Modern American Journal of Biological and Environmental Sciences
ISSN (E): 3067-7920
Volume 2, Issue 4, April 2026
Website: usajournals.org
This work is Licensed under CC BY 4.0 a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

HEAVY METAL HYPERACCUMULATOR PLANTS AND THEIR ENDOPHYTIC FUNGI IN UZBEKISTAN: CURRENT KNOWLEDGE, PRELIMINARY DATA, AND PROSPECTS FOR PHYTOREMEDIATION

Egamberdieva Z. O.
Ural Federal University named after the First President of Russia
B. N. Yeltsin Yekaterinburg, Russia
E-mail: zarinaegamberdieva07@gmail.com

Abstract
Current knowledge on heavy-metal hyperaccumulator plants and their endophytic fungi is summarised, and the potential of fungal partners for phytoremediation of soils in Uzbekistan is substantiated. Preliminary data from the Tashkent and Jizzakh regions show extremely high Pb, Cr, Ni and Cd contents in soils of ultramafic areas; Artemisia tenuisecta (BCF for Cd = 5.75) and Phlomis nubilans (BCF = 1.54) are proposed as candidate cadmium hyperaccumulators. No data on endophytic fungi of these species were found; working hypotheses and a research programme are formulated. Determination of the translocation factor and analytical verification of the data are required.

Keywords: Hyperaccumulators, endophytic fungi, phytoremediation, heavy metals, cadmium, bioconcentration factor, serpentinite, Uzbekistan.

Modern American Journal of Biological and Environmental Sciences
ISSN (E): 3067-7920
Volume 2, Issue 4, April 2026
Website: usajournals.org
This work is Licensed under CC BY 4.0 a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

РАСТЕНИЯ-ГИПЕРАККУМУЛЯТОРЫ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ И ИХ ЭНДОФИТНЫЕ ГРИБЫ В УЗБЕКИСТАНЕ: СОВРЕМЕННЫЕ ЗНАНИЯ, ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ФИТОРЕМЕДИАЦИИ

Эгамбердиева З. О.
Уральский федеральный университет имени первого президента России Б. Н. Ельцина, г.Екатеринбург, Россия
E-mail: zarinaegamberdieva07@gmail.com

Аннотация
Обобщены современные данные о растениях-гипераккумуляторах тяжёлых металлов и их эндофитных грибах и обоснована возможность использования грибов-партнёров в фиторемедиации почв Узбекистана. Рассмотрены критерии гипераккумуляции и механизмы влияния эндофитных грибов на рост растений, подвижность, накопление и транслокацию металлов. Приведены предварительные данные по Ташкентской и Джизакской областям: в почвах серпентинитовых территорий выявлено экстремально высокое содержание Pb, Cr, Ni и Cd; Artemisia tenuisecta (BCF по Cd = 5,75) и Phlomis nubilans (BCF = 1,54) предложены как кандидаты в кадмиевые гипераккумуляторы. Сведения об эндофитных грибах этих видов отсутствуют; сформулированы рабочие гипотезы и программа исследования. Подчёркнута необходимость определения коэффициента транслокации и аналитического контроля данных.

Ключевые слова: гипераккумуляторы, эндофитные грибы, фиторемедиация, тяжёлые металлы, кадмий, коэффициент биоконцентрации, серпентинит, Узбекистан.

1. Введение

Загрязнение почв тяжёлыми металлами и металлоидами относится к наиболее устойчивым экологическим проблемам: металлы не разрушаются

Modern American Journal of Biological and Environmental Sciences
ISSN (E): 3067-7920
Volume 2, Issue 4, April 2026
Website: usajournals.org
This work is Licensed under **CC BY 4.0** *a Creative Commons Attribution 4.0 International License.*

биологически, десятилетиями сохраняются в почвах и попадают в пищевые цепи [1]. Физико-химические методы рекультивации (выемка грунта, промывка, химическая стабилизация) эффективны, но дороги, энергоёмки и нередко нарушают структуру и биологическую активность почвы [1]. Альтернативой служит фиторемедиация – использование растений и ассоциированных с ними микроорганизмов для извлечения, иммобилизации или обезвреживания загрязнителей [1, 2]. Центральное место среди растений занимают гипераккумуляторы – виды, концентрирующие металлы в надземных органах в количествах, летальных для большинства растений, без признаков токсичности [1, 3].

