Научная статья
УДК 581.526.4:504.062

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА РАСТЕНИЙ-ГИПЕРАККУМУЛЯТОРОВ ДЛЯ ФИТОРЕМЕДИАЦИИ ПОЧВ ОТ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Нгуен Дык Ань, кандидат технических наук, Российско-Вьетнамский тропический центр, Вьетнаме, Нячанг, nguen_dyk@inbox.ru

Аннотация. Практическое применение технологий фитоэкстракции ограничивается необходимостью сочетать высокую продуктивность фитомассы со способностью растений к гипернакоплению поллютантов. В работе представлены результаты комплексного скрининга кандидатных видов из семейств Brassicaceae, Poaceae, Fabaceae и папоротниковидных, культивируемых в модельных и полевых условиях на почвах с искусственным и историческим загрязнением цинком, кадмием, никелем и свинцом. Оценку проводили по морфометрическим параметрам, коэффициенту биоаккумуляции и транслокации, а также ключевым физиологическим маркерам стресса: антиоксидантной активности, уровню пролина, малонового диальдегида и параметрам флуоресценции хлорофилла. Особое внимание уделено молекулярно-физиологическим аспектам детоксикации, включая роль специфических транспортеров и органических лигандов в ксилемной транслокации. Установлено, что природные гипераккумуляторы (Thlaspi caerulescens, Alyssum montanum) сохраняют высокую толерантность фотосинтетического аппарата и эффективную вакуолярную компартментализацию ионов даже при экстремальных концентрациях металлов, тогда как у высокобиомассных культур регистрируется выраженный оксидативный стресс. Рассчитан интегральный показатель извлечения металлов, подтвердивший нецелесообразность использования традиционных агроценозов для глубокой очистки. Анализ полевых данных демонстрирует, что для достижения нормативных показателей качества почв требуется многолетнее

возделывание специализированных экотипов, что диктует необходимость вывода земель из хозяйственного оборота. Сформулированы критерии ботанического отбора, учитывающие не только аккумуляционный потенциал, но и инвазивные риски, а также требования к безопасной утилизации контаминированной фитомассы. Полученные данные обосновывают целесообразность создания смешанных фитоценозов и использования соматической гибридизации для преодоления ограничений, связанных с низкой продуктивностью природных гипераккумуляторов.

Ключевые слова: фиторемедиация; тяжёлые металлы; растения-гипераккумуляторы; фитоэкстракция; биологическое накопление; устойчивость растений.

Original article

ASSESSING THE POTENTIAL OF HYPERACCUMULATOR PLANTS FOR PHYTOREMEDIATION OF SOILS FROM HEAVY METALS

Nguen Dyk An, Candidate of Technical Sciences, Russian-Vietnamese Tropical Centre, Nha Trang, Vietnam, nguen_dyk@inbox.ru

Abstract. The practical implementation of phytoextraction technologies is limited by the biological tradeoff between phytomass productivity and the potential for pollutant hyperaccumulation. This paper presents the results of a comprehensive screening of candidate species from the Brassicaceae, Poaceae, Fabaceae, and Pteridophytes families, cultivated under model and field conditions in soils with artificial and historical contamination with zinc, cadmium, nickel, and lead. The evaluation was based on morphometric parameters, bioaccumulation and translocation coefficients, and key physiological stress markers: antioxidant activity, proline and malondialdehyde levels, and chlorophyll fluorescence parameters. Particular attention is paid to the molecular and physiological aspects of detoxification, including the role of specific transporters and organic ligands in xylem translocation. Natural

hyperaccumulators (Thlaspi caerulescens, Alyssum montanum) were found to maintain high photosynthetic tolerance and efficient vacuolar compartmentalization of ions even at extreme metal concentrations, whereas high-biomass crops exhibited pronounced oxidative stress. An integrated metal extraction index was calculated, confirming the inappropriateness of using traditional agrocenoses for deep remediation. Analysis of field data demonstrates that achieving standard soil quality indicators requires long-term cultivation of specialized ecotypes, necessitating the withdrawal of these lands from economic use. Criteria for botanical selection were formulated, taking into account not only accumulation potential but also invasive risks, as well as requirements for the safe disposal of contaminated phytomass. The data obtained substantiate a strategy for creating mixed phytocenoses and prioritizing somatic hybridization to overcome limitations of natural biomass.

Keywords: phytoremediation; heavy metals; hyperaccumulator plants; phytoextraction; bioaccumulation; plant tolerance.

Введение. Антропогенная трансформация почвенного покрова, сопровождающаяся накоплением токсичных металлов и металлоидов, диктует необходимость поиска экологически безопасных технологий реабилитации нарушенных территорий. В современной ботанике и экологической физиологии растений для решения данной проблемы применяют два основных подхода: фитоэкстракцию и фитостабилизацию. Если фитостабилизация базируется на иммобилизации поллютантов в ризосферной зоне за счет корневых экссудатов и снижения их миграционной подвижности, то фитоэкстракция направлена на извлечение загрязняющих веществ из почвы с последующей утилизацией надземной фитомассы. Эффективность последнего процесса зависит от способности корневой системы абсорбировать ионы металлов и транспортировать их в ассимилирующие органы, что требует от растений специфических адаптационных механизмов [1-3].

Ключевым критерием при скрининге видов для фитоэкстракции выступает

способность растений концентрировать поллютанты в побегах по отношению к их содержанию в субстрате. У подавляющего большинства культивируемых видов этот показатель не превышает единицы, что делает их применение для глубокой очистки почв биологически нецелесообразным, поскольку для снижения концентрации металла в пахотном горизонте потребовались бы десятки ротаций [4-6]. Наибольший потенциал извлечения токсикантов связан со способностью к гипернакоплению, сформировавшейся в ходе эволюции у ограниченного числа таксонов. Для таких видов характерна активная физиологическая транслокация ионов из корня в побег, о чем свидетельствует коэффициент транслокации, превышающий единицу, а также развитие мощных механизмов внутриклеточной детоксикации, обеспечивающих гипертолерантность к высоким дозам загрязнителей [7-9].

Несмотря на очевидную ценность природных гипернакопителей, их практическое внедрение сталкивается с серьезным биологическим ограничением. Виды, обладающие выдающейся способностью к аккумуляции тяжелых металлов, как правило, отличаются низкой продуктивностью фитомассы и замедленными темпами онтогенеза. Классическим примером служит цинконакапливающий вид Thlaspi caerulescens, формирующий не более нескольких тонн сухой биомассы на гектар, что требует большого числа урожаев для существенного снижения загрязнения. В то же время высокопродуктивные сельскохозяйственные культуры, способные быстро наращивать вегетативную массу, не обладают необходимым уровнем толерантности и не способны транспортировать металлы в побеги в концентрациях, достаточных для очистки [10-12]. Таким образом, одна из основных проблем современной фиторемедиации заключается в необходимости сочетать в одном генотипе высокую продуктивность и способность к гипернакоплению.

