

УДК 574.24

DOI 10.34014/2227-1848-2024-3-139-154

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ РАСТЕНИЙ С ЦЕЛЬЮ ФИТОРЕМЕДИАЦИИ ПОЧВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

В.Ю. Мещерякова, Н.А. Дьякова, Ю.А. Павлова

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж, Россия

Эффективным методом биологической реставрации загрязненных почв с помощью растений является фиторемедиация.

Целью данной работы является обзор перспективных с точки зрения фиторемедиации растений-гипераккумуляторов.

Для решения задач фиторемедиации используют разные виды растений, генную и клеточную инженерию и другие приемы, способствующие повышению эффективности очистки почв от тяжелых металлов. В работе представлен обзор опыта использования растений-гипераккумуляторов, которые способны концентрировать в тканях надземных органов различные поллютанты. Поиск литературы осуществлялся в базах данных eLIBRARY, КиберЛенинка. Растения, подходящие для целей фиторемедиации, должны соответствовать большому набору определенных критериев, однако ни одно растение не способно удовлетворить их все, в связи с чем выбор наиболее эффективного является сложной задачей. В работе проведен анализ растений, используемых в качестве фиторемедиантов на территории Российской Федерации. Перечень исследований, входящих в обзор, демонстрирует избирательность поглощения тех или иных тяжелых металлов разными видами растений. При этом большая часть (около 75 %) растений-фиторемедиантов являются аккумуляторами никеля. Лишь небольшое число растений способно аккумулировать другие тяжелые металлы, такие как медь, цинк, кадмий, свинец. В некоторых публикациях, представленных в обзоре, указывается, что для достижения эффективности фиторемедиации необходимо также уделять внимание почвенному составу и другим внешним факторам.

Фиторемедиация на сегодняшний день является недостаточно изученным и непрогнозируемым способом очистки загрязненных почв, не получившим широкого применения, однако являющимся перспективным.

Ключевые слова: фиторемедиация, тяжелые металлы, гипераккумуляция, очистка почв.

Введение. Рост городов и повышение антропогенной активности все более актуализируют проблему загрязнения лекарственного растительного сырья и почв различными экотоксикантами, в связи с чем возникает острая необходимость проведения контроля их качества и экологической чистоты.

Одними из наиболее опасных экотоксикантов в силу высокой токсичности, устойчивости в окружающей среде и способности к биологической миграции являются тяжелые металлы (ТМ). Они обладают способностью к аккумуляции в почве и лекарственном растительном сырье.

На сегодняшний день для очищения почв от ТМ используют химические методы: выщелачивание и перевод металла в трудноподвиж-

ную форму. Эти методы недостаточно эффективны [1].

В связи с этим перспективно использование потенциала растений с целью восстановления и очищения почв [2, 3].

Метод биологической реставрации загрязненных почв с помощью растений-гипераккумуляторов, называемый фиторемедиацией, является достаточно эффективным, экологически безопасным и экономически выгодным, но длительным по времени. Фиторемедиация в 2–4 раза экономически эффективнее, чем срезание и захоронение загрязненного верхнего слоя почв [4–9].

Фиторемедиация состоит из следующих этапов:

I. Высадка перспективных для фиторемедиации растений, способных аккумулировать соответствующие ТМ;

II. Создание условий для культивации этих растений;

III. Сбор фитомассы с последующей утилизацией методом сжигания или компостирования.

Длительность и периодичность повторения процедуры фиторемедиации может регулироваться по мере необходимости в течение нескольких лет до устойчивого снижения содержания ТМ в почве до допустимого уровня [10].

В зависимости от механизма воздействия на экотоксикант различают следующие направления фиторемедиации:

1) фитоэкстракция – поглощение и аккумуляция экотоксиканта в растении-гипераккумуляторе. Один из наиболее распространенных методов [11]. Выделяют три типа фитоэкстракции: накопление ТМ в корнях, в верхних частях растений, а также во всей биомассе растений [12, 13];

2) фитостабилизация – перевод в корневой зоне растения ТМ из растворимой формы в нерастворимую [14];

3) фитодеградация – метаболизм ТМ растениями при участии растительных ферментов [15];

4) фитоиспарение – экстракция ТМ из почв и выделение его растением в газообразной форме;

5) ризодеградация – разложение экотоксиканта в прикорневой зоне растений микроорганизмами. Применим преимущественно для очищения почв от органических экотоксикантов.

Однако на сегодняшний день фиторемедиация является недостаточно изученной и непрогнозируемой технологией. Это связано в первую очередь с низким уровнем изученности протекающих в растениях биохимических процессов, отсутствием четких технологий фиторемедиации, применимых для конкретных регионов, определенных типов почв и экотоксикантов. Для широкомасштабного внедрения технологии фиторемедиации не существует

конкретного перечня растений-гипераккумуляторов, мало изучены механизмы накопления ТМ в растительных организмах [16].

Целью данной работы является обзор перспективных с точки зрения фиторемедиации растений-гипераккумуляторов.

Для решения задач фиторемедиации применяются растения различных родов, семейств, порядков, классов, а также отделов, включая цветковые, голосеменные, папоротники, мхи и водоросли [17].

Наиболее перспективные растения-гипераккумуляторы должны обладать следующими характеристиками: устойчивость к накапливаемому экотоксиканту; способность к накоплению сразу нескольких ТМ; способность к быстрому транспорту токсичных элементов в надземные органы; быстрый рост и высокая биопродуктивность; способность к быстрому вегетативному возобновлению после скашивания; сильная корневая система; устойчивость к различным болезням; удобство уборки и непривлекательность для животных [18–20]. В настоящее время не выявлено ни одно растение, которое могло бы соответствовать всем вышеперечисленным критериям [21].

Способность растений к очищению почв от ТМ ограничена несколькими факторами, к которым относятся доступность элемента для его поглощения корнями растений, скорость его всасывания, перемещения ТМ из корня в надземную часть, а также устойчивость растения к биохимическому воздействию экотоксиканта [10].

В соответствии с зарубежной классификацией растений по ответной реакции на присутствие в среде произрастания ТМ выделяют три основные группы: растения-исключатели, растения-индикаторы и растения-гипераккумуляторы [22].

Растения-исключатели удерживают ТМ преимущественно в корнях, которые способны к избирательной проницаемости, т.е. могут пропускать сквозь себя одни экотоксиканты, не пропуская другие.

Растения-индикаторы способны активно аккумулировать ТМ, обычно толерантны к существующему уровню их концентрации благо-

даря образованию внеклеточных металлсвязывающих соединений (хелаторов) и способны менять характер воздействия элемента путем его запасания в нечувствительных к ТМ участках.