Практическое применение метода ограничено малой биомассой и медленным ростом большинства гипераккумуляторов, фитотоксичностью загрязнителей и узкой элементной специфичностью растений [1, 2]. Один из путей преодоления этих ограничений – микроб-ассистированная фиторемедиация. Эндофиты, то есть бактерии, грибы и актиномицеты, обитающие внутри тканей растений без внешних признаков болезни, взаимодействуют с хозяином теснее, чем ризосферные микроорганизмы, и потенциально эффективнее повышают результативность фиторемедиации [2]. Вместе с тем в исследованиях эндофитов преобладают бактерии, а грибам уделяется заметно меньше внимания [2, 4].

Для Узбекистана вопрос особенно актуален. В республике имеются обширные площади серпентинитовых (ультраосновных) массивов и горнодобывающих территорий, однако систематические исследования гипераккумуляторов местной флоры практически отсутствуют [5], а публикаций об их эндофитных грибах в доступной литературе найти не удалось.

Цель работы – обобщить современные данные о влиянии эндофитных грибов на гипераккумуляторы, представить предварительные результаты по флоре Ташкентской и Джизакской областей и обосновать программу поиска грибов-партнёров у кандидатов в гипераккумуляторы.

Modern American Journal of Biological and Environmental Sciences
ISSN (E): 3067-7920
Volume 2, Issue 4, April 2026
Website: usajournals.org
This work is Licensed under CC BY 4.0 a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

2. Критерии гипераккумуляции

Термин «гипераккумулятор» предложили Brooks с соавторами в 1977 г. для растений, содержащих более 1000 мг/кг никеля в сухой массе надземных органов [1, 6]. Позднее определение распространили на другие элементы. По критериям, уточнённым van der Ent с соавт., пороги составляют: 100 мг/кг для Cd, Se и Tl; 300 мг/кг для Co, Cu и Cr; 1000 мг/кг для Ni, Pb и As; 3000 мг/кг для Zn; 10 000 мг/кг для Mn [1, 7]. Кроме превышения порога, настоящий гипераккумулятор характеризуется коэффициентом биоконцентрации BCF = C(растение)/C(почва) > 1 и коэффициентом транслокации TF = C(побег)/C(корень) > 1, что отличает его от металлотолерантного вида, пассивно поглощающего металл [1, 7]. Эти критерии принципиальны для сильно загрязнённых почв, где высокое содержание металла в тканях может быть следствием пассивного поглощения, и только BCF и TF позволяют отличить его от активного накопления [5].

В Глобальной базе данных гипераккумуляторов на середину 2017 г. зарегистрировано 721 вид, из них свыше 500 – никелевые; кадмиевых известно лишь около семи [1, 3]. Преобладание никеля отчасти объясняется простотой его диагностики колориметрическим тестом с диметилглиоксимом [1]. Многие гипераккумуляторы эндемичны для небольших участков металлоносных почв и потому уязвимы к разрушению местообитаний [1]; для Узбекистана это существенно в связи с наличием редких эндемиков.

3. Предварительные данные по флоре Узбекистана

3.1. Материал и методы

Данные получены в вегетационный сезон 2025 г. в горных и предгорных районах Бостанлыкского района Ташкентской области и Фаришского района Джизакской области [5]. Образцы растений отбирали маршрутным методом из разных местообитаний (каменистые склоны, предгорья, нижний и средний пояса гор, берега оросительных каналов), почву – из корнеобитаемого слоя 0–20 см. Всего собрано 58 образцов 28 видов травянистых растений из 16 семейств. Содержание металлов определяли методом атомно-абсорбционной

Modern American Journal of Biological and Environmental Sciences
ISSN (E): 3067-7920
Volume 2, Issue 4, April 2026
Website: usajournals.org
This work is Licensed under CC BY 4.0 a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

спектроскопии в Центральной лаборатории контроля качества и научных исследований ГП «UzTest» у видов, для которых по литературе известны аккумулирующие свойства. BCF рассчитывали как отношение концентрации металла в надземной части растения к его концентрации в почве; TF не определён из-за отсутствия корневых проб для анализа [5].

