым ключевым этапом, лимитирующим накопление металлов в съедобных и фотосинтезирующих органах. Загрузка металла в ксилему осуществляется специализированными мембранными АТФазами Р-типа. У *Arabidopsis* эту функцию выполняют *AtHMA2* и *AtHMA4*, локализованные в плазматической мембране клеток перицикла и ксилемной паренхимы; у риса – *OsHMA2*. Загруженные в ксилему металлы транспортируются с восходящим током транспирационной воды в виде свободных ионов или комплексов с органическими лигандами – никотином, гистидином, цитратом, фитохелатинами. У растений-гиперакумуляторов уровень экспрессии генов HMA4 многократно повышен по сравнению с близкородственными неаккумуляторными видами: например, у *Arabidopsis halleri* – гиперакумулятора цинка и кадмия – высокая экспрессия *AhHMA4* обусловлена сочетанием модифицированных регуляторных последовательностей и амплификации числа копий гена. Дополнительный вклад в транслокацию вносят белки семейства YSL, ответственные за транспорт металлорганических комплексов; транспорт металлов с никотином через сосудистую систему обеспечивает их перераспределение между органами и доставку к развивающимся тканям, в том числе к семенам. Особый интерес представляет ретранспорт металлов из вегетативных органов

во флоэму и далее в репродуктивные структуры: у риса белок OsNramp2 опосредует ретранслокацию Cd, что напрямую влияет на накопление металла в зерне [10, с. 5-8; 14, с. 7-8].

Эффективность транслокации количественно характеризуется коэффициентом транслокации (TF), рассчитываемым как отношение концентрации металла в надземных органах к концентрации в корнях. Значения $TF > 1$ указывают на эффективный транспорт и характерны для гипераккумуляторов, тогда как $TF < 1$ свидетельствует о преимущественном удержании металла в корневой системе и характерен для видов, использующих стратегию фитостабилизации [9, с. 170].

Гиперакумуляторы – группа растений, способных накапливать в надземных органах концентрации металлов, многократно превосходящие фитотоксические пороги для большинства видов. Согласно классическим определениям, граничные значения концентраций для отнесения вида к гипераккумуляторам составляют: для Cd – 100 мг/кг сухой массы, для Zn – 10 000 мг/кг, для Ni – 1000 мг/кг, для Pb – 1000 мг/кг, для Cu – 1000 мг/кг [9, с. 170].

К настоящему времени в мире описано около 450 видов гипераккумуляторов, относящихся к 34 семействам цветковых растений. Подавляющее большинство принадлежит семейству Brassicaceae (около 25 %), за которым следуют Asteraceae, Caryophyllaceae, Plumbaginaceae, Cypripaceae, Violaceae, Poaceae, Fabaceae и Euphorbiaceae. Классическими модельными гипераккумуляторами являются: *Noccaea caerulescens* (*Thlaspi caerulescens*) – аккумулятор Zn и Cd; *Arabidopsis halleri* – аккумулятор Zn и Cd; *Pteris vittata* – аккумулятор As; *Alyssum murale*, *Berkheya coddii* – аккумуляторы Ni; *Sedum alfredii*, *Sedum plumbizincicola* – аккумуляторы Cd и Zn [14, с. 2].

Таблица 2 – Основные гипераккумулирующие виды растений и их применение в фиторемедиации

Вид	Семейство	Аккумулируемые металлы	Технология фиторемедиации
<i>Noccaea caerulescens</i>	Brassicaceae	Zn, Cd	Фитоэкстракция
<i>Arabidopsis halleri</i>	Brassicaceae	Zn, Cd	Фитоэкстракция
<i>Pteris vittata</i>	Pteridaceae	As (до 22 000 мг/кг)	Фитоэкстракция
<i>Alyssum murale</i>	Brassicaceae	Ni	Фитоэкстракция, фитомайнинг
<i>Berkheya coddii</i>	Asteraceae	Ni	Фитоэкстракция
<i>Sedum plumbizincicola</i>	Crassulaceae	Cd, Zn	Фитоэкстракция
<i>Brassica juncea</i>	Brassicaceae	Cd, Se, Cu	Индукцированная фитоэкстракция, фитоволатилизация
<i>Helianthus annuus</i>	Asteraceae	Pb, Cd, Zn, U	Ризофильтрация, фитоэкстракция
<i>Salix viminalis</i> , <i>Populus spp.</i>	Salicaceae	Cd, Cu, Pb, Zn	Фитоэкстракция, фитостабилизация

Гипераккумулирующие свойства определяются комплексом адаптаций: усиленным захватом металла корнями (повышенная экспрессия ZIP- и IRT-транспортёров), эффективной загрузкой в ксилему (гиперэкспрессия HMA4), активной вакуольной секвестрацией в листьях (HMA3), интенсивным хелатированием металлов внутриклеточными лигандами и усиленной антиоксидантной защитой [14, с. 5, 8].