Гипераккумуляция представляет собой одну из стратегий устойчивости растений к ТМ, связанную со способностью концентрировать их в тканях надземных органов. Термин «гипераккумулятор» относится к растениям, способным накапливать ТМ в побегах до концентраций, в 100–1000 раз превышающих таковые у обычных растений [10].

Гипераккумуляция ТМ у растений обеспечивается за счет эффективной адсорбции и поглощения ионов из почвы, устойчивости транспортной системы растения к ТМ, эффективности механизмов детоксикации металлов и сохранения ионного гомеостаза, повышенной металлсвязывающей способности клеточных стенок. В надземных частях растений-сверхнакопителей детоксикация ТМ достигается за счет их хелатирования, внутриклеточной компартментации в апопласте и вакуолях или аккумуляции в трихомах листьев и эпидермисе. Однако растения-гипераккумуляторы характеризуются низкой способностью к накоплению биомассы.

Доказано, что синтетические хелатообразующие агенты способствуют повышению концентрации ТМ в почвенном растворе [23]. Некоторые органические кислоты, например этилендиаминтетрауксусная (ЭДТА), повышают доступность ТМ для растений, выполняя роль транспортного средства в растительном организме. Поступающие в растения комплексы ТМ и ЭДТА накапливаются преимущественно в их надземных частях, что способствует эффективному очищению почвы от ТМ [24].

Однако органические кислоты могут ухудшать свойства почвы, подкислять ее. В связи с этим с целью увеличения содержания в почве подвижных форм ТМ рекомендуется предварительная высадка хотя бы одного вида древесных растений-мелиорантов: липы мелколистной *Tilia cordata*, липы крупнолистной *Tilia platyphyllos*, кизильника черноплодного *Cotoneaster melanocarpus*, яблони домашней *Malus domestica*, ивы пятитычинковой *Salix pentandra*, ивы ломкой *Salix fragilis*,

ореха маньчжурского *Juglans mandshurica*, сосны обыкновенной *Pinus sylvestris*, ореха серого *Juglans cinerea*, бузины кистевидной *Sambucus racemosa*. Это способствует более интенсивной очистке почв без дополнительных обработок [25].

Также установлено положительное влияние воздействия постоянного магнитного поля на семена сои *Glycine*, листового салата *Lactuca sativa* и фасоли *Phaseolus* при использовании их для фиторемедиации почв, загрязненных ионами свинца и меди [26].

В настоящее время изучено порядка 400 видов растений-гипераккумуляторов, относящихся к 45 семействам. Преимущественно это представители семейств капустных *Brassicaceae*, гвоздичных *Caryophyllaceae*, мятликовых *Poaceae*, флакуртиевых *Flacourtiaceae*, сложноцветных *Asteraceae*, осоковых *Cyperaceae*, кунониевых *Cunoniaceae*, бобовых *Fabaceae*, фиалковых *Violaceae*, губоцветных *Lamiaceae* и молочайных *Euphorbiaceae* [27]. При этом около 75 % из них являются аккумуляторами никеля. Около 30 видов могут накапливать цинк, кобальт и медь.

Перечень гипераккумуляторов цинка включает более 20 видов, представленных преимущественно растениями семейства крестоцветных *Brassicaceae*. Они способны аккумулялировать сразу несколько металлов: медь, кадмий, никель, селен, свинец и цинк, по этой причине их использование в фиторемедиации перспективно, так как почвы загрязнены, как правило, несколькими видами металлов одновременно. Свинец и кадмий способны накапливать очень малочисленные представители высших растений.

Однако большинство видов растений-гипераккумуляторов сравнительно небольшие по размерам, относительно медленно растут, а также специализированы на гипераккумуляции небольшого числа ТМ, что ограничивает возможности их использования для широкомасштабной очистки загрязненных почв [10]. Так, для ярутки *Thlaspi caerulescens* характерна гипераккумуляция только кадмия и цинка [28], алиссум *Alyssum sp.* накапливает никель и кобальт [29], артраксон щетинистый *Arthraxon hispidus* аккумулялирует свинец,

цинк и мышьяк [30]. Изучение сосны юннанской *Pinus Yunnanensis* и сосны Массона *Pinus Massoniana* выявило, что при загрязнении почвы молибденом, хромом, никелем, кадмием, медью наблюдается их избирательная способность к накоплению только кадмия [31].

Было предложено использование деревьев с интенсивной транспирацией, глубокой корневой системой, быстрым ростом и высокой продуктивностью в качестве растений-фитоэкстракторов [32]. Наиболее распространено использование ивы *Salix spp.* и тополя *Populus spp.* для экстракции кадмия и цинка из загрязненных почв [32, 33]. Однако главными недостатками обычных древесных культур является невысокое концентрирование ТМ и, соответственно, низкая степень извлечения экотоксикантов из почв, что ставит под сомнение целесообразность их использования в фиторемедиации [34].

Большая группа растений-гипераккумуляторов также принадлежит семейству злаковых *Poaceae*. Перспективным фитосорбентом кобальта, марганца и хрома является мискантус китайский *Miscanthus sinensis*, который ранее использовался в декоративных целях. Также высокую способность накапливать ТМ имеют костер полевой *Bromus arvensis* и плевел многолетний *Lolium perenne* [35].

Выведение древесных пород и других растений с высокой устойчивостью и способностью к поглощению ТМ является важным направлением генной инженерии [36, 37]. Разрабатываются также подходы, обеспечивающие увеличение скорости роста и биомассы растений-гипераккумуляторов при помощи генноинженерных приемов, таких как введение генов, кодирующих признаки, характерные для растений-гипераккумуляторов (например, синтез различных металлосвязывающих пептидов) [38]. Высокую эффективность в фиторемедиации продемонстрировала трансформированная с помощью генной инженерии культура табака сизого *Nicotiana glauca* [39].

Разработан фиторемедиационный способ очистки почв, основанный на использовании генетически модифицированных растений,

обладающих повышенной способностью к аккумуляции металлов, например трансгенной петунии [40] или генетически модифицированной горчицы сарептской *Brassica juncea* [41], эффективно извлекающих из почв избытки хрома, молибдена, кадмия, урана.

Клеточная селекция также перспективна для получения растений, имеющих повышенный коэффициент поглощения ТМ [42].

Наряду с применением клеточной селекции и генной инженерии накопление ТМ растениями может быть усилено за счет использования различных агротехнических приемов, в т.ч. семенного контроля, удобрения, изменения плотности посева, известкования, ирригации, севооборота, сокращения цикла фитоэкстракции [43, 44].