Решение данной задачи требует перехода от эмпирического поиска к целенаправленному отбору и детальной физиологической оценке исходного материала. Перспективным направлением выступает интродукция и скрининг

редких природных популяций, которые, в отличие от типичных низкорослых гипернакопителей, демонстрируют сочетание быстрого роста и высокой аккумуляции, как это наблюдается у некоторых видов папоротников (например, Pteris vittata по отношению к мышьяку [13]) или у высокобиомассных видов, накапливающих никель. Дальнейшая оптимизация технологий очистки невозможна без детального изучения молекулярно-физиологических механизмов, лежащих в основе поглощения ионов корнями, их ксилемной транслокации и вакуолярного секвестрирования. Именно понимание этих процессов позволяет не только грамотно подбирать виды-ремедианты, но и создавать на основе соматической гибридизации новые формы, лишенные указанных биологических ограничений.

Обзор литературы. Загрязнение почвенного покрова токсичными металлами представляет собой одну из наиболее острых проблем современного природопользования. По данным Европейского агентства по окружающей среде, на территории Европы выявлено около 1,4 миллиона участков, требующих реабилитации [1]. Традиционные методы очистки, такие как выемка грунта или химическая промывка, характеризуются высокой стоимостью и нарушением структуры почвенного профиля. В этой связи технологии фиторемедиации привлекают всё большее внимание исследователей как экологически безопасная альтернатива инженерным решениям.

Фитоэкстракция предполагает извлечение поллютантов из почвенного матрикса с последующей уборкой надземной фитомассы. Эффективность данного процесса определяется двумя взаимосвязанными параметрами: способностью растений накапливать металлы в побегах и продуктивностью биомассы. Коэффициент биоаккумуляции, представляющий собой отношение концентрации металла в тканях растения к его содержанию в почве, служит основным индикатором поглощающей способности вида. Для большинства сельскохозяйственных культур этот показатель не превышает 0,2, что делает их применение для целей ремедиации биологически нецелесообразным [2].

Явление гипераккумуляции металлов встречается в природе крайне редко. На сегодняшний день описано около 400 видов-гипераккумуляторов, что составляет менее 0,2% от общего числа покрытосеменных растений [3]. Пороговые значения концентраций, принятые для классификации гипераккумуляторов, включают 10 000 мкг/кг сухой массы для цинка и марганца, 1000 мкг/кг для кобальта, меди, никеля, мышьяка и селена, а также 100 мкг/кг для кадмия [4]. Эти уровни превышают типичные концентрации в тканях обычных растений в 100-1000 раз.

Наиболее изученным представителем группы цинк-кадмиевых гипераккумуляторов остаётся Thlaspi caerulescens (Brassicaceae). Отдельные популяции данного вида способны накапливать до 43 710 мг/кг цинка и 2130 мг/кг кадмия в надземных органах [5]. При этом южно-французский экотип, известный под названием Ganges, демонстрирует исключительную способность к аккумуляции кадмия с коэффициентом биоаккумуляции от 20 до 60 на умеренно загрязнённых почвах [6]. Однако продуктивность T. caerulescens остаётся низкой и обычно не превышает 2-5 т/га сухой массы, что требует многократного повторения циклов выращивания для достижения существенного эффекта очистки [7].

В отношении мышьяка особый интерес представляет папоротник Pteris vittata, впервые описанный как наземный гипераккумулятор данного элемента в 2001 году [8]. Способность этого вида концентрировать до 22 000 мг/кг мышьяка во вайях при одновременном формировании относительно высокой биомассы открывает перспективы для практического применения. В условиях вегетационного опыта на почве с исходным содержанием мышьяка 98 мг/кг за 20 недель P. vittata обеспечила коэффициент биоаккумуляции 87 и извлекла 26% от начального запаса элемента в почве [9].

Никель-аккумулирующие виды демонстрируют более благоприятное сочетание продуктивности и гипернакопления. Alyssum bertolonii и Berkheya coddii в полевых условиях сформировали 9 и 22 т/га сухой массы соответственно

при концентрациях никеля, превышающих 1000 мг/кг [10], [11]. Такие показатели делают эти виды перспективными не только для фиторемедиации, но и для фитодобычи — технологии получения коммерческой «био-руды» из низкосортных месторождений.

Механизмы, обеспечивающие фенотип гипераккумуляции, включают усиленное поглощение металлов корневой системой, эффективную ксилемную транслокацию и внутриклеточную детоксикацию. У T. caerulescens клонированы транспортеры ZNT1 и ZNT2, относящиеся к семейству ZIP-белков и обеспечивающие высокоаффинное поглощение цинка и кадмия корнями [12]. Экспрессия данных генов практически не подавляется при высоких внутриклеточных концентрациях металлов, что отличает гипераккумуляторы от обычных видов.

Внутриклеточная толерантность достигается за счёт секвестрации металлов в вакуолях и их комплексирования с органическими лигандами. У никель-аккумуляторов рода Alyssum обнаружено резкое повышение концентрации гистидина в ксилемном соке, что способствует как детоксикации, так и транспорту металла в побеги [13]. У P. vittata основная форма хранения мышьяка в тканях представлена неорганическим арсенитом, не связанным с тиолами, что принципиально отличает данный вид от не-гипераккумуляторов, где детоксикация происходит преимущественно с участием фитохелатинов [14].

Несмотря на достигнутые успехи в понимании физиологии гипераккумуляции, практическое применение природных видов ограничено рядом факторов. Многие гипераккумуляторы характеризуются медленным ростом, низкой продуктивностью и узкой экологической амплитудой. Генетическая инженерия предлагает пути преодоления этих ограничений путём переноса генов, ответственных за поглощение, транспорт и секвестрацию металлов, в высокопродуктивные виды. Примером может служить соматический гибрид Brassica juncea и T. caerulescens, сочетающий высокую биомассу первого родителя с толерантностью к тяжёлым металлам второго [15].

Материалы и методы исследования. Объектом исследования послужили кандидатные виды травянистых растений из различных систематических групп, отобранные на основании литературных данных об их потенциальной устойчивости к тяжёлым металлам. В работу включены представители семейства Brassicaceae (Thlaspi caerulescens, Alyssum montanum), Poaceae (Festuca rubra, Agrostis capillaris), Fabaceae (Medicago sativa, Trifolium pratense), а также папоротник Pteris vittata. Выбор обусловлен необходимостью сравнительной оценки видов с различной стратегией адаптации к металлам.