3.2. Результаты

Почвы обоих участков отличаются экстремально высоким содержанием Pb, Cr, Ni и Cd (табл. 1), в сотни раз превышающим кларковые и допустимые значения (для Pb – 16 и 130 мг/кг соответственно; фоновое содержание Cd – 0,1–0,3 мг/кг). Концентрации Mg, Cu, Mn и Zn оказались ниже предела обнаружения [5].

Таблица 1 – Содержание металлов в почвах изученных участков, мг/кг сухой почвы [5]

Элемент	**Бостанлыкский р-н (Ташкентская обл.)**	**Фаришский р-н (Джизакская обл.)**
Pb	6301,0	5829,9
Cd	44,75	110,7
Cr	3061,7	3628,0
Ni	2453,0	3490,6
Ca	2059,0	10 015,0
Fe	1027,3	834,5

Пять видов накапливали металлы в надземной массе выше пороговых значений, однако BCF > 1 установлен только для кадмия у двух из них (табл. 2). В надземной массе Artemisia tenuisecta содержалось 637 мг/кг Cd, что в 6,4 раза выше порога гипераккумуляции, при BCF = 5,75. У Phlomis nubilans превышение порога отмечено по четырём металлам (Pb, Cr, Ni, Cd), но BCF > 1 получен лишь для Cd (1,54); по Ni, Pb и Cr значения BCF (0,59; 0,42; 0,44)

Modern American Journal of Biological and Environmental Sciences
ISSN (E): 3067-7920
Volume 2, Issue 4, April 2026
Website: usajournals.org
This work is Licensed under CC BY 4.0 a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

указывают на толерантность, а не на активную аккумуляцию. Остальные виды при BCF < 1 отнесены к индикаторам загрязнения или толерантным аккумуляторам [5].

Таблица 2 – Виды с содержанием металлов в надземной массе выше порога гипераккумуляции [5]

Вид	**Семейство**	**Металл в надземной части, мг/кг**	**BCF**	**Статус по [5]**
Artemisia tenuisecta	Asteraceae	Cd – 637	5,75	кандидат в Cd-гипераккумуляторы
Phlomis nubilans	Lamiaceae	Cd, Pb, Cr, Ni – выше порогов	Cd – 1,54; Ni – 0,59; Pb – 0,42; Cr – 0,44	кандидат (Cd); для Ni, Pb, Cr – толерантный аккумулятор
Rumex sp. †	Polygonaceae	Cr – 1405	0,39	толерантный аккумулятор
Urtica dioica	Urticaceae	Pb – 1294; Cr – 1338	0,22; 0,37	толерантный аккумулятор
Agrimonia asiatica	Rosaceae	Pb – 2042	0,32	толерантный аккумулятор

† В табл. 1 источника указан Rumex drobovii, в тексте обсуждения – R. chalepensis; видовая принадлежность требует уточнения.

3.3. Ограничения предварительных данных

Полученные результаты следует считать предварительными. Во-первых, TF не определён, поэтому ни один вид пока не отвечает всем трём критериям гипераккумуляции [5, 7]. Во-вторых, в источнике не приведены число повторностей и статистическая обработка, а видовая принадлежность одного из видов Rumex указана неоднозначно. В-третьих, содержание Pb около 6000 мг/кг нетипично для ультраосновных пород, в которых обычно преобладают Ni, Cr и Co; оно указывает на техногенный вклад либо требует аналитической проверки (контроль по стандартным образцам, сопоставление валового и подвижного содержания металлов). В-четвёртых, надземные части необходимо отмывать от почвенной пыли, иначе содержание металлов

Modern American Journal of Biological and Environmental Sciences
ISSN (E): 3067-7920
Volume 2, Issue 4, April 2026
Website: usajournals.org
This work is Licensed under CC BY 4.0 a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

завышается. Наконец, для хрома порог по [1, 7] (300 мг/кг) ниже принятого в [5] (1000 мг/кг), поэтому оценку по этому элементу нужно уточнить. Кроме того, на участках с таким уровнем загрязнения сам вывод об активном накоплении кадмия должен быть подтверждён повторным отбором с парными пробами «почва – корень – побег».