Фиторемедиация как технология восстановления загрязнённых почв основана на использовании гипераккумуляторов или других толерантных видов и включает несколько подходов: фитоэкстракция, фитостабилизация, ризофильтрация, фитоволатилизация и фитодеградация [11, с. 4-5; 16, с. 2; 17, с. 4].

Коэффициент биоаккумуляции (BF, bioaccumulation factor) и коэффициент транслокации (TF) являются основными количественными индикаторами эффективности перемещения металлов в системе «почва–растение». Глобальный синтез на основе 547 наблюдений показал значительные межэлементные различия: средние значения BF составили $10,0 \pm 1,3$ для Cd, $5,9 \pm 2,1$ для Mn, $5,6 \pm 1,1$ для Zn, $4,9 \pm 2,3$ для As, $3,4 \pm 0,9$ для Ni, $3,3 \pm 3,3$ для Cr, $2,2 \pm 0,3$ для Cu, $0,9 \pm 0,2$ для Pb и $0,8 \pm 0,4$ для Fe [3, с. 4].

По коэффициенту транслокации лидирует никель: средний TF гипераккумуляторов Ni составляет $19,7 \pm 10,6$, что свидетельствует о преимущественной локализации никеля в листьях и стеблях. У вида *Noccaea tymphaea* TF достигает 135,5 за счёт связывания иона никеля с низкомолекулярными карбоксильными кислотами в листьях. Напротив, у кадмия, несмотря на максимальный BF, средний TF существенно ниже ($1,8 \pm 0,1$), что обусловлено активной вакуольной секвестрацией в корнях и ограниченным выходом в ксилему [3, с. 4, 9].

Региональные эмпирические данные подтверждают выявленные закономерности. В исследовании, выполненном на тепличных томатах в г. Шымкент (Республика Казахстан), ряды биоаккумуляции в порядке убывания составили: для растений Cu > Zn > Pb > Cr > Cd, для плодов Cd > Cu > Zn > Pb. Зафиксировано превышение ПДК свинца в плодах (0,6 мг/кг при ПДК 0,5), кадмия – в 8 раз, цинка – в 7 раз, меди – в 6 раз [7, с. 91, 93–94].

Аналогичные результаты получены в исследовании, выполненном в районе Музаффаргарх (Пакистан) на овощных культурах, орошаемых сточными водами. Средние концентрации металлов в овощах располагались в ряду Ni > Mn > Cr > Pb > Cu > Fe > Zn > Cd. Шпинат демонстрировал самые

высокие значения TF, а индекс риска для здоровья (HRI) по свинцу для детей в цветной капусте достигал 5,28 [12, с. 1].

Важно подчеркнуть, что значения коэффициентов биоаккумуляции и транслокации в условиях контролируемых лабораторных экспериментов и в полевых условиях могут существенно различаться. Для кадмия, цинка и никеля BF и TF, измеренные в горшечных опытах, как правило, выше, чем в полевых условиях, тогда как для железа наблюдается обратная закономерность – его транслокация эффективнее при свободной корневой архитектуре в естественных условиях.

Обсуждение. Анализ современной литературы позволяет выделить ряд устойчивых закономерностей в поведении ТМ в системе «почва–растение». Во-первых, эффективность биоаккумуляции и транслокации является результирующим параметром, определяемым взаимодействием четырёх групп факторов: химической природы металла, физико-химических свойств почвы, видоспецифичных особенностей растений и условий окружающей среды. Это объясняет высокую вариабельность опубликованных значений BF и TF даже для одного и того же вида растения [6, с. 3-4].