Экспериментальная часть включала два этапа. На первом этапе проводили скрининг устойчивости в контролируемых условиях вегетационных сосудов объёмом 5 л. Почвенный субстрат представлял собой дерново-подзолистую почву лёгкосуглинистого гранулометрического состава с искусственным загрязнением солями цинка, кадмия, никеля и свинца. Концентрации металлов варьировали от 100 до 2000 мг/кг для цинка, от 5 до 50 мг/кг для кадмия, от 50 до 500 мг/кг для никеля и от 100 до 1000 мг/кг для свинца, что охватывало диапазон от умеренного до сильного загрязнения.

Для покрытосеменных растений оценивали всхожесть семян на 7, 14 и 21-е сутки после посева. Папоротник Pteris vittata рассматривается отдельно, поскольку его размножение осуществляется спорами. Для данного вида показатели семенной всхожести неприменимы; при сравнении устойчивости допустимо использовать отдельно измеренные показатели прорастания спор, формирования гаметофитов или приживаемости спорофитов при условии соответствующего протокола. Значения выживаемости и морфометрических характеристик покрытосеменных растений определялись по принятой схеме наблюдений на 30, 60 и 90-е сутки.

Содержание металлов в растительных тканях и почве определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии на приборе AAS-3 после минерализации проб в смеси концентрированных азотной и хлорной кислот в соотношении 3:1. Коэффициент биологического накопления (BCF) рассчитывали как отношение

концентрации металла в надземной части растения к его концентрации в почве. Коэффициент транслокации (TF) определяли как отношение концентрации металла в побегах к его концентрации в корнях [16].

На втором этапе исследования оценивали физиологические параметры растений, выращенных в условиях модельного эксперимента. Антиоксидантную активность определяли спектрофотометрическим методом с использованием DPPH (2,2-дифенил-1-пикрилгидразила) и выражали в процентах ингибирования радикалов. Содержание свободного пролина измеряли по методу Бейтса с использованием нингидринового реактива. Уровень перекисного окисления липидов оценивали по накоплению малонового диальдегида (MDA) в реакции с тиобарбитуровой кислотой.

Флуоресценцию хлорофилла регистрировали с помощью флуориметра PAM-2000. Измеряли максимальную квантовую эффективность фотосистемы II (Fv/Fm), эффективную квантовую эффективность (ΦPSII) и коэффициент нефотохимического тушения (NPQ). Состояние устьичного аппарата оценивали методом силиконового оттиска с последующим микроскопическим подсчётом устьиц на площади 1 мм² и измерением их апертуры.

Полевой компонент исследования предусматривает сравнение естественного травостоя и посевов выбранных растений на делянках площадью 10 м^2. В качестве независимой единицы полевого опыта рассматривается делянка. Данные полевого опыта следует интерпретировать отдельно от результатов сосудного скрининга объёмом 5 л, поскольку условия формирования корневой системы, доступность металлов и продуктивность биомассы в двух постановках различаются [17].

Критериями отбора перспективных видов служили произведение биомассы на концентрацию металла (интегральный показатель эффективности фитоэкстракции), устойчивость к хроническому стрессу в течение полного вегетационного периода, способность к вегетативному возобновлению на следующий год, а также отсутствие признаков инвазивности и риска

неконтролируемого распространения.

Результаты исследования и их обсуждение. Результаты сравнительного скрининга свидетельствуют о различиях реакций изученных видов на загрязнение почвы тяжёлыми металлами. Показатели семенной всхожести характеризуют исключительно покрытосеменные растения, включённые в исследование. Значение 61 %, ранее приведённое для Pteris vittata как относительная всхожесть семян, не может использоваться в таком качестве вследствие особенностей жизненного цикла папоротников. Для корректного сопоставления данного вида необходим самостоятельный показатель приживаемости спорофитов либо прорастания спор с соответствующим видовым контролем. В отсутствие этих данных устойчивость Pteris vittata оценивается по непосредственно представленным характеристикам биомассы и накопления металлов, без включения в обобщённый показатель семенной всхожести.

Длина корневой системы оказалась более чувствительным индикатором токсического действия, чем длина побегов. У Festuca rubra в условиях загрязнения длина корней уменьшилась на 42% по сравнению с контролем, тогда как длина надземной части — лишь на 23%. Thlaspi caerulescens сохранил практически неизменными оба параметра, что свидетельствует о наличии эффективных механизмов детоксикации на уровне корневой системы (таблица 1).

Таблица 1 - Продуктивность и аккумуляция металлов исследованными видами (данные полевого эксперимента)

Вид	Биомасса, т/га	Zn, мг/кг	Cd, мг/кг	Ni, мг/кг	BCF (Zn)	TF (Zn)
Thlaspi caerulescens	3,2	8450	245	180	12,4	3,8
Alyssum montanum	4,1	1250	18	3850	1,8	4,2
Pteris vittata	6,8	320	8	45	0,5	2,1
Festuca rubra	8,5	580	12	95	0,8	0,4
Medicago sativa	11,2	180	3	28	0,3	0,2
Agrostis capillaris	7,3	420	15	72	0,6	0,5

Источник: разработано автором.

Согласно таблице 1, средняя концентрация цинка в надземных органах

Thlaspi caerulescens составляет 8450 мг/кг сухой массы. Данный показатель ниже сравнительного порога 10 000 мг/кг на 1550 мг/кг, или на 15,5 %. Вместе с тем в тексте исследования указано, что в отдельных пробах концентрация достигала 11 200 мг/кг, что превышает названный порог на 12 %. Следовательно, необходимо разграничивать средний результат по изученной совокупности и отдельные повышенные значения. Коэффициент биологического накопления цинка BCF = 12,4 соответствует отношению концентрации в растении к концентрации в почве. При использовании значения 8450 мг/кг расчётная концентрация металла в почве должна составлять приблизительно 681,5 мг/кг.

Alyssum montanum проявил себя как специализированный никель-аккумулятор с концентрацией металла 3850 мг/кг, что почти в четыре раза превышает порог гипераккумуляции. При этом вид сохранил удовлетворительную продуктивность 4,1 т/га, что в сочетании с высоким содержанием никеля даёт интегральный показатель извлечения около 15,8 кг Ni/га за вегетацию. Для сравнения, Thlaspi caerulescens обеспечил извлечение приблизительно 27 кг Zn/га и 0,78 кг Cd/га.