Существует фиторемедиационный способ очистки почв с помощью однолетних сельскохозяйственных культур – кукурузы *Zea mays* и пшеницы *Triticum* [45] или сафлора *Carthamus* [46]. Кроме того, овес *Avena sativa*, гречиха *Fagopyrum esculentum*, бобы *Vicia faba* и соя *Glycine* показывают высокую толерантность к загрязнению ТМ и характеризуются способностью накапливать их в фитомассе, что позволяет использовать эти растения в качестве фиторемедиантов [47].

Для очистки загрязненных ТМ сельскохозяйственных угодий применяют растения вики *Vicia* и рапса *Brassica napus*. Вика *Vicia* улучшает микроструктуру почвы и повышает ее насыщенность азотсодержащими компонентами, что способствует росту эффективности фитоэкстракции ТМ. Растения рапса *Brassica napus* хорошо накапливают биомассу, аккумулируют медь и могут с успехом применяться для фиторемедиации загрязненных почв [48].

Отмечается также возможность применения подсолнечника *Helianthus* как перспективного фиторемедианта меди и никеля [16].

В ходе изучения семейства капустных *Brassicaceae* был выявлен аккумулятор никеля, меди и цинка – резуха стреловидная *Arabis sagittata*, а также гипераккумулятор никеля – бурочок *Alyssum murale*. Данные растения могут быть использованы как модель для

разработки технологий очистки среды от избытка ТМ [49]. Кроме того, установлена способность горчицы сарептской *Brassica juncea* накапливать в клетках и межклеточном пространстве значительное количество цинка [50]. Хорошим гипераккумулятором является и горчица белая *Sinapis alba*, способная накапливать кадмий, ртуть, свинец, медь и цинк, особенно когда их содержание в почве превышает предельно допустимые концентрации. Наряду с горчицей белой *Sinapis alba* отмечается эффективность сафлора *Carthamus tinctorius*. Установлено, что данный вид при чередовании с горчицей белой *Sinapis alba* за 4 года снижает до безопасного уровня концентрацию кадмия, цинка, свинца и меди [51].

Среди многолетних растений в качестве фиторемедианта применяют свербигу восточную *Bunias orientalis*, которая отличается более высокой экологической устойчивостью, биологической продуктивностью, мощной корневой системой и большой аккумуляционной способностью в отношении мышьяка и ТМ [52].

В целях фиторемедиации может использоваться высадка травосмесей. Так, вдоль автомобильных дорог рекомендована высадка следующего состава: пасленовые *Solanaceae* (40–50 %), крестоцветные *Brassicaceae* (20–30 %), астровые *Asteraceae* (20–25 %), бобовые *Fabaceae* (10–15 %), злаковые (10–15 %) [53].

Применяется травосмесь и другого состава: райграс высокий *Arrhenatherum elatius* (10 %), тимофеевка луговая *Phleum pratense* (30 %), донник желтый *Melilotus officinalis* (20 %), овсяница луговая *Festuca pratensis* (30 %), люцерна желтая *Medicago falcata* (10 %), – с последующим ее скашиванием на стадии вегетационного периода и уборкой. Добавка буроугольной крошки способствует улучшению параметров роста травосмеси, что приводит к увеличению массы извлекаемых из почвы ТМ [54].

Обнаружено, что смесь растений семейства сложноцветных (бодяка полевого *Cirsium arvense*, полыни горькой *Artemisia absinthium*, одуванчика лекарственного *Taraxacum officinale*, тысячелистника обыкновенного *Achillea millefolium*), злаковых (мятлика лугового *Poa*

pratensis) и бобовых (клевера лугового *Trifolium pratense*) (1:1:1) обладает значительной способностью к накоплению ТМ в надземных частях растений. Травы рекомендовано скашивать на стадии активного роста, высушивать и утилизировать. Процедуру циклично повторяют по мере роста надземной части [55].

Изучен и предложен состав смеси трав для фиторемедиации загрязненных почв на территории меднорудных предприятий южного Урала. Смесь включает в себя следующие растения: пырей ползучий *Elytrigia repens*, житняк гребенчатый *Agropyron cristatum*, мятлик луговой *Poa pratensis*, овсяница луговая *Festuca pratensis*. Данный выбор трав обусловлен их биоаккумуляционной способностью в отношении к ТМ. У всех исследуемых растений ТМ из корней транспортируются в надземные органы с транспирационным током [56, 57]. Распределение ТМ в надземной части изученных растений можно представить в следующих рядах убывания:

- житняк гребенчатый *Agropyron cristatum*: (железо, медь, цинк, свинец) > никель > кадмий;

- овсяница луговая *Festuca pratensis*: цинк > никель > (железо, медь, кадмий, свинец);

- пырей ползучий *Elytrigia repens*: (медь, никель, цинк) > железо > свинец > кадмий;

- мятлик луговой *Poa pratensis*: (свинец, никель, цинк) > кадмий > (железо, медь) [58].

Декоративные растения, такие как бархатцы *French marigold*, *Tagetes* [59, 60], бальзамин *Balsamine* и папоротник нефролепис *Nephrolepis auriculata* [61], также используют с целью фиторемедиационной очистки почв, загрязненных кадмием и медью.

Одной из наиболее распространенных декоративных цветочных культур, используемых для озеленения городов России, является цинерария серебристая *Cineraria Silverdust*. Установлено, что растение наиболее активно накапливает цинк и может быть рекомендовано в качестве фиторемедианта почв, загрязненных данным металлом [62].

Отмечается высокая сорбционная способность таких декоративных травянистых расте-

ний, как агератум Гаустона *Ageratum Houstonianum*, лобулярия приморская *Alyssum maritimum*, космея серно-желтая *Cosmos sulphureus*, лебеда садовая *Atriplex hortense*. Они обладают хорошей приспособляемостью, высоким уровнем накопления биомассы и могут быть рекомендованы к использованию в технологии восстановления почв, загрязненных ТМ [63].

Для решения проблемы избыточных концентраций ТМ в городских почвах может применяться декоративное растение хрустальная травка *Mesembryanthemum crystallinum*. Отметим отдельно, что существует несколько сортов хрустальной травки с различным окрасом венчика, что отвечает требованиям эстетичности [48].

Имеются данные об использовании пиона молочноцветкового *Paeonia lactiflora* как фиторемедианта почв, загрязненных ТМ, в условиях мегаполиса (Москва). Обнаружено, что при выращивании в течение трех лет культура уменьшает загрязнение верхних слоев почв медью и свинцом – на 17 % и 9 %, цинком и кадмием – на 23 % и 21 % соответственно [64].

Также способностью к аккумуляции свинца и меди обладает амарант *Amaranthus* [65].