Во-вторых, наблюдается фундаментальная разница в стратегиях между обычными и гипераккумулирующими растениями. У большинства сельскохозяйственных культур основной адаптацией является ограничение поступления металлов в надземные органы и активная вакуольная секвестрация в корнях. У гипераккумуляторов же наблюдается прямо противоположная стратегия: максимизация захвата, ускоренная транслокация и эффективная детоксикация в листьях. Эти различия имеют генетическую основу и связаны с конститутивно высоким уровнем экспрессии генов транспорта металлов [9, с. 171-172; 14, с. 8].

В-третьих, особое внимание заслуживает специфика поведения отдельных металлов. Кадмий демонстрирует относительно низкий TF из-за активной вакуольной секвестрации в корнях; никель, напротив, преимущественно мигрирует в надземные органы. Свинец отличается выраженной зависимостью подвижности от pH: его доступность возрастает в кислых почвах [18, с. 2, 5]. Хром характеризуется сложной химией: токсичность Cr(VI) на порядки выше, чем Cr(III), а в растениях преобладает удержание в корневой системе [19, с. 2, 5]. Мышьяк ведёт себя как анион (арсенат, арсенит) и его подвижность определяется окислительно-восстановительными условиями [4, с. 4].

В-четвёртых, продолжительность экспозиции и условия проведения экспериментов существенно влияют на показатели биоаккумуляции и транслокации. Растения на хронически загрязнённых почвах демонстрируют более высокие значения BF и TF по сравнению с растениями на впервые загрязнённых субстратах, что отражает адаптивную эволюцию или эпигенетическую перестройку механизмов поглощения, биосинтеза хелаторов и регуляции транспортных белков. Вместе с тем исследования последних лет показывают, что лабораторные оценки коэффициентов биоаккумуляции и транслокации могут существенно завышать реальные полевые показатели – это необходимо учитывать при экстраполяции результатов горшечных экспериментов на полевые условия [3, с. 5, 10].

Практическое значение результатов обзора многогранно. С одной стороны, понимание молекулярных механизмов транспорта ТМ позволяет вести направленную селекцию сельскохозяйственных культур с пониженным накоплением кадмия и других токсичных металлов в съедобных органах: уже идентифицированы ключевые гены-мишени – подавление OsNRAMP5 у риса снижает поступление Cd в зерно более чем в десять раз, а повышение экспрессии OsHMA3 усиливает вакуольную секвестрацию Cd в корнях [4, с. 6; 10, с. 6]. С другой стороны, использование гипераккумуляторов в фиторемедиации демонстрирует потенциал для постепенной очистки загрязнённых почв [11, с. 4-5; 16, с. 2]. Для эффективного применения фитозэкстракции необходим тщательный подбор видов с учётом профиля загрязнения: *Sedum plumbizincicola* – для Cd и Zn, *Alyssum murale* – для Ni, *Pteris vittata* – для As, *Bassia indica* – для Pb-загрязнённых почв в режиме фитостабилизации [3, с. 11].

Проблема пищевой безопасности остаётся одной из наиболее актуальных. Накопление ТМ в овощных и зерновых культурах представляет прямую угрозу здоровью человека через пищевую цепь. Региональные исследования в Казахстане [7, с. 93-94; 8, с. 77] и других странах [2, с. 7; 6, с. 3-4; 12, с. 1] документируют превышения ПДК для приоритетных металлов в овощах.

Не менее перспективным направлением является использование микроорганизмов ризосферы для усиления или, наоборот, снижения биодоступности ТМ. Бактерии родов *Pseudomonas*, *Bacillus* и арбускулярно-микоризные грибы рода *Glomus* способны эффективно мобилизовать или иммобилизовать металлы в почве [1, с. 6; 15, с. 2-3]. Комбинированные технологии «растение – микроорганизм» обладают существенно более высокой эффективностью по сравнению с моноподходами и рассматриваются как ключевое направление развития фиторемедиации [11, с. 4-5; 15, с. 2-3].

Особое внимание следует уделить вопросам безопасной утилизации металлсодержащей биомассы, образующейся в процессе фитозэкстракции. Разрабатываемые подходы включают пиролиз с получением биочаров, сжигание с энергетической рекуперацией металлов («фитомайнинг»), а также использование биомассы в качестве сырья для получения биоэтанола или биогаза [11, с. 5].