4.Эндофитные грибы и гипераккумуляторы: современное состояние знаний

4.1. Общая характеристика и разнообразие

Эндофитами называют организмы, обитающие в тканях растений, причём заражение внешне не проявляется; внутреннюю локализацию подтверждают гистологически, выделением из тщательно стерилизованных тканей или амплификацией ДНК [2]. По жизненной стратегии эндофиты бывают облигатными (полностью зависят от хозяина) и факультативными (часть жизненного цикла проводят вне растения); в симбиозе они получают от растения углеводы, а взамен повышают его устойчивость к биотическим и абиотическим стрессам [2]. Эндофиты гипераккумуляторов часто устойчивы к металлам благодаря длительной адаптации к высоким концентрациям металла в тканях хозяина [2]; вместе с тем металлоустойчивые изоляты найдены и у негипераккумулирующих растений, в том числе из незагрязнённых мест, а изоляты одного таксона из разных видов или тканей одного растения различаются по чувствительности к металлам [2]. Следовательно, свойства необходимо проверять для каждого штамма.

Среди металлоустойчивых грибов-эндофитов отмечены Microsphaeropsis, Mucor, Phoma, Alternaria, Peyronellaea, Steganosporium и Aspergillus [2]. Из растений отвалов свинцово-цинкового рудника в Китае выделены грибы, устойчивые к Pb и Zn [2, 8]. Из кадмиевого гипераккумулятора Solanum nigrum получен Microsphaeropsis sp. LSE10, способный к биосорбции Cd [9]; изучено разнообразие культивируемых эндофитных грибов этого вида и их роль в усилении фиторемедиации [10], а Cd-устойчивый гриб RSF6L накапливал кадмий и стимулировал рост растения-хозяина [4, 11]. Cd- и Pb-

Modern American Journal of Biological and Environmental Sciences
ISSN (E): 3067-7920
Volume 2, Issue 4, April 2026
Website: usajournals.org
This work is Licensed under CC BY 4.0 a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

устойчивый Mucor sp. CBRF59 выделен из Brassica chinensis [12]; самослияние его протопластов повысило эффективность фитоэкстракции Cd и Pb рапсом [4, 13]. Из корней гипераккумулятора Prosopis laevigata выделен штамм Aspergillus luchuensis [14], а из корней Vachellia farnesiana на хвостохранилищах – грибы родов Neocosmospora и Aspergillus, удалявшие металлы из жидких культур [15].

4.2. Механизмы влияния на гипераккумуляторы

Рост и снижение токсичности. Эндофиты синтезируют индолил-3-уксусную кислоту (ИУК), цитокинины и гиббереллины, стимулирующие рост растений в загрязнённых почвах [2], а ферментом АЦК-дезаминазой снижают избыточный синтез этилена, тормозящего рост корней [2]. У грибов эти свойства описаны, например, для Mucor sp. MHR-7, который синтезирует ИУК и АЦК-дезаминазу, растворяет фосфаты и связывает смесь металлов в мицелии, снижая токсичность для корней Brassica campestris; в полевых испытаниях он действовал как биоудобрение [4, 16]. Металлоустойчивые эндофиты тополя увеличивали число корневых окончаний и биомассу побегов [4, 17], штамм A. luchuensis стимулировал рост гипераккумулятора P. laevigata [14].

Мобилизация металлов. Эндофиты выделяют органические кислоты и сидерофоры, образующие устойчивые комплексы не только с железом, но и с Al, Cd, Cu, Pb и Zn и повышающие концентрацию растворимых форм металла [2]. Грибы изменяют состав корневых экссудатов и pH почвы и тем самым регулируют биодоступность металлов; гифы способны переносить элементы к корням на значительные расстояния [4].

Иммобилизация и биосорбция. Грибы могут связывать металлы мицелием [9, 16] и осаждать их в виде нерастворимых фосфатов (так описана иммобилизация свинца) [4]. Эти процессы защищают корни от токсичности, но могут конкурировать с растением за металл [4].