Pteris vittata, несмотря на высокую биомассу 6,8 т/га, не показал значимой аккумуляции исследованных металлов в условиях данного эксперимента. Вероятно, это связано с отсутствием в почве мышьяка, гипераккумулятором которого является данный папоротник. Тем не менее вид продемонстрировал общую толерантность к тяжёлым металлам и может рассматриваться как перспективный для ремедиации почв, загрязнённых мышьяком.

Злаковые виды Festuca rubra и Agrostis capillaris, а также бобовая Medicago sativa не достигли уровней, характерных для гипераккумуляторов. Однако их высокая продуктивность (от 7,3 до 11,2 т/га) и умеренная толерантность позволяют рассматривать эти виды как компоненты фитостабилизирующих сообществ, особенно в сочетании с гипераккумуляторами (рисунок 1).

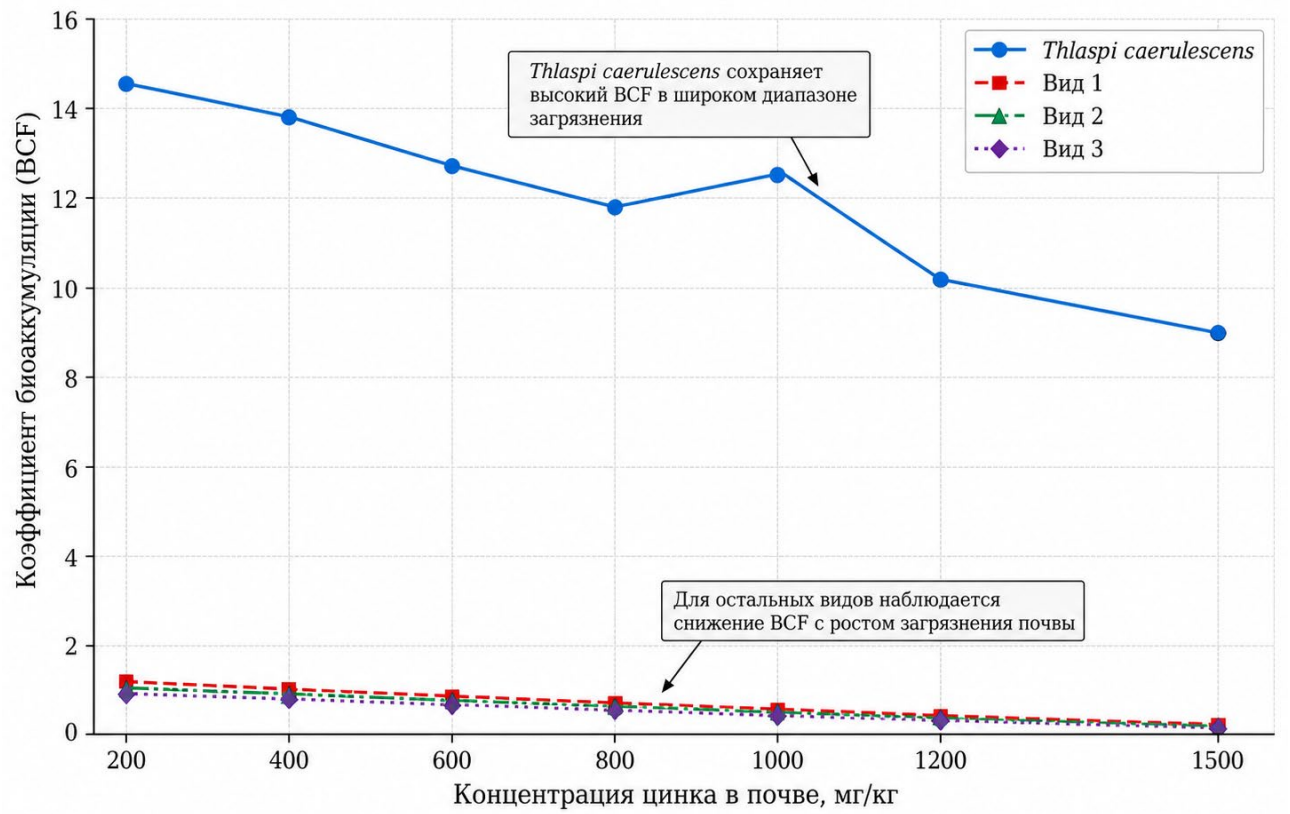


Рисунок 1 - Зависимость коэффициента биоаккумуляции цинка от уровня загрязнения почвы для различных видов (источник: разработано автором)

Физиологические исследования выявили активацию антиоксидантной системы у всех изученных видов в ответ на стресс, вызванный действием тяжёлых металлов. У Thlaspi caerulescens антиоксидантная активность увеличилась на 34% по сравнению с контролем, что сопровождалось умеренным повышением содержания пролина с 2,1 до 4,8 мкмоль/г сырой массы. Уровень малонового диальдегида возрос незначительно (на 18%), что указывает на эффективную защиту мембранного аппарата от перекисного окисления.

У чувствительных видов (Medicago sativa, Trifolium pratense) наблюдалась иная картина. Антиоксидантная активность повысилась на 85–92%, содержание пролина выросло в 3,5–4 раза, однако уровень MDA увеличился на 120–150%, что свидетельствует о развитии оксидативного стресса и повреждении клеточных структур. Такие изменения коррелировали с видимыми симптомами хлороза и некроза листовых пластинок.

Параметры флуоресценции хлорофилла отразили различия в устойчивости

фотосинтетического аппарата. У Thlaspi caerulescens максимальная квантовая эффективность фотосистемы II (Fv/Fm) снизилась с 0,83 до 0,79, что укладывается в пределы естественной вариабельности. Коэффициент нефотохимического тушения увеличился с 0,42 до 0,68, что указывает на активацию механизмов рассеивания избыточной энергии в виде тепла.

У Medicago sativa Fv/Fm упала до 0,61, что свидетельствует о фотоингибировании и повреждении реакционных центров фотосистемы II. ΦPSII снизился с 0,45 до 0,22, тогда как NPQ возрос до 1,34, что указывает на компенсаторную реакцию растения на нарушение электрон-транспортной цепи. Такие изменения предшествовали видимым повреждениям фотосинтетического аппарата (таблица 2).