Среди древесных растений в качестве фиторемедиантов рекомендовано использовать гледичию трехколючковую *Gleditsia triacanthos* и карагану древовидную *Caragana arborescens*. Растения характеризуются высоким уровнем накопления биомассы даже на деградированной, загрязненной ТМ почве, отмечается высокая сорбционная способность [66].

В озеленении крупных городов для снижения содержания цинка в почвах рекомендовано использовать тополь черный *Populus nigra* [67].

В целях фиторемедиации загрязненных ТМ пойменных почв может быть использована естественная пойменная растительность, среди которой наибольшей извлекающей способностью в отношении ТМ обладает ива *Salix*, аккумулирующая в высоких концентрациях цинк и марганец [68].

Разработаны способы фитомелиорации почв, которые подразумевают высев семян одуванчика лекарственного *Taraxacum officinale* в загрязненную почву, выращивание растений до фазы формирования цветоносных

побегов, многократное скашивание и удаление зеленой массы. Также предлагается при начале формирования листьев вносить в почву борную кислоту в дозах от 0,5 до 10,0 кг/га, что позволяет на 20–80 % увеличить вынос токсичных элементов из почвы [69].

Установлена возможность использования топинамбура *Helianthus tuberosus* в качестве растения-фиторемедианта для реабилитации почв, загрязненных Fe, Co, Cr, Mn, V и Sr [70].

Люпин узколистный *Lupinus angustifolius* является перспективным фиторемедиатором для песчаных почв, особенно для территорий с холодным и дождливым летом. Корневая система растения способна растворять и поглощать труднорастворимые фосфаты ТМ благодаря выделению ей анионов органических кислот. Люпин узколистный *Lupinus angustifolius* перспективен для аккумуляции никеля и кадмия [64, 71–74].

Таким образом, выявлено, что растения, произрастающие на загрязненных ТМ почвах, имеют значительный потенциал для применения их в целях фиторемедиации [75].

Заключение. Проведенный анализ литературных данных показал, что в настоящее время существует широкий спектр способов фиторемедиации и значительный перечень растений, используемых для очищения почв, загрязненных ТМ. Преимущества фиторемедиации состоят в возможности производства ремедиации в естественной среде, относительно низкой себестоимости проводимых работ, безопасности метода для окружающей среды, теоретической возможности экстракции ценных веществ (золото, никель, медь и др.) из зеленой массы растений, а также в возможности мониторинга процесса очистки почв. Однако фиторемедиация как метод очистки почв имеет свои недостатки, к которым относится значительная длительность процесса (несколько лет), цитотоксичность промежуточных продуктов для растительных организмов, значительная зависимость процесса от скорости роста растений. Таким образом, для загрязнений, которые приводят к возникновению острых рисков для человека и окружающей среды, фиторемедиация не может быть выбрана методом восстановления. Фито-

ремедиация лучше всего подходит для территорий, где контакт человека с загрязнениями ограничен, или там, где почвы не требуется очистить немедленно. Для фиторемедиации используют разные виды растений, а также способы генной инженерии и др. Однако выбор растений-фито-

ремедиантов в каждом конкретном случае индивидуален и зависит от разных факторов и состава почвы. Стоит отметить необходимость продолжения исследования растений-фиторемедиантов, способных извлекать из почвы и накапливать тяжелые металлы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

Концепция и дизайн исследования: Дьякова Н.А.

Сбор, планирование эксперимента, обработка материала: Мещерякова В.Ю.

Анализ и интерпретация данных: Мещерякова В.Ю., Дьякова Н.А.

Написание и редактирование текста: Дьякова Н.А., Мещерякова В.Ю., Павлова Ю.А.

Литература

1. Давыдова С.Л., Тагасова В.И. Тяжелые металлы как супертоксиканты XXI в. М.: Изд-во РУДН; 2002. 140.
2. Bizilli S.P., Rugh C.L., Meagher R.B. Phytodetoxification of hazardous organomercurials by genetically engineered plants. *Nat. Biotechnol.* 2000; 18: 213–217.
3. Суюндуков Я.Т., Миркин Б.М., Абдуллин Ш.Р., Хасанова Г.Р., Сальманова Э.Ф. Роль фитомелиорации в воспроизводстве плодородия черноземов Зауралья (Башкирия). *Почвоведение.* 2007; 10: 1217–1225.
4. Прасад М.Н. Практическое использование растений для восстановления экосистем, загрязненных металлами. *Физиология растений.* 2003; 50 (5): 768–780.
5. Копчик Г.Н. Проблемы и перспективы фиторемедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы). *Почвоведение.* 2014; 9: 1113.
6. Ушакова Е.С. Способ очистки почв г. Омутнинска, содержащих тяжелые металлы, с помощью растений-гипераккумуляторов. *Современные научные исследования и разработки.* 2018; 3 (12 (29)): 130–131.
7. Ghosh M., Singh S.P. A Review on Phytoremediation of Heavy Metals and Utilization of It's by Products. *Asian Journal of Energy and Environment.* 2005; 6 (4): 214.
8. Tangahu B.V., Abdullah S.R.S., Basri H. A Review on Heavy Metals (As, Pb, and Hg) Uptake by Plants Through Phytoremediation. *International Journal of Chemical Engineering.* 2011; 2011: 939161. DOI: 10.1155/2011/939161.
9. Андреева И.В., Байбеков Р.Ф., Злобина М.В. Фиторемедиация почв, загрязненных тяжелыми металлами. *Мелиорация и рекультивация, экология.* 2009; 5: 5–11.
10. Тутов А.Ф., Таланова В.В., Казнина Н.М. Физиологические основы устойчивости растений к тяжелым металлам: учебное пособие. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН; 2011. 77.
11. Копчик Г.Н. Современные подходы к ремедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы). *Почвоведение.* 2014; 7: 851–868.
12. Saraswat S. Rai J.P.N. Phytoextraction potential of six plant species grown in multi-metal contaminated soil. *Chemistry and Ecology.* 2009; 25 (1): 1–11.
13. Mohamed Saber, Hussein F. Abuouzienna, Essam Hoballah, Fatma AbdElzaher, AzzaTurkey, Alaa Zaghoul. Risk assessment and mitigation measures for certain amendments used in the bioremediation of sewage soils. *Int. J. Chem Tech Res.* 2015; 8 (6): 423–440.
14. Bouwman L.A., Bloem J., Romkens P.F., Boon G.T., Vangronsveld J. Beneficial effects of the growth of metal tolerant grass on biological and chemical parameters in copper- and zinc-contaminated sandy soils. *Minerva Biotechnologica.* 2001; 13: 19–26.
15. McCutcheon S.C., Schnoor J.L. Overview of phytotransformation and control of wastes. *Phytoremediation: transformation and control of contaminants.* New York: John Wiley; 2003: 3–58.
16. Спярова А.А., Задёра М.И. О возможности применения метода фиторемедиации для почв сельскохозяйственного назначения, загрязненных тяжелыми металлами, применительно к почвам октябрьского района. *Молодая наука аграрного Дона: традиции, опыт, инновации.* 2018; 2-2: 102–105.