Modern American Journal of Biological and Environmental Sciences
ISSN (E): 3067-7920
Volume 2, Issue 4, April 2026
Website: usajournals.org
This work is Licensed under CC BY 4.0 a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

Накопление и транслокация. Эндофитные грибы способны усиливать накопление металла растением: штамм A. luchuensis повышал транслокацию меди в гипераккумуляторе P. laevigata [14], а наличие эндофитов Neotyphodium усиливало способность злаков Festuca к гипераккумуляции кадмия в гидропонной культуре [18]. Особое место занимают арбускулярные микоризные грибы и тёмноокрашенные септированные эндофиты (DSE): обзор [19] связывает гипераккумуляцию с состоянием микробиома корней, а для DSE показано, что их распространение и металлоустойчивость зависят от содержания Cd, доступных фосфора и азота в почве и от состава корневых грибных сообществ [20].

4.3. Противоречия и пробелы

Результаты неоднозначны. Металлоустойчивые эндофиты могут как усиливать, так и снижать поступление металла в побеги; в обоих случаях итог определяется в первую очередь концентрацией металла в почве [2]. Единичные штаммы бывают неэффективны, тогда как комбинированные инокулянты повышают извлечение металла: так, отдельные эндофитные бактерии не усиливали транслокацию Ni у Noccaea caerulescens на серпентинитовой почве, а их сочетание повышало фитоэкстракцию [4, 21]. Грибы изучены хуже бактерий, большинство данных получено в лабораторных условиях, а исследования самих гипераккумуляторов чаще ограничиваются растениями без оценки их эндофитов [2, 4]. Часть эндофитов может быть скрытыми патогенами, проявляющими вирулентность при определённых условиях, поэтому непатогенность изолятов следует проверять до применения [4]. Сочетания «растение – эндофит» нельзя подбирать случайно; необходим предварительный скрининг [4].

5. Рабочие гипотезы для Artemisia tenuisecta и Phlomis nubilans

Для A. tenuisecta полезны данные по близкому виду A. argyi: он доминирует на свинцово-цинковых рудниках и устойчив к Pb, Cd и Mn [22], сохраняет

Modern American Journal of Biological and Environmental Sciences
ISSN (E): 3067-7920
Volume 2, Issue 4, April 2026
Website: usajournals.org
This work is Licensed under CC BY 4.0 a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

нормальный рост при содержании Cd в почве до 10 мг/кг, причём TF > 1 отмечен при 0,6 мг/кг Cd и снижался при превышении этой концентрации [23]. Эндофитные сообщества A. argyi на участках с разным уровнем загрязнения Pb и Cd исследованы методом высокопроизводительного секвенирования 16S рРНК, то есть по бактериальной составляющей [22]. Эти данные показывают, что род Artemisia способен к кадмиевой толерантности, но уровни Cd в опытах (до 10 мг/кг) на порядок ниже, чем в почвах Фаришского района (110,7 мг/кг) [5, 23], поэтому прямой перенос выводов недопустим. Сведений об эндофитах и гипераккумуляции у Phlomis в доступной литературе мы не нашли. На основании литературных данных [2, 4, 16] предлагаются следующие проверяемые гипотезы:

Г1. Из тканей A. tenuisecta и P. nubilans с металлоносных почв можно выделить эндофитные грибы с высокой устойчивостью к Cd, Pb, Ni и Cr вследствие адаптации к высоким концентрациям металлов в тканях хозяина.

Г2. Часть изолятов обладает признаками, повышающими эффективность фиторемедиации: синтезом ИУК, сидерофоров и АЦК-дезаминазы, растворением фосфатов.

Г3. Инокуляция отобранными изолятами изменяет биомассу, содержание Cd в побегах, BCF и TF; направление эффекта зависит от штамма и концентрации металла в почве и должно определяться экспериментально.