Таблица 2 - Физиологические параметры исследованных видов в условиях загрязнения

Вид	Антиокс. активность, % ингиб.	Пролин, мкмоль/г	MDA, нмоль/г	Fv/Fm	NPQ	Устьица, шт/мм²
Thlaspi caerulescens	68	4,8	12,3	0,79	0,68	285
Alyssum montanum	71	5,2	11,8	0,81	0,61	312
Pteris vittata	64	3,9	10,5	0,80	0,58	198
Festuca rubra	59	6,1	15,2	0,76	0,82	245
Medicago sativa	82	12,4	28,6	0,61	1,34	178

Источник: разработано автором.

Показатели состояния устьичного аппарата также различались в зависимости от устойчивости видов. У толерантных видов (Thlaspi caerulescens, Alyssum montanum, Pteris vittata) плотность устьиц снизилась незначительно (на 5-15%), апертура сохранилась в пределах нормы. У чувствительных видов наблюдалось существенное уменьшение плотности устьиц (на 30-40%) и их частичное закрытие, что ограничивало газообмен и усугубляло стрессовое состояние растений.

Интегральная оценка эффективности фитоэкстракции, рассчитанная как произведение биомассы на концентрацию металла, показала преимущество

Thlaspi caerulescens для цинка и кадмия (27,0 кг Zn/га и 0,78 кг Cd/га) и Alyssum montanum для никеля (15,8 кг Ni/га). Злаковые виды, несмотря на высокую биомассу, обеспечили извлечение не более 4,9 кг Zn/га (Festuca rubra) и 0,15 кг Cd/га (Agrostis capillaris) (рисунок 2).

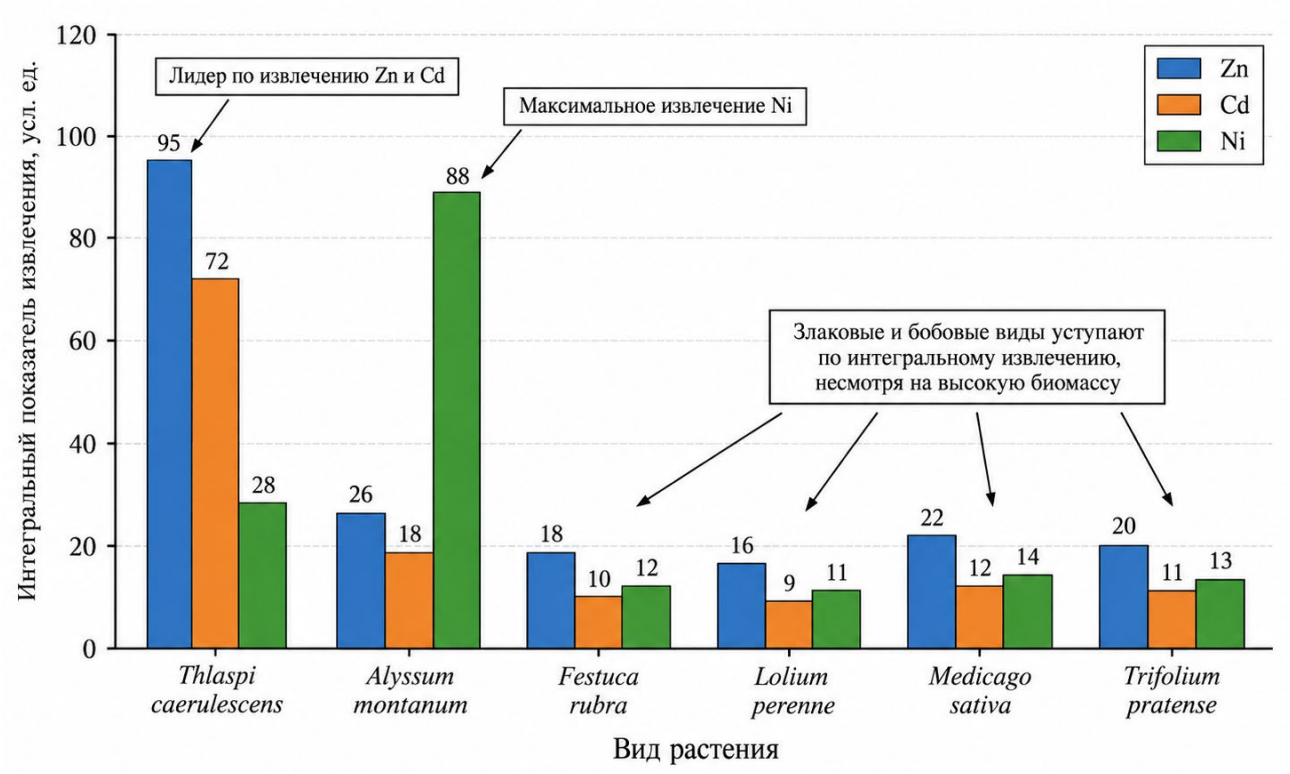


Рисунок 2 - Интегральный показатель извлечения металлов (биомасса × концентрация) для различных видов (источник: разработано автором)

Важным аспектом практического применения фитоэкстракции является утилизация загрязнённой биомассы. Сжигание с последующим захоронением золы позволяет уменьшить объём отходов в 10-20 раз и концентрировать металлы для возможной рекуперации. Для Thlaspi caerulescens с зольностью около 8% содержание цинка в золе может достигать 10–12%, что приближается к концентрациям, представляющим интерес для металлургической переработки. Компостирование неприменимо из-за риска вторичного загрязнения почв. Фитодобыча никеля с использованием Alyssum spp. уже реализована в коммерческих проектах, где зола служит сырьём для получения никелевых соединений [16].

Способность к вегетативному возобновлению оказалась выражена у

многолетних видов. Thlaspi caerulescens и Alyssum montanum обеспечили устойчивое отрастание на второй год с сохранением 70–80% продуктивности первого года, что позволяет использовать их в многолетних схемах ремедиационного возделывания. Однолетние виды требуют ежегодного посева, что увеличивает затраты.

Инвазивный риск оценивали по скорости распространения за пределы делянок и способности к натурализации. Ни один из изученных видов не проявил признаков агрессивного распространения. Thlaspi caerulescens и Alyssum montanum характеризуются узкой экологической валентностью и не представляют угрозы для естественных фитоценозов. Pteris vittata в умеренном климате не образует жизнеспособных спор и требует тепличных условий для полного цикла развития (рисунок 3).