17. *Srivastava N.* Role of phytochelatin in phytoremediation of heavy metals contaminated soils. *Phytoremediation*. Cham: Springer International Publishing; 2016: 393–419.
18. *Клевецова М.А., Воронин А.А., Лепешкина Л.А., Ли Чжао.* Растения-аккумуляторы тяжелых металлов и возможности их использования в экологической реставрации почв. Современные проблемы интродукции и сохранения биоразнообразия растений: материалы 3-й заочной научно-практической конференции. Воронеж, 2017: 156–159.
19. *Панченко Л.В., Муратова А.Ю., Турковская О.В., Малаховская Л.В.* Естественная и экспериментальная фиторемедиация загрязненной тяжелыми металлами почвы с территории нефтеперерабатывающего завода. Вестник Оренбургского государственного университета. 2009; 10: 585–589.
20. *Leštan D., Luo C., Li X.* The use of chelating agents in the remediation of metalcontaminated soils: A review. *Environ. Pollut.* 2008; 153: 3–13.
21. *Bhargava A., Carmona F.F., Bhargava M., Srivastava S.* Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. *J. Environ. Manag.* 2012; 105: 103–120.
22. *Baker A.* Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals. *J. Plant Nutr.* 1981; 3 (1-4): 643–654.
23. *Галулин Р.В., Башкин В.Н., Галулина Р.Р.* Влияние эффекторов фитоекстракции на ферментную активность почвы, загрязненной тяжелыми металлами. *Агрохимия*. 1998; 7: 77–86.
24. *Атаманова Е.Б.* Роль ЭДТА и лимонной кислоты в фиторемедиации древесными растениями территорий Костромской области, загрязненных медью. Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса: материалы IV Международной научно-практической конференции. Кострома: Костромской государственный университет; 2021: 207–210.
25. *Лукаткин А.С., Пугаев С.В.* Способ подготовки загрязненной тяжелыми металлами почвы для фиторемедиации: патент RU2670253C1.
26. *Ольшанская Л.Н., Халиева А.С., Кузнецова А.А.* Влияние обработки семян в постоянном магнитном поле на процессы роста и развития растений и фиторемедиацию ими почвы от катионов меди и свинца. Вестник Казанского технологического университета. 2013; 16 (13): 154–158.
27. *Prasad M.N.V., Freitas H.M.O.* Metal hyperaccumulation in plants – Biodiversity prospecting for phytoremediation technology. *Electronic J. of Biotechnology*. 2003; 6 (3): 285–321.
28. *Yin-Ming Li, Rufus L. Chaney, Roger D. Reeves, J. Scott Angle, Alan J.M. Baker.* *Thlaspi caerulescens* subspecies for cadmium and zinc recovery: patent US7049492B1.
29. *Rufus L. Chaney, Jay Scott Angle, Alan J.M. Baker, Yin-Ming Li.* Method for phytomining of nickel, cobalt and other metals from soil: patent US5711784.
30. *Yuan Yi Ning, Lu Ming.* Method for treating antimony, arsenic, lead and zinc-polluted soil or water body by using hyperaccumulator *Arthaxon hispidus*: patent CN104174638.
31. *Wang Z., Liu X., Qin H.* Bioconcentration and translocation of heavy metals in the soil-plants system in Machangqing copper mine, Yunnan Province, China. *Journal of Geochemical Exploration*. 2019; 200: 159–166.
32. *Pulford I.D., Watson C.* Phytoremediation of heavy metalcontaminated land by trees – a review. *Environment International*. 2003; 29: 529–540.
33. *Wieshammer G., Unterbrunner R., Bañares García T., Zivkovic M.F., Puschenreiter M., Wenzel W.W.* Phytoextraction of Cd and Zn from agricultural soils by *Salix* ssp. and intercropping of *Salix caprea* and *Arabidopsis halleri*. *Plant and Soil*. 2007; 298: 255–264.
34. *Brunner I., Luster J., Günthardt-Goerg M.S., Frey B.* Heavy metal accumulation and phytostabilisation potential of tree fine roots in a contaminated soil. *Environ. Pollut.* 2008; 152: 559–568.
35. *Колесникова А.А., Качмар А.П., Фрунзе О.В.* Фиторемедиация почв, загрязненных ионами кобальта, марганца и хрома. Донецкие чтения 2019: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: материалы IV Международной научной конференции. Донецк: Донецкий национальный университет; 2019: 347–349.
36. *Bhargava A., Carmona F.F., Bhargava M., Srivastava S.* Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. *J. Environ. Manag.* 2012; 105: 103–120.
37. *Martínez M., Bernal P., Almela C., Vélez D., García-Agustín P., Serrano R., Navarro-Aviñó J.* An engineered plant that accumulates higher levels of heavy metals than *Thlaspi caerulescens*, with yields of 100 times more biomass in mine soils. *Chemosphere*. 2006; 64: 478–485.