Modern American Journal of Biological and Environmental Sciences
ISSN (E): 3067-7920
Volume 2, Issue 4, April 2026
Website: usajournals.org
This work is Licensed under CC BY 4.0 a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

6. Программа исследования

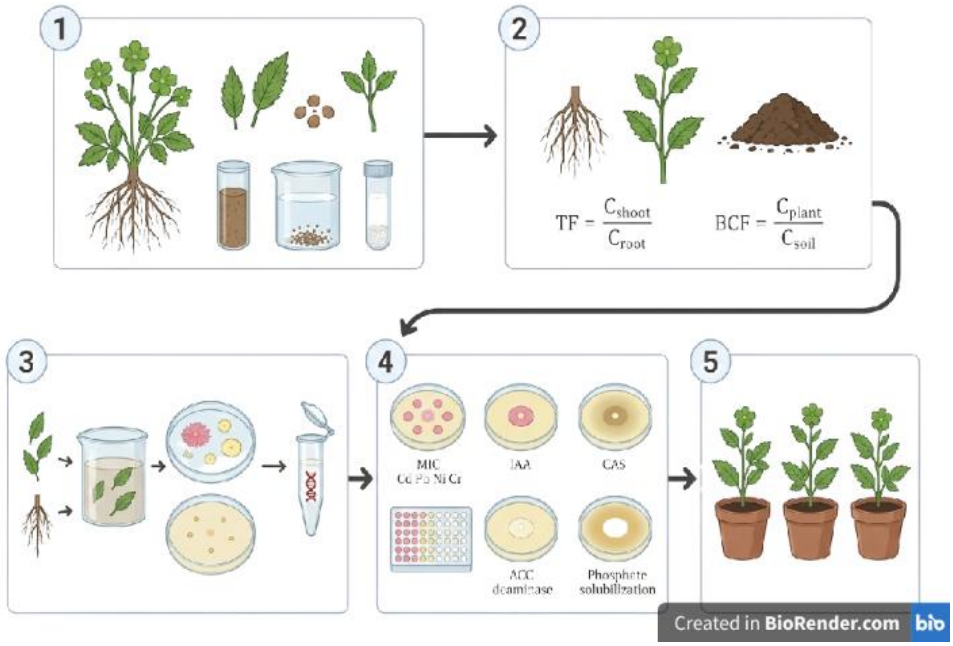


Рис 1. Комплексная схема отбора металлотолерантных эндофитных бактерий для синергетической фитоэкстракции тяжелых металлов растениями-гипераккумуляторами.

1. Повторный отбор. Целые растения (корни, стебли, листья) не менее чем с 5–10 особей на популяцию, с парными пробами почвы. Определение валового и подвижного содержания металлов (например, экстракцией ДТПА), контроль по стандартным образцам, отмывка надземных частей от пыли, статистическая обработка. Редкий эндемик P. nubilans [5] отбирать минимально и по разрешению; предпочтительно использовать черенки и семена.

2. Определение TF и пересчёт BCF по парным пробам «корень – побег – почва».

Modern American Journal of Biological and Environmental Sciences
ISSN (E): 3067-7920
Volume 2, Issue 4, April 2026
Website: usajournals.org
This work is Licensed under CC BY 4.0 a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

3. Выделение и идентификация грибов. Поверхностная стерилизация тканей с контролем последней промывной воды, посев на питательные среды; идентификация по морфологии и ITS-региону рДНК [2].

4. Скрининг изолятов. Минимальная ингибирующая концентрация Cd, Pb, Ni и Cr; продукция ИУК, сидерофоров (CAS-тест) и АЦК-дезаминазы; растворение фосфатов [2, 4].

5. Проверка непатогенности изолятов на растениях-хозяевах [4].

6. Вегетационные опыты.A. tenuisecta с инокуляцией и без неё на почве с серпентинитового участка и модельной почве с Cd; отдельные изоляты и консорциум [21]; контроль с автоклавированным инокулятом. Показатели: биомасса, содержание металлов в корнях и побегах, BCF, TF.

7. Полевые испытания (при положительных результатах) только с местными природными изолятами, без генетически модифицированных организмов [4].