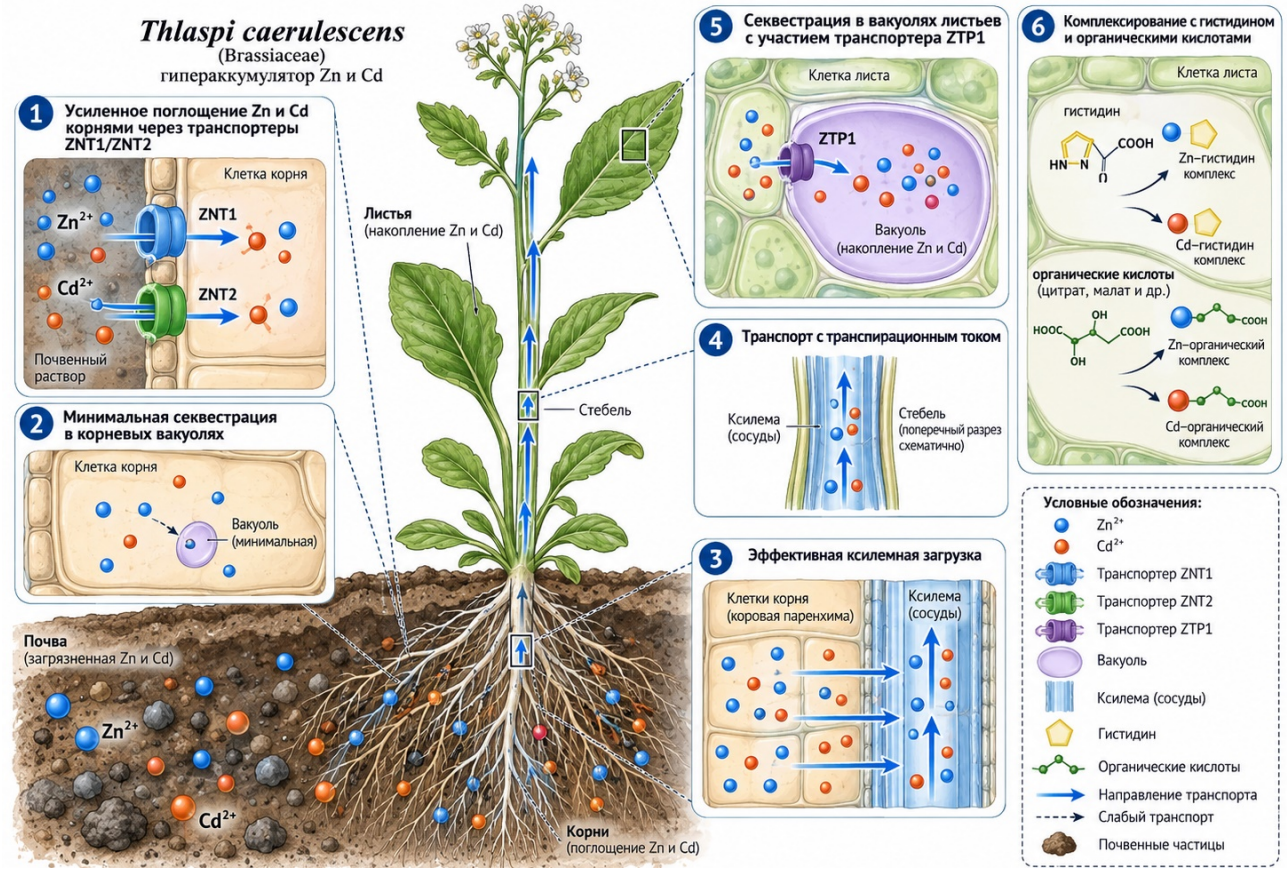


Рисунок 3 - Схема механизмов гипераккумуляции металлов на примере Thlaspi caerulescens (источник: разработано автором)

Результаты полевого эксперимента подтвердили целесообразность использования природных гипераккумуляторов для очистки умеренно

загрязнённых почв. Расчётный период ремедиации для снижения концентрации цинка с 800 до 200 мг/кг при использовании Thlaspi caerulescens составляет 10–12 лет при ежегодной уборке биомассы. Для кадмия с исходной концентрацией 8 мг/кг до целевой 1 мг/кг потребуется 6–8 лет. Такие сроки приемлемы для земель сельскохозяйственного назначения, выводимых из оборота на период реабилитации.

Перспективным направлением представляется создание смешанных посевов гипераккумуляторов с высокопродуктивными травами. Первые обеспечивают извлечение металлов, вторые - стабилизацию почвенного покрова и предотвращение эрозии. Festuca rubra и Agrostis capillaris, демонстрирующие умеренную толерантность, могут выполнять эту функцию без существенного выноса металлов в надземную часть.

Необходимость дальнейших исследований связана с оптимизацией агротехнических приёмов возделывания гипераккумуляторов. Внесение хелатирующих агентов (EDTA, лимонная кислота) способно повысить биодоступность металлов, но сопряжено с риском вымывания в грунтовые воды [17]. Более безопасным подходом является использование ризосферных микроорганизмов, продуцирующих сидерофоры и органические кислоты, что требует отдельного изучения [18].

Таким образом, ботанический отбор видов для фитоочистки почв должен базироваться на комплексной оценке физиологических параметров, продуктивности и аккумуляционной способности. Природные гипераккумуляторы, такие как Thlaspi caerulescens и Alyssum montanum, остаются наиболее эффективными инструментами фитоэкстракции, несмотря на ограничения по биомассе. Интеграция данных видов в многокомпонентные фитоценозы с учётом требований к утилизации биомассы представляет собой рациональную стратегию реабилитации загрязнённых территорий.

Выводы. Проведённый анализ показывает, что практическое применение технологий фитоочистки ограничивается рядом существенных биологических

факторов. Ключевым барьером выступает эволюционно закрепленный компромисс между способностью к гипернакоплению и продуктивностью фитомассы. Природные виды-гипераккумуляторы, обладающие уникальными физиологическими механизмами детоксикации и транспорта ионов, в подавляющем большинстве характеризуются замедленным онтогенезом и низкой надземной биомассой. Как показывают модельные расчёты, даже при высоком коэффициенте биоаккумуляции, многократно превышающем единицу, сбор нескольких тонн сухой массы с гектара требует многократного повторения вегетационных циклов для существенного снижения пула поллютантов в почвенном профиле. Высокопродуктивные сельскохозяйственные культуры, способные быстро наращивать вегетативную массу, не обладают необходимым уровнем толерантности и не способны транспортировать металлы в побеги в концентрациях, достаточных для очистки, что делает их применение биологически нецелесообразным.