38. *Постригань Б.Н., Князев А.В., Кулуев Б.Р., Яхин О.И., Чемерис А.В.* Активность синтетического псевдофитохелатинового гена в растениях табака. Физиология растений. 2012; 59 (2): 303–308.
39. *Alford E.R., PilonSmits E.A.H., Paschke M.W.* Metallophytes – a view from the rhizosphere. Plant Soil. 2010; 337: 33–50.
40. *Hu Jiangqin, Pang Jiliang, Wang Lilin, Xiang Taihe, Zhang Daoxiang.* Cultivating method of transgenic petunia capable of removing environmental pollutants efficiently: patent CN101768603.
41. *Terry Norman, Pilon-Smits Elizabeth, Zhu Yong Liang.* Heavy metal phytoremediation: patent US6576816.
42. *Гладков Е.А., Гладкова О.В.* Экобиоготехнологические подходы для повышения коэффициента биологического поглощения растений в фиторемедиации. Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. 2019; 4 (4): 32–40.
43. *Bhargava A., Carmona F.F., Bhargava M., Srivastava S.* Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. J. Environ. Manag. 2012; 105: 103–120.
44. *Wei S., da Silva J.A.T., Zhou Q.* Agroimproving method of phytoextracting heavy metal contaminated soil. J. Hazard. Materials. 2008; 150: 662–668.
45. *Корж О.П., Савченко И.Г., Гура Н.О.* Фиторемедиацийний спосіб очищення ґрунтів від важких металів: патент UA76416.
46. *Постников Д.А.* Способ очистки почв от тяжелых металлов: патент RU2365078C1.
47. *Кирейчева Л.В., Ильинский А.В., Яшин В.М.* К вопросу фиторемедиации почв, загрязненных комплексом тяжелых металлов. Мелиорация и водное хозяйство. 2016; 4: 8–13.
48. *Волков К.С., Иванова Е.М., Велисар С.Г.* Возможности использования растений различных семейств в целях фиторемедиации загрязненных медью территорий. Проблемы региональной экологии. 2013; 1: 97–101.
49. *Алексеева-Попова Н.В., Дроздова И.В., Калимова И.Б.* Концентрирование тяжелых металлов видами сем. Стусиферае флоры северного Кавказа в связи с проблемой фиторемедиации. Геохимия. 2015; 5: 466–474.
50. *Ольшанская Л.Н., Тарушкина Ю.А., Стоянов А.В., Русских М.Л.* Фиторемедиационные технологии в защите гидросферы: монография. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т.; 2011. 136.
51. *Постников Д.А.* Фитомелиорация и фиторемедиация почв сельскохозяйственного назначения с различной степенью окультуренности и экологической нагрузки: автореф. дис. ... д-ра с.х. наук. Брянск: Издат. центр ФГОУ ВПО МГАУ; 2009.
52. *Хуснидинов Ш.К., Замациков Р.В., Дмитриев Н.Н., Бутырин М.В., Сосницкая Т.Н., Дагуров А.В.* Способ очистки почв, загрязненных мышьяком, кадмием и свинцом, с использованием свербиги восточной: патент RU2020120991.
53. *Тебиева Д.И., Бекзарова С.А., Бекмурзов А.Д., Кебалова Л.А.* Способ фиторемедиации автомобильных дорог: патент RU2020110423.
54. *Смирнов Ю.Д., Кремчев Э.А., Матвеева В.А., Чукаева М.А., Громыка Д.С.* Способ очистки почв от тяжелых металлов: патент RU2019124369.
55. *Озерова Д.В.* Изучение процесса фиторемедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами. Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; 2015: 499–500.
56. *Salt D.E., Prince R.C., Pickering I. J., Raskin I.* Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian Mustard. Plant Physiol. 1995; 109: 1427–1433.
57. *Hart J.J., Welch R.M., Norvell W.A., Sullivan L.A., Kochian L.V.* Characterization of cadmium binding, uptake and translocation in intact seedlings of bread and durum wheat cultivars. Plant Physiol. 1998; 116: 1413–1420.
58. *Ульрих Д.В., Тимофеева С.С.* Фиторемедиация загрязненных почв и техногенных грунтов хвостохранилищ на территории меднорудных предприятий южного Урала. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016; 3: 341–349.
59. *Zhang Xingli, Zhou Qixing, Shi Honglei, Gao Yuanyuan.* Method for restoring Cd-polychlorinated dibenzofurans polluted soil by utilizing French marigold: patent CN103480625.
60. *Lin Maohong, Zhou Qixing, Su Hui, Zhou Ruiren, Gao Yuanyuan.* Method for remediating soil polluted with cadmiumpolychlorinated biphenyl compounds: patent CN103191915.

61. *Jing Yande*. New application of French marigold, Balsamine and *Nephrolepis auriculata* on repairing contaminated soil: patent CN102886377.
62. *Гальченко С.В., Чердакова А.С.* Фиторемедиация городских почв цинерарией серебристой (*Cineraria Silverdust* L.). Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология-2021): материалы XVII Международной научно-технической конференции: в 2 т. Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет; 2021: 49–55.
63. *Высоцкий С.П., Фркнзе О.В.* Технология фиторемедиации загрязненных тяжелыми металлами почв с помощью декоративных травянистых растений. Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2019; 5 (139): 105–112.
64. *Довбан К.И.* Зеленые удобрения в современном земледелии: вопросы теории и практики. Минск: Белорусская наука; 2009. 404.
65. *Гальченко С.В., Мажайский Ю.А., Гусева Т.М., Чердакова А.С.* Фиторемедиация городских почв, загрязненных тяжелыми металлами, декоративными цветочными культурами. Вестник Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина. 2015; 4 (49).
66. *Фрунзе О.В.* Фиторемедиация загрязненных тяжелыми металлами почв с помощью древесных растений. Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: материалы XIX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Киров: Вятский государственный университет; 2021: 332–334.
67. *Анилова Л.В., Сальникова Е.В., Примак О.В., Шарыгина М.В.* Перспективы фиторемедиации почвенного покрова урбанизированных территорий (на примере г. Оренбурга). Вестник Оренбургского государственного университета. 2012; 6 (142): 82–85.
68. *Яшин В.М., Пыленок П.И., Майсснер Р., Рунн Х.* Оценка загрязнения и перспективы фиторемедиации аллювиальных почв Окской поймы. Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, центральной Азии и Сибири: монография: в 5 т. Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова; 2018: 212–217.
69. *Лукаткин А.С., Баишаков Д.И.* Способ биологической очистки почв: патент RU2231944C2.
70. *Абдуллаев С.Ф., Сафаралиев Н.М., Партоев К.* Исследование биологического поглощения тяжелых металлов растением-фиторемедиантом – топинамбуром (*Helianthus tuberosus* L.). Химическая безопасность. 2019; 3 (1): 110–117.
71. *Roemer W., Kang D., Egle K., Gerke J., Keller H.* The acquisition of cadmium by *Lupinus albus* L., *Lupinus angustifolius* L., and *Lolium multiflorum* Lam. *J. of Plant Nutr. and Soil Sci.* 2000; 163: 623–628.
72. *Trejo N., Matus I., Pozo A., Walter I., Hirzel J.* Cadmium phytoextraction capacity of white lupine (*Lupinus albus* L.) and narrow-leafed lupine (*Lupinus angustifolius* L.) in three contrasting agroclimatic conditions of Chile. *Chilean J. Agric. Res.* 2016; 76 (2): 228–235.
73. *Fumagalli P., Comolli R., Ferre Ch., Ghiani A., Gentili R., Citterio S.* The rotation of white lupin (*Lupinus albus* L.) with metal-accumulating plant crops: A strategy to increase the benefits of soil phytoremediation. *Journal of Environmental Management.* 2014; 145: 35–42.
74. *Большева Т.Н., Касатиков В.А., Абакар А.У.* Использование люпина узколистного (*Lupinus Angustifolius* L.) для фиторемедиации почв с полиметаллическим загрязнением. Проблемы агрохимии и экологии. 2016; 4: 51–53.
75. *Куриленко В.В., Осмоловская Н.Г.* Фиторемедиационный способ очистки почв, загрязненных тяжелыми металлами: патент RU2017137084.