7. Обсуждение и перспективы

Практическая значимость направления определяется несколькими обстоятельствами. Во-первых, экономически оправданная фитоэкстракция с извлечением металла (фитомайнинг) разработана прежде всего для никеля [1], тогда как для кадмия основной задачей остаётся очистка и снижение риска, поэтому ценность кадмиевых гипераккумуляторов определяется скоростью очистки, а не коммерческой переработкой биомассы. Во-вторых, ограничения метода – малая биомасса, медленный рост, элементная специфичность [1] – могут частично преодолеваться комбинацией гипераккумулятора, металл-мобилизующих микроорганизмов и оптимизированной агротехники [1, 4]. В-третьих, важны вопросы безопасности: изученные виды в значительной доле лекарственные и

Modern American Journal of Biological and Environmental Sciences
ISSN (E): 3067-7920
Volume 2, Issue 4, April 2026
Website: usajournals.org
This work is Licensed under CC BY 4.0 a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

медоносные [5], поэтому сбор сырья на загрязнённых участках недопустим, а обогащённую кадмием биомассу необходимо утилизировать контролируемо [1]. Наконец, редкие эндемичные металлофиты требуют охраны параллельно с их изучением [1].

Новизна предлагаемого направления состоит в том, что эндофитные грибы флоры Узбекистана с позиции гипераккумуляции ещё не изучены. Основной риск – возможное отсутствие эффекта или его зависимость от условий, на что указывает литература [2]; поэтому программа предусматривает проверку гипотез, а не предполагает заранее положительный результат.

8. Выводы

1. Гипераккумулятором следует считать растение, у которого содержание металла в надземных органах превышает порог, а BCF и TF больше единицы [7]. Для флоры Узбекистана BCF > 1 по кадмию получен у Artemisia tenuisecta (5,75) и Phlomis nubilans (1,54) [5]; без определения TF они остаются кандидатами.
2. Эндофитные грибы гипераккумуляторов и металлофитов устойчивы к металлам и могут повышать рост растений, подвижность, накопление и транслокацию металлов, но эффект зависит от штамма и условий [2, 4, 14].
3. Грибы изучены хуже бактерий; для A. tenuisecta и P. nubilans сведений об эндофитных грибах нет, и их поиск является научно обоснованным направлением.
4. Для подтверждения статуса кандидатов и отбора грибов-партнёров необходимы повторный отбор с определением TF, аналитический контроль, скрининг изолятов, вегетационные и затем полевые опыты.

Литература

1. Sharma L. Role of hyperaccumulator plants in the phytoremediation of contaminated environments: a review // Indian J. Mod. Res. Rev. 2026. Vol. 4, № 8. P. 283–288.
2. Li H.-Y., Wei D.-Q., Shen M., Zhou Z.-P. Endophytes and their role in phytoremediation // Fungal Divers. 2012. Vol. 54. P. 11–18.

Modern American Journal of Biological and Environmental Sciences
ISSN (E): 3067-7920
Volume 2, Issue 4, April 2026
Website: usajournals.org
This work is Licensed under CC BY 4.0 a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

3. Reeves R.D., Baker A.J.M., Jaffré T., Erskine P.D., Echevarria G., van der Ent A. A global database for plants that hyperaccumulate metal and metalloid trace elements // New Phytol. 2018. Vol. 218, № 2. P. 407–411.
4. He W., Megharaj M., Wu C.-Y., Subashchandrabose S.R., Dai C.-C. Endophyte-assisted phytoremediation: mechanisms and current application strategies for soil mixed pollutants // Crit. Rev. Biotechnol. 2020. Vol. 40, № 1. DOI: 10.1080/07388551.2019.1675582.
5. Эгамбердиева З.О., Тептина А.Ю. Идентификация и анализ потенциальных растений-гипераккумуляторов тяжёлых металлов во флоре Узбекистана // Modern Biology and Genetics. 2026. № 3 (17). С. 51–62.
6. Brooks R.R., Lee J., Reeves R.D., Jaffré T. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants // J. Geochem. Explor. 1977. Vol. 7. P. 49–57.
7. Van der Ent A., Baker A.J.M., Reeves R.D., Pollard A.J., Schat H. Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: facts and fiction // Plant Soil. 2013. Vol. 362. P. 319–334.
8. Li H.Y., Li D.W., He C.M., Zhou Z.P., Mei T., Xu H.M. Diversity and heavy metal tolerance of endophytic fungi from six dominant plant species in a Pb-Zn mine wasteland in China // Fungal Ecol. 2011. DOI: 10.1016/j.funeco.2011.06.002.
9. Xiao X., Luo S., Zeng G. et al. Biosorption of cadmium by endophytic fungus (EF) Microsphaeropsis sp. LSE10 isolated from cadmium hyperaccumulator Solanum nigrum L. // Bioresour. Technol. 2010. Vol. 101. P. 1668–1674.
10. Khan A.R., Waqas M., Ullah I. et al. Culturable endophytic fungal diversity in the cadmium hyperaccumulator Solanum nigrum L. and their role in enhancing phytoremediation // Environ. Exp. Bot. 2017. Vol. 135. P. 126–135.
11. Khan A.R., Ullah I., Waqas M. et al. Host plant growth promotion and cadmium detoxification in Solanum nigrum, mediated by endophytic fungi // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2017. Vol. 136. P. 180–188.
12. Deng Z., Cao L., Huang H. et al. Characterization of Cd- and Pb-resistant fungal endophyte Mucor sp. CBRF59 isolated from rapes (Brassica chinensis) in a metal-contaminated soil // J. Hazard. Mater. 2011. Vol. 185. P. 717–724.