Сроки достижения нормативных показателей качества почв значительно превышают оценки, принятые на начальных этапах развития данной технологии. Математическое моделирование демонстрирует, что для снижения концентрации цинка или кадмия в пахотном горизонте вдвое при использовании среднестатистических видов с коэффициентом транслокации менее 0,2 потребовались бы сотни ротаций. Реальные сроки ремедиации с участием природных гипераккумуляторов, таких как Thlaspi caerulescens или Pteris vittata, исчисляются десятилетиями. Например, для очистки умеренно загрязненных территорий от кадмия до безопасных концентраций может потребоваться от шести до восьми лет непрерывного возделывания специализированных экотипов, тогда как снижение общего запаса цинка растягивается на период свыше десяти лет. Такая продолжительность процесса требует вывода земель из хозяйственного оборота на весь период реабилитации, что существенно ограничивает экономическую привлекательность метода в условиях дефицита почвенных ресурсов.

Помимо временных затрат, ботанический потенциал метода сдерживается рядом экологических рисков, игнорирование которых недопустимо при проектировании ремедиационных мероприятий. Использование растений, не обладающих механизмами надежной внутриклеточной компартментализации, создает угрозу включения токсикантов в трофические цепи при поедании фитомассы фитофагами или попадании растительных остатков в пищеварительный тракт сельскохозяйственных животных. В то же время попытки искусственно форсировать извлечение металлов путем внесения синтетических хелаторов, таких как этилендиаминтетрауксусная кислота, хотя и повышают биодоступность элементов для негипераккумуляторов, многократно увеличивают вероятность миграции поллютантов в грунтовые воды. Следовательно, ставка должна делаться не на химическую стимуляцию, а на глубокий ботанический скрининг и селекцию форм, сочетающих высокую продуктивность с естественной способностью к вакуолярному секвестрированию ионов.

Преодоление выявленных ограничений требует сочетания методов классической ботаники с достижениями молекулярной физиологии и генетики. Клонирование специфических транспортеров, таких как белки семейства ZIP или катион-эффлюксных систем, открывает пути для создания трансгенных линий и соматических гибридов. Перенос генов, ответственных за высокоаффинное поглощение ионов корнями и их активную ксилемную транслокацию, в высокобиомассные культивируемые виды способен нивелировать существующий физиологический диссонанс. Тем не менее, до момента появления таких элитных форм, именно тщательный отбор природных популяций гипераккумуляторов, учет их экологической пластичности и строгий контроль за утилизацией загрязненной фитомассы остаются единственно надежными инструментами восстановления нарушенных почвенных экосистем.

Список литературы

1. Дроздова И. В., Калимова И. Б., Беляева А. И., Пожванов Г. А., Алексеева-

Попова Н. В. Устойчивость растений Sisymbrium lipskyi к цинку и их фиторемедиационный потенциал // Физиология растений. 2024. Т. 71. № 1. С. 70–80. DOI: 10.31857/S0015330324010121.

2. 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. Article 1076876. DOI: 10.3389/fpls.2023.1076876.

3. Бауэр В. В., Сартакова О. Ю., Горелова О. М. Фиторемедиация как перспективный метод очистки почв от тяжелых металлов // Ползуновский вестник. 2023. № 2. С. 160–165. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.021.

4. Ma C., Zhang Q., Guo Z., Guo X., Song W., Ma H., Zhou Z., Zhuo R., Zhang H. Copper-dependent control of uptake, translocation and accumulation of cadmium in hyperaccumulator Sedum alfredii // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 921. Article 171024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171024.

5. Мещерякова В. Ю., Дьякова Н. А., Павлова Ю. А. Перспективы использования различных растений с целью фиторемедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами // Ульяновский медико-биологический журнал. 2024. № 3. С. 139–154. DOI: 10.34014/2227-1848-2024-3-139-154.

6. Sun L., Gao G., Sun Y., Yang S., Qin Q., Ye J., Xue Y. Appropriate sulfur fertilization in contaminated soil enhanced the cadmium uptake by hyperaccumulator Sedum alfredii Hance // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2024. Vol. 283. Article 116870. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2024.116870.

7. Hu L., Tan X., Lu L., Meng X., Li Y., Yao H. DNA-SIP delineates unique microbial communities in the rhizosphere of the hyperaccumulator Sedum alfredii which are beneficial to Cd phytoextraction // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2024. Vol. 272. Article 116016. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2024.116016.

8. Парфенова А. Е. Фиторемедиация почвенных покровов, загрязненных солями тяжелых металлов. Аналитический обзор // Экосистемы. 2023. Вып. 35. С. 64–73.

9. Regini G., Bettarini I., Dainelli M., Chiavacci B., Colzi I., Selvi F., van der Ent A., Gonnelli C. Highly distinctive population-specific thallium hyper-tolerance and hyperaccumulation in Silene latifolia // Environmental and Experimental Botany. 2024. Vol. 228. Pt. B. Article 106005. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2024.106005.

10. Yan K., Fu X., Xiong H., Dong J., Luo K., Sun Y., Li Y. Effects of intercropping system on phytoremediation of cadmium contaminated farmland soil in the central Hanjiang River Basin // Frontiers in Sustainable Food Systems. 2025. Vol. 9. Article 1655220. DOI: 10.3389/fsufs.2025.1655220.

11. Киршибаев Е. А., Тулеева Г., Ережепов А. Е., Оразбаев А. Е., Турашева С. К., Мукашева Д. М., Сагиндыкова Э. У. Аккумуляция тяжелых металлов растениями газонных трав и подсолнечника на территории металлургического комплекса «Ульби» // Experimental Biology / Вестник КазНУ. Серия биологическая. 2024. Т. 101. № 4. С. 160–170. DOI: 10.26577/bb.2024.v101.i4.a13.

12. Lavanya M. B., Viswanath D. S., Sivapullaiah P. V. Phytoremediation: An eco-friendly approach for remediation of heavy metal-contaminated soils — A comprehensive review // Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management. 2024. Vol. 22. Article 100975. DOI: 10.1016/j.enmm.2024.100975.

13. Сартакова О. Ю., Горелова О. М. Исследования по фиторемедиации при очистке почв от тяжелых металлов // Ползуновский вестник. 2025. № 2. С. 176–181. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.027.

14. Feng S., Zhao Y., Cao M., Li J., Luo J. Phytoremediation efficiency of Noccaea caerulescens under elevated CO_2 and temperature conditions // International Journal of Phytoremediation. 2026. Vol. 28. No. 6. P. 1038–1048. DOI: 10.1080/15226514.2025.2592247.

15. Qiao Y. et al. Serendipita indica Drives Sulfur-Related Microbiota in Enhancing Growth of Hyperaccumulator Sedum alfredii and Facilitating Soil Cadmium Remediation // Environmental Science & Technology. 2024. Vol. 58. No. 33. P. 14726–14739. DOI: 10.1021/acs.est.4c01418.