Заключение. Биоаккумуляция и транслокация тяжёлых металлов в системе «почва–растение» представляют собой сложный многоступенчатый процесс, регулируемый взаимодействием физико-химических свойств почвы, физиологических особенностей растения и молекулярно-генетических механизмов транспорта металлов. Эффективность поглощения, корневого транспорта, ксилемной

загрузки и листового депонирования определяется специфическими белками-переносчиками семейств HMA, NRAMP, ZIP, ABC и YSL, экспрессия и активность которых существенно различаются между обычными и гипераккумулирующими видами растений.

Современные количественные данные подтверждают наличие принципиальных межэлементных различий в поведении ТМ: кадмий характеризуется наивысшими коэффициентами биоаккумуляции при умеренной транслокации, никель – максимальной мобильностью в надземные органы, свинец – ограниченным поглощением и зависимостью от pH, мышьяк – особым поведением в восстановительных условиях. Эти закономерности необходимо учитывать при разработке стратегий снижения накопления ТМ в продовольственных культурах и при выборе видов для фиторемедиации загрязнённых территорий.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются: углублённое изучение генетической регуляции транспорта металлов в условиях полевых экспериментов; разработка комбинированных стратегий фиторемедиации с применением микробных консорциумов (PGPR, арбускулярных микоризных грибов); создание сельскохозяйственных культур с минимальным накоплением токсичных металлов в съедобных органах методами селекции и геномной инженерии; систематический региональный мониторинг загрязнения почв и продукции в Казахстане и сопредельных регионах с целью обоснования мер агроэкологического регулирования и обеспечения пищевой безопасности населения.

Благодарности: Научные исследования выполнялись в рамках грантового программно-целевого финансирования исследований ученых по проекту на 2024-2026 годы по теме BR24992839 «Исследование воздействия экотоксикантов и инновационных агротехнологий на сельскохозяйственные земли и продукцию Костанайской области».

ЛИТЕРАТУРА:

1. **Nnaji N.D. Bioaccumulation for heavy metal removal: a review** [Text] / N.D. Nnaji, H. Onyeaka, T. Miri, C. Ugwa // SN Applied Sciences. – 2023. – Vol. 5. – Article 125. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05351-6>.
2. **Briffa J. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans** [Text] / J. Briffa, E. Sinagra, R. Blundell // Heliyon. – 2020. – Vol. 6, № 9. – Article e04691. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>.
3. **Huang W. Systematic evaluation of plant metals/metalloids accumulation efficiency: a global synthesis of bioaccumulation and translocation factors** [Text] / W. Huang, C. Zhang, B. Zhu, X. Liu, H. Xiao, S. Liu, H. Shao // Frontiers in Plant Science. – 2025. – Vol. 16. – Article 1602951. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1602951>.
4. **Wan Y. Heavy Metals in Agricultural Soils: Sources, Influencing Factors, and Remediation Strategies** [Text] / Y. Wan, J. Liu, Z. Zhuang, Q. Wang, H. Li // Toxics. – 2024. – Vol. 12, № 1. – Article 63. – DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics12010063>.
5. **Alengebawy A. Heavy Metals and Pesticides Toxicity in Agricultural Soil and Plants: Ecological Risks and Human Health Implications** [Text] / A. Alengebawy, S.T. Abdelkhalek, S.R. Qureshi, M.Q. Wang // Toxics. – 2021. – Vol. 9, № 3. – Article 42. – DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics9030042>.
6. **Zwolak A. Sources of soil pollution by heavy metals and their accumulation in vegetables: a review** [Text] / A. Zwolak, M. Sarzyńska, E. Szpyrka, K. Stawarczyk // Water, Air, & Soil Pollution. – 2019. – Vol. 230, № 7. – Article 164. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4221-y>.
7. **Курганбеков Ж. Накопление и распределение тяжёлых металлов в системе «почва–растение»** [Текст] / Ж. Курганбеков, А. Утебаев, Р. Мухамедов // Известия НАН РК. Серия химии и технологии. – 2022. – № 4. – С. 88–95. – DOI: <https://doi.org/10.32014/2518-1491.137>.
8. **Саркулова Ж.С. Содержание тяжёлых металлов в растениях, произрастающих на территории влияния выбросов Риддерского цинкового завода** [Текст] / Ж.С. Саркулова, Ф.Е. Козыбаева // Eurasian Journal of Ecology. – 2019. – Т. 58, № 1. – С. 75–84. – DOI: <https://doi.org/10.26577/EJE.2019.v58.i1.06>
9. **Rascio N. Heavy metal hyperaccumulating plants: how and why do they do it? And what makes them so interesting?** [Text] / N. Rascio, F. Navari-Izzo // Plant Science. – 2011. – Vol. 180, № 2. – P. 169–181. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.08.016>.
10. **Tao J. Advances in Genes-Encoding Transporters for Cadmium Uptake, Translocation, and Accumulation in Plants** [Text] / J. Tao, L. Lu // Toxics. – 2022. – Vol. 10, № 8. – Article 411. – DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics10080411>.
11. **Yan A. Phytoremediation: A Promising Approach for Revegetation of Heavy Metal-Polluted Land** [Text] / A. Yan, Y. Wang, S.N. Tan, M.L. Mohd Yusof, S. Ghosh, Z. Chen // Frontiers in Plant Science. – 2020. – Vol. 11. – Article 359. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00359>.
12. **Abbas M.T. Bioaccumulation and Mobility of Heavy Metals in the Soil-Plant System and Health Risk Assessment of Vegetables Irrigated by Wastewater** [Text] / M.T. Abbas, M.A. Wadaan, H. Ullah, M. Farooq, F. Fozia, I. Ahmad, M.F. Khan, A. Baabbad, Z. Ullah // Sustainability. – 2023. – Vol. 15, № 21. – Article 15321. – DOI: <https://doi.org/10.3390/su152115321>.