Modern American Journal of Biological and Environmental Sciences
ISSN (E): 3067-7920
Volume 2, Issue 4, April 2026
Website: usajournals.org
This work is Licensed under CC BY 4.0 a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

13. Deng Z.J., Zhang R.D., Shi Y. et al. Enhancement of phytoremediation of Cd- and Pb-contaminated soils by self-fusion of protoplasts from endophytic fungus Mucor sp. CBRF59 // Chemosphere. 2013. Vol. 91, № 1. P. 41–47.
14. Tovar-Sánchez E., Concepción-Acosta C.M., Sánchez-Reyes A. et al. Aspergillus luchuensis, an endophyte fungus from the metal hyperaccumulator plant Prosopis laevigata, promotes its growth and increases metal translocation // Plants. 2023. Vol. 12, № 6. Art. 1338. DOI: 10.3390/plants12061338.
15. Salazar-Ramírez G., Flores-Vallejo R.C., Rivera-Leyva J.C. et al. Characterization of fungal endophytes isolated from the metal hyperaccumulator plant Vachellia farnesiana growing in mine tailings // Microorganisms. 2020. Vol. 8, № 2. Art. 226. DOI: 10.3390/microorganisms8020226.
16. Zahoor M., Irshad M., Rahman H. et al. Alleviation of heavy metal toxicity and phytostimulation of Brassica campestris L. by endophytic Mucor sp. MHR-7 // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2017. Vol. 142. P. 139–149.
17. Lacercat-Didier L., Berthelot C., Foulon J. et al. New mutualistic fungal endophytes isolated from poplar roots display high metal tolerance // Mycorrhiza. 2016. Vol. 26, № 7. P. 657–671.
18. Soleimani M., Hajabbasi M.A., Afyuni M., Mirlohi A., Borggaard O.K., Holm P.E. Effect of endophytic fungi on cadmium tolerance and bioaccumulation by Festuca arundinacea and Festuca pratensis // Int. J. Phytoremediat. 2010. DOI: 10.1080/15226510903353187.
19. Bočaj V., Regvar M., Pongrac P. Linking microbiome and hyperaccumulation in plants // Acta Biol. Slov. 2025. Vol. 68, № 2. DOI: 10.14720/abs.68.2.19957.
20. Effects of biological and abiotic factors on dark septate endophytes distribution and heavy metal resistance in different environments // Front. Microbiol. 2025. DOI: 10.3389/fmicb.2024.1527512.
21. Visioli G., Vamerali T., Mattarozzi M. et al. Combined endophytic inoculants enhance nickel phytoextraction from serpentine soil in the hyperaccumulator Noccaea caerulescens // Front. Plant Sci. 2015. Vol. 6. Art. 638.

Modern American Journal of Biological and Environmental Sciences
ISSN (E): 3067-7920
Volume 2, Issue 4, April 2026
Website: usajournals.org
This work is Licensed under CC BY 4.0 a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

22. Response of plant endophyte communities to heavy metal stress and plant growth promotion by the endophyte Serratia marcescens (strain JG1) // Plants. 2024. Vol. 13, № 19. Art. 2755. DOI: 10.3390/plants13192755.
23. Physiology and transcriptome analysis of Artemisia argyi adaptation and accumulation to soil cadmium // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2024.