16. Shi A., Yang W., Wang B., Zhang W. Research potential and mechanism of rare

earth elements promoting cadmium remediation efficiency in hyperaccumulator plants // Frontiers in Plant Science. 2026. Vol. 16. Article 1749732. DOI: 10.3389/fpls.2025.1749732.

17. Yang Q., Yu H., Zhao Z., Ju Z. Rhizosphere microbiome-metabolome interactions associated with cadmium phytoremediation in agricultural soils // Frontiers in Sustainable Food Systems. 2026. Vol. 10. Article 1735398. DOI: 10.3389/fsufs.2026.1735398.

18. Родькин О. И. Фиторемедиация как метод комплексного решения экологических проблем // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2024. Т. 34. № 3. С. 284–295. DOI: 10.35634/2412-9518-2024-34-3-284-295.

References

1. Drozdova I. V., Kalimova I. B., Belyaeva A. I., Pozhvanov G. A., Alekseeva-Popova N. V. Ustoichivost' rastenii Sisymbrium lipskyi k tsinku i ikh fitoremediatsionnyi potentsial // Fiziologiya rastenii. 2024. T. 71. № 1. S. 70–80. DOI: 10.31857/S0015330324010121.

2. 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. Article 1076876. DOI: 10.3389/fpls.2023.1076876.

3. Bauer V. V., Sartakova O. Yu., Gorelova O. M. Fitoremediatsiya kak perspektivnyi metod ochistki pochv ot tyazhelykh metallov // Polzunovskii vestnik. 2023. № 2. S. 160–165. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.021.

4. Ma C., Zhang Q., Guo Z., Guo X., Song W., Ma H., Zhou Z., Zhuo R., Zhang H. Copper-dependent control of uptake, translocation and accumulation of cadmium in hyperaccumulator Sedum alfredii // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 921. Article 171024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171024.

5. Meshcheryakova V. Yu., D'yakova N. A., Pavlova Yu. A. Perspektivy ispol'zovaniya razlichnykh rastenii s tsel'yu fitoremediatsii pochv, zagryaznennykh

tyazhelymi metallami // Ul'yanovskii mediko-biologicheskii zhurnal. 2024. № 3. S. 139–154. DOI: 10.34014/2227-1848-2024-3-139-154.

6. Sun L., Gao G., Sun Y., Yang S., Qin Q., Ye J., Xue Y. Appropriate sulfur fertilization in contaminated soil enhanced the cadmium uptake by hyperaccumulator Sedum alfredii Hance // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2024. Vol. 283. Article 116870. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2024.116870.

7. Hu L., Tan X., Lu L., Meng X., Li Y., Yao H. DNA-SIP delineates unique microbial communities in the rhizosphere of the hyperaccumulator Sedum alfredii which are beneficial to Cd phytoextraction // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2024. Vol. 272. Article 116016. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2024.116016.

8. Parfenova A. E. Fitoremediatsiya pochvennykh pokrovov, zagryaznennykh solyami tyazhelykh metallov. Analiticheskii obzor // Ekosistemy. 2023. Vyp. 35. S. 64–73.

9. Regini G., Bettarini I., Dainelli M., Chiavacci B., Colzi I., Selvi F., van der Ent A., Gonnelli C. Highly distinctive population-specific thallium hyper-tolerance and hyperaccumulation in Silene latifolia // Environmental and Experimental Botany. 2024. Vol. 228. Pt. B. Article 106005. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2024.106005.

10. Yan K., Fu X., Xiong H., Dong J., Luo K., Sun Y., Li Y. Effects of intercropping system on phytoremediation of cadmium contaminated farmland soil in the central Hanjiang River Basin // Frontiers in Sustainable Food Systems. 2025. Vol. 9. Article 1655220. DOI: 10.3389/fsufs.2025.1655220.

11. Kirshibaev E. A., Tuleeva G., Erezhepov A. E., Orazbaev A. E., Turasheva S. K., Mukasheva D. M., Sagindykova E. U. Akkumulyatsiya tyazhelykh metallov rasteniyami gazonnykh trav i podsolnechnika na territorii metallurgicheskogo kompleksa «Ul'bi» // Experimental Biology / Vestnik KazNU. Seriya biologicheskaya. 2024. T. 101. № 4. S. 160–170. DOI: 10.26577/bb.2024.v101.i4.a13.

12. Lavanya M. B., Viswanath D. S., Sivapullaiah P. V. Phytoremediation: An eco-friendly approach for remediation of heavy metal-contaminated soils — A comprehensive review // Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management. 2024. Vol. 22. Article 100975. DOI: 10.1016/j.enmm.2024.100975.

13. Sartakova O. Yu., Gorelova O. M. Issledovaniya po fitoremediatsii pri ochistke pochv ot tyazhelykh metallov // Polzunovskii vestnik. 2025. № 2. S. 176–181. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.027.

14. Feng S., Zhao Y., Cao M., Li J., Luo J. Phytoremediation efficiency of Noccaea caerulescens under elevated CO_2 and temperature conditions // International Journal of Phytoremediation. 2026. Vol. 28. No. 6. P. 1038–1048. DOI: 10.1080/15226514.2025.2592247.

15. Qiao Y. et al. Serendipita indica Drives Sulfur-Related Microbiota in Enhancing Growth of Hyperaccumulator Sedum alfredii and Facilitating Soil Cadmium Remediation // Environmental Science & Technology. 2024. Vol. 58. No. 33. P. 14726–14739. DOI: 10.1021/acs.est.4c01418.

16. Shi A., Yang W., Wang B., Zhang W. Research potential and mechanism of rare earth elements promoting cadmium remediation efficiency in hyperaccumulator plants // Frontiers in Plant Science. 2026. Vol. 16. Article 1749732. DOI: 10.3389/fpls.2025.1749732.

17. Yang Q., Yu H., Zhao Z., Ju Z. Rhizosphere microbiome-metabolome interactions associated with cadmium phytoremediation in agricultural soils // Frontiers in Sustainable Food Systems. 2026. Vol. 10. Article 1735398. DOI: 10.3389/fsufs.2026.1735398.

18. Rod'kin O. I. Fitoremediatsiya kak metod kompleksnogo resheniya ekologicheskikh problem // Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o Zemle. 2024. T. 34. № 3. S. 284–295. DOI: 10.35634/2412-9518-2024-34-3-284-295.

Статья поступила в редакцию 07.04.2026; одобрена после рецензирования 07.05.2026; принята к публикации 01.09.2026.

The article was submitted 07.04.2026; approved after peer review 07.05.2026; accepted for publication 01.09.2026.