13. Кабата-Пендиас А. Микроэлементы в почвах и растениях [Текст] / А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас; пер. с англ. – М.: Мир. – 1989. – 439 с.
14. Skuza L. **Natural Molecular Mechanisms of Plant Hyperaccumulation and Hypertolerance towards Heavy Metals** [Text] / L. Skuza, I. Szućko-Kociuba, E. Filip, I. Božek // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2022. – Vol. 23, № 16. – Article 9335. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms23169335>.
15. Khatoun Z. **Microbial Contributions to Heavy Metal Phytoremediation in Agricultural Soils: A Review** [Text] / Z. Khatoun, M.C. Orozco-Mosqueda, G. Santoyo // *Microorganisms*. – 2024. – Vol. 12, № 10. – Article 1945. – DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms12101945>.
16. Sharma J.K. **Phytoremediation technologies and their mechanism for removal of heavy metal from contaminated soil: An approach for a sustainable environment** [Text] / J.K. Sharma, N. Kumar, N.P. Singh, A.R. Santal // *Frontiers in Plant Science*. – 2023. – Vol. 14. – Article 1076876. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1076876>.
17. Khan I.U. **A Green Approach Used for Heavy Metals «Phytoremediation» Via Invasive Plant Species to Mitigate Environmental Pollution: A Review** [Text] / I.U. Khan, S.S. Qi, F. Gul, S. Manan, J.K. Rono, M. Naz, X.N. Shi, H. Zhang, Z.C. Dai, D.L. Du // *Plants*. – 2023. – Vol. 12, № 4. – Article 725. – DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12040725>.
18. Manzoor M. **Lead availability and phytoextraction in the rhizosphere of Pelargonium species** [Text] / M. Manzoor, I. Gul, A. Manzoor, U.R. Kamboh, K. Hina, J. Kallerhoff, M. Arshad // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – Vol. 27, № 31. – P. 39753–39762. – DOI: 10.1007/s11356-020-08226-0.
19. Zulfiqar U. **Chromium toxicity, speciation, and remediation strategies in soil-plant interface: A critical review** [Text] / U. Zulfiqar, F.U. Haider, M. Ahmad, S. Hussain, M.F. Maqsood, M. Ishfaq, B. Shahzad, M.M. Waqas, B. Ali, M.N. Tayyab, S.A. Ahmad, I. Khan, S.M. Eldin // *Frontiers in Plant Science*. – 2023. – Vol. 13. – Article 1081624. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1081624>.