Поступила в редакцию 02.03.2024; принята 19.04.2024.

Авторский коллектив

Мещерякова Виктория Юрьевна – ординатор кафедры фармацевтической химии и фармацевтической технологии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет». 394018, Россия, г. Воронеж, Университетская пл., 1; e-mail: Victoria_24mv@icloud.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6648-8024>.

Дьякова Нина Алексеевна – доктор фармацевтических наук, доцент, доцент кафедры фармацевтической химии и фармацевтической технологии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет». 394018, Россия, г. Воронеж, Университетская пл., 1; e-mail: Ninochka_V89@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0766-3881>.

Павлова Юлия Александровна – ассистент кафедры фармацевтической химии и фармацевтической технологии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет». 394018, Россия, г. Воронеж, Университетская пл., 1; e-mail: u.a.selivanova@yandex.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1204-927X>.

Образец цитирования

Мещереякова 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: 139–154. DOI: 10.34014/2227-1848-2024-3-139-154.

PHYTOREMEDIATION PROSPECTS FOR SOILS CONTAMINATED WITH HEAVY METALS

V.Yu. Meshcheryakova, N.A. D'yakova, Yu.A. Pavlova

Voronezh State University, Voronezh, Russia

Phytoremediation is an effective technique of using plants to restore contaminated soils.

The aim of this work is to review promising hyperaccumulators with regard to phytoremediation.

Different types of plants, genetic and cellular engineering and other techniques that contribute to soil purification from heavy metals are used for phytoremediation. The paper presents an overview of hyperaccumulators that are able to accumulate various contaminants in the tissues of aboveground organs. The literature search was carried out in such databases as eLIBRARY and CyberLeninka. Plants for phytoremediation should meet a large set of specific criteria. However, no plant can satisfy all of them. Therefore, choosing the most effective plant is a difficult task. The paper analyzes plants used for phytoremediation on the territory of the Russian Federation. The list of studies included in the review demonstrates the peculiarities of certain heavy metal accumulation by different plants. At the same time, the majority of plants used for phytoremediation (about 75 %) accumulate nickel. Only a small number of plants are able to accumulate other heavy metals, such as copper, zinc, cadmium, and lead. Some publications presented in the review indicate that for effective phytoremediation, it is also necessary to pay attention to the soil composition and other external factors. This remark is really crucial.

Currently, phytoremediation is an understudied unpredictable technique for cleaning up contaminated soils. It has not received widespread use yet, but it is promising.

Key words: phytoremediation, heavy metals, hyperaccumulation, soil cleanup.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Author contributions

Research concept and design: D'yakova N.A.

Data collection and processing, experimental design: Meshcheryakova V.Yu.

Data analysis and interpretation: Meshcheryakova V.Yu., D'yakova N.A.

Text writing and editing: D'yakova N.A., Meshcheryakova V.Yu., Pavlova Yu.A.

References

1. Davydova S.L., Tagasova V.I. *Tyazhelye metally kak supertoksikanty XXI v* [Heavy metals as supertoxicants of the 21st century]. Moscow: Izd-vo RUDN; 2002. 140 (in Russian).
2. Bizilli S.P., Rugh C.L., Meagher R.B. Phytodetoxification of hazardous organomercurials by genetically engineered plants. *Nat. Biotechnol.* 2000; 18: 213–217.
3. Suyundukov Ya.T., Mirkin B.M., Abdullin Sh.R., Khasanova G.R., Sal'manova E.F. Rol' fitomelioratsii v proizvodstve plodorodiy chernozemov Zaural'ya (Bashkiriya) [The role of phytomelioration in reproducing black soil productivity in the Trans-Ural region (Bashkiria)]. *Pochvovedenie.* 2007; 10: 1217–1225 (in Russian).

4. Prasad M.N. Prakticheskoe ispol'zovanie rasteniy dlya vosstanovleniya ekosistem, zagryaznennykh metallami [Practical use of plants for restoration of ecosystems polluted by metals]. *Fiziologiya rasteniy*. 2003; 50 (5): 768–780 (in Russian).
5. Koptsik G.N. Problemy i perspektivy fitoremediatsii pochv, zagryaznennykh tyazhelymi metallami (obzor literatury) [Problems and prospects for phytoremediation of soils contaminated with heavy metals (literature review)]. *Pochvovedenie*. 2014; 9: 1113 (in Russian).
6. Ushakova E.S. Sposob ochistki pochv g. Omutninska, sodержashchikh tyazhelye metally, s pomoshch'yu rasteniy-giperakkumulyatorov [Cleaning soils containing heavy metals using hyperaccumulators, Omutninsk city case-study]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i razrabotki*. 2018; 3 (12 (29)): 130–131 (in Russian).
7. Ghosh M., Singh S.P. A Review on Phytoremediation of Heavy Metals and Utilization of It's by Products. *Asian Journal of Energy and Environment*. 2005; 6 (4): 214.
8. Tangahu B.V., Abdullah S.R.S., Basri H. A Review on Heavy Metals (As, Pb, and Hg) Uptake by Plants Through Phytoremediation. *International Journal of Chemical Engineering*. 2011; 2011: 939161. DOI: 10.1155/2011/939161.
9. Andreeva I.V., Baybekov R.F., Zlobina M.V. Fitoremediatsiya pochv, zagryaznennykh tyazhelymi metallami [Phytoremediation of soils contaminated with heavy metals]. *Melioratsiya i rekul'tivatsiya, ekologiya*. 2009; 5: 5–11 (in Russian).
10. Titov A.F., Talanova V.V., Kaznina N.M. *Fiziologicheskie osnovy ustoychivosti rasteniy k tyazhelym metallam: uchebnoe posobie* [Physiological bases of plant resistance to heavy metals: Textbook]. Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy tsentr RAN; 2011. 77 (in Russian).
11. Koptsik G.N. Sovremennye podkhody k remediatsii pochv, zagryaznennykh tyazhelymi metallami (obzor literatury) [Modern approaches to remediation of soils contaminated with heavy metals (literature review)]. *Pochvovedenie*. 2014; 7: 851–868 (in Russian).
12. Saraswat S. Rai J.P.N. Phytoextraction potential of six plant species grown in multi-metal contaminated soil. *Chemistry and Ecology*. 2009; 25 (1): 1–11.
13. Mohamed Saber, Hussein F. Abuouzienna, Essam Hoballah, Fatma Abdelzaher, AzzaTurkey, Alaa Zaghoul. Risk assessment and mitigation measures for certain amendments used in the bioremediation of sewage soils. *Int. J. Chem Tech Res*. 2015; 8 (6): 423–440.
14. Bouwman L.A., Bloem J., Romkens P.F., Boon G.T., Vangronsveld J. Beneficial effects of the growth of metal tolerant grass on biological and chemical parameters in copper- and zinc-contaminated sandy soils. *Minerva Biotechnologica*. 2001; 13: 19–26.
15. McCutcheon S.C., Schnoor J.L. *Overview of phytotransformation and control of wastes. Phytoremediation: transformation and control of contaminants*. New York: John Wiley; 2003: 3–58.
16. Sklyarova A.A., Zadera M.I. O vozmozhnosti primeneniya metoda fitoremediatsii dlya pochv sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya, zagryaznennykh tyazhelymi metallami, primenitel'no k pochvam oktyabr'skogo rayona [Phytoremediation technique for agricultural soils contaminated with heavy metals in Oktyabr'skiy district]. *Molodaya nauka agrarnogo Dona: traditsii, opyt, innovatsii*. 2018; 2-2: 102–105 (in Russian).
17. Srivastava N. Role of phytochelatin in phytoremediation of heavy metals contaminated soils. *Phytoremediation*. Cham: Springer International Publishing; 2016: 393–419.
18. Klevtsova M.A., Voronin A.A., Lepeshkina L.A., Li Chzhao. Rasteniya-akkumulyatory tyazhelykh metallov i vozmozhnosti ikh ispol'zovaniya v ekologicheskoy restavratsii pochv [Plants-accumulators of heavy metals and their use in ecological restoration of soils]. *Sovremennye problemy introduktsii i sokhraneniya bioraznobraziya rasteniy: materialy 3-y zaachnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern problems of introduction and conservation of plant biodiversity: Proceedings of the 3rd research-to-practice conference]. Voronezh, 2017: 156–159 (in Russian).
19. Panchenko L.V., Muratova A.Yu., Turkovskaya O.V., Malakhovskaya L.V. Estestvennaya i eksperimental'naya fitoremediatsiya zagryaznennoy tyazhelymi metallami pochvy s territorii neftepererabatyvayushchego zavoda [Natural and experimental phytoremediation of soils contaminated with heavy metals from an oil refinery]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2009; 10: 585–589 (in Russian).
20. Leštan D., Luo C., Li X. The use of chelating agents in the remediation of metalcontaminated soils: A review. *Environ. Pollut*. 2008; 153: 3–13.