REFERENCES:

1. Nnaji N.D., Onyeaka H., Miri T., Ugwa C. **Bioaccumulation for heavy metal removal: a review.** *SN Applied Sciences*, 2023, vol. 5, art. 125. DOI: 10.1007/s42452-023-05351-6
2. Briffa J., Sinagra E., Blundell R. **Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans.** *Heliyon*, 2020, vol. 6, no. 9, art. e04691. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04691
3. Huang W., Zhang C., Zhu B., et al. **Systematic evaluation of plant metals/metalloids accumulation efficiency: a global synthesis of bioaccumulation and translocation factors.** *Frontiers in Plant Science*, 2025, vol. 16, art. 1602951. DOI: 10.3389/fpls.2025.1602951
4. Wan Y., Liu J., Zhuang Z., Wang Q., Li H. **Heavy metals in agricultural soils: sources, influencing factors, and remediation strategies.** *Toxics*, 2024, vol. 12, no. 1, art. 63. DOI: 10.3390/toxics12010063
5. Alengebawy A., Abdelkhalek S.T., Qureshi S.R., Wang M.Q. **Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: ecological risks and human health implications.** *Toxics*, 2021, vol. 9, no. 3, art. 42. DOI: 10.3390/toxics9030042
6. Zwolak A., Sarzynska M., Szpyrka E., Stawarczyk K. **Sources of soil pollution by heavy metals and their accumulation in vegetables: a review.** *Water, Air, & Soil Pollution*, 2019, vol. 230, no. 7, art. 164. DOI: 10.1007/s11270-019-4221-y
7. Kurganbekov Zh., Utebaev A., Mukhamedov R. **Nakoplenie i raspredelenie tyazhely'h metallov v sisteme "pochva-rastenie"** [Accumulation and distribution of heavy metals in the soil-plant system]. *Izvestiya NAN RK. Seriya himii i tehnologii*, 2022, no. 4, pp. 88-95. DOI: 10.32014/2518-1491.137 (In Russian)
8. Sarkulova Zh.S., Kozybaeva F.E. **Soderzhanie tyazhely'h metallov v rasteniyah, proizvodstvennykh na territorii vliyaniya vy'brossov Ridderskogo cinkovogo zavoda** [Content of heavy metals in plants growing in the area affected by emissions of the Ridder zinc plant]. *Eurasian Journal of Ecology*, 2019, vol. 58, no. 1, pp. 75-84. DOI: <https://doi.org/10.26577/EJE.2019.v58.i1.06> (In Russian)
9. Rascio N., Navari-Izzo F. **Heavy metal hyperaccumulating plants: how and why do they do it? And what makes them so interesting?** *Plant Science*, 2011, vol. 180, no. 2, pp. 169-181. DOI: 10.1016/j.plantsci.2010.08.016
10. Tao J., Lu L. **Advances in genes-encoding transporters for cadmium uptake, translocation, and accumulation in plants.** *Toxics*, 2022, vol. 10, no. 8, art. 411. DOI: 10.3390/toxics10080411
11. Yan A., Wang Y., Tan S.N., Mohd Yusof M.L., Ghosh S., Chen Z. **Phytoremediation: a promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land.** *Frontiers in Plant Science*, 2020, vol. 11, art. 359. DOI: 10.3389/fpls.2020.00359
12. Abbas M.T., Wadaan M.A., Ullah H., et al. **Bioaccumulation and mobility of heavy metals in the soil-plant system and health risk assessment of vegetables irrigated by wastewater.** *Sustainability*, 2023, vol. 15, no. 21, art. 15321. DOI: 10.3390/su152115321.
13. Kabata-Pendias A., Pendias H. **Mikroelementy' v pochvah i rasteniyakh** [Trace elements in soils and plants]. Moscow, Mir, 1989, 439 p. (In Russian)

14. Skuza L., Szucko-Kociuba I., Filip E., Bozek I. Natural molecular mechanisms of plant hyperaccumulation and hypertolerance towards heavy metals. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, vol. 23, no. 16, art. 9335. DOI: 10.3390/ijms23169335
15. Khatoun Z., Orozco-Mosqueda M.C., Santoyo G. Microbial contributions to heavy metal phytoremediation in agricultural soils: a review. *Microorganisms*, 2024, vol. 12, no. 10, art. 1945. DOI: 10.3390/microorganisms12101945
16. Sharma J.K., Kumar N., Singh N.P., Santal A.R. Phytoremediation technologies and their mechanism for removal of heavy metal from contaminated soil: an approach for a sustainable environment. *Frontiers in Plant Science*, 2023, vol. 14, art. 1076876. DOI: 10.3389/fpls.2023.1076876
17. Khan I.U., Qi S.S., Gul F., et al. A green approach used for heavy metals "phytoremediation" via invasive plant species to mitigate environmental pollution: a review. *Plants*, 2023, vol. 12, no. 4, art. 725. DOI: 10.3390/plants12040725
18. Manzoor M., Gul I., Manzoor A., et al. Lead availability and phytoextraction in the rhizosphere of *Pelargonium* species. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, no. 31, pp. 39753-39762. DOI: 10.1007/s11356-020-08226-0
19. Zulfiqar U., Haider F.U., Ahmad M., et al. Chromium toxicity, speciation, and remediation strategies in soil-plant interface: a critical review. *Frontiers in Plant Science*, 2023, vol. 13, art. 1081624. DOI: 10.3389/fpls.2022.1081624

Сведения об авторах:

Шынберген Әлишер Сабырұлы* – докторант ОП «8D08101 – Агрономия», НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», Республика Казахстан, 110000, г. Костанай, пр. Абая, 28/1, тел.: 87083020024, e-mail: Shynbergen2002@gmail.com.

Нугманов Алмабек Батыржанович – кандидат сельскохозяйственных наук, декан факультета сельскохозяйственных наук, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», Республика Казахстан, 110005, г. Костанай, пр. Абая, 28, тел.: 87142558463, e-mail: almabek@list.ru.

Жумалынов Куаныш Ансаганович – докторант ОП «8D05101 – Биология», НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», Республика Казахстан, 110000, г. Костанай, пр., Абая 28/1, тел.: 87072032523, e-mail: zhumalynov.k@mail.ru.

Казбекова Карина Азаматовна – магистр педагогических наук по ОП «7M01503 – Химия», НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», Республика Казахстан, 110000 г. Костанай, пр., Абая 28/1, тел.: 87054662710 e-mail: karina09081999@gmail.com.

Шынберген Әлишер Сабырұлы* – «8D08101 – Агрономия» ББ докторанты, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қостанай қ., Қазақстан Республикасы, 110000, Қостанай қ., Абай даңғ., 28/1, тел.: 87083020024, e-mail: Shynbergen2002@gmail.com.

Нугманов Алмабек Батыржанович – ауыл шаруашылығы ғылымдарының кандидаты, ауыл шаруашылығы ғылымдары факультетінің деканы, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қазақстан Республикасы, 110005, Қостанай қ., Абай даңғ., 28, тел.: 87142558463, e-mail: almabek@list.ru.

Жумалынов Куаныш Ансаганович – «8D05101 – Биология» ББ бағдарламасының докторанты, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қазақстан Республикасы, 110000, Қостанай қ., Абай даңғ., 28/1, тел.: 87072032523, e-mail: zhumalynov.k@mail.ru.

Казбекова Карина Азаматқызы – «7M01503 Химия» ББ бойынша педагогика ғылымдарының магистрі, «Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті» КЕАҚ, Қазақстан Республикасы, 110000, Қостанай қ., Абай даңғ., 28/1, тел.: 87054662710, e-mail: karina09081999@gmail.com.

Shynbergen Alisher Sabyruly* – PhD student, "8D08101 – Agronomy" educational program, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Kostanay, Republic of Kazakhstan, 110000, Kostanay, 28/1 Abai Ave., tel.: 87083020024, e-mail: Shynbergen2002@gmail.com.

Nugmanov Almabek Batyrzhanovich – Candidate of Agricultural Sciences, Dean of the Faculty of agricultural sciences, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Republic of Kazakhstan, 110005, Kostanay, 28 Abai Ave., tel.: 8714558463, e-mail: almabek@list.ru.

Zhumalynov Kuanysh Ansaganovich – PhD student, "8D05101 – Biology" educational program, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Republic of Kazakhstan, 110000, Kostanay, 28/1 Abai Ave., tel.: 87072032523, e-mail: zhumalynov.k@mail.ru.

Kazbekova Karina Azamatovna – Master of Pedagogical Sciences, "7M01503 Chemistry" educational program, Akhmet Baitursynuly Kostanay Regional University NLC, Republic of Kazakhstan, 110000, Kostanay, 28/1 Abai Ave., tel.: 87054662710, e-mail: karina09081999@gmail.com.