21. Bhargava A., Carmona F.F., Bhargava M., Srivastava S. Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. *J. Environ. Manag.* 2012; 105: 103–120.
22. Baker A. Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals. *J. Plant Nutr.* 1981; 3 (1-4): 643–654.
23. Galiulin R.V., Bashkin V.N., Galiulina R.R. Vliyanie effektorov fitoekstratsii na fermentnuyu aktivnost' pochvy, zagryaznennoy tyazhelymi metallami [Phytoextraction effectors for enzymatic activity of soils contaminated with heavy metals]. *Agrokimiya.* 1998; 7: 77–86 (in Russian).
24. Atamanova E.B. Rol' EDTA i limonnoy kisloty v fitoremediatsii drevesnymi rasteniyami territoriy Kostromskoy oblasti, zagryaznennykh med'yu [The role of EDTA and citric acid in woody plant phytoremediation of copper-contaminated areas of the Kostroma region]. *Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya lesopromyshlennogo kompleksa: materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Current problems and prospects for the development of the forest industry complex: Proceedings of the 4th International Research-to-Practice Conference]. Kostroma: Kostromskoy gosudarstvennyy universitet; 2021: 207–210 (in Russian).
25. Lukatkin A.S., Pugaev S.V. *Sposob podgotovki zagryaznennoy tyazhelymi metallami pochvy dlya fitoremediatsii: patent RU2670253C1* [Technique for preparing soils contaminated with heavy metals for phytoremediation: Patent RU2670253C1] (in Russian).
26. Ol'shanskaya L.N., Khalieva A.S., Kuznetsova A.A. Vliyanie obrabotki semyan v postoyannom magnitnom pole na protsessy rosta i razvitiya rasteniy i fitoremediatsiyu imi pochvy ot kationov medi i svintsa [Effect of seed treatment in a constant magnetic field on the processes of plant growth and development and phytoremediation of soil from copper and lead cations]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta.* 2013; 16 (13): 154–158 (in Russian).
27. Prasad M.N.V., Freitas H.M.O. Metal hyperaccumulation in plants – Biodiversity prospecting for phytoremediation technology. *Electronic J. of Biotechnology.* 2003; 6 (3): 285–321.
28. Yin-Ming Li, Rufus L. Chaney, Roger D. Reeves, J. Scott Angle, Alan J.M. Baker. *Thlaspi caerulescens subspecies for cadmium and zinc recovery: patent US7049492B1.*
29. Rufus L. Chaney, Jay Scott Angle, Alan J.M. Baker, Yin-Ming Li. *Method for phytomining of nickel, cobalt and other metals from soil: patent US5711784.*
30. Yuan Yi Ning, Lu Ming. *Method for treating antimony, arsenic, lead and zinc-polluted soil or water body by using hyperaccumulator Arthroxon hispidus: patent CN104174638.*
31. Wang Z., Liu X., Qin H. Bioconcentration and translocation of heavy metals in the soil-plants system in Machangqing copper mine, Yunnan Province, China. *Journal of Geochemical Exploration.* 2019; 200: 159–166.
32. Pulford I.D., Watson C. Phytoremediation of heavy metalcontaminated land by trees – a review. *Environment International.* 2003; 29: 529–540.
33. Wieshammer G., Unterbrunner R., Bañares García T., Zivkovic M.F., Puschenreiter M., Wenzel W.W. Phytoextraction of Cd and Zn from agricultural soils by *Salix* ssp. and intercropping of *Salix caprea* and *Arabidopsis halleri*. *Plant and Soil.* 2007; 298: 255–264.
34. Brunner I., Luster J., Günthardt-Goerg M.S., Frey B. Heavy metal accumulation and phytostabilisation potential of tree fine roots in a contaminated soil. *Environ. Pollut.* 2008; 152: 559–568.
35. Kolesnikova A.A., Kachmar A.P., Frunze O.V. Fitoremediatsiya pochv, zagryaznennykh ionami kobal'ta, margantsa i khroma [Phytoremediation of soils contaminated with cobalt, manganese and chromium ions]. *Donetskie chteniya 2019: obrazovanie, nauka, innovatsii, kul'tura i vyzovy sovremennosti: materialy IV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Donetsk Readings 2019: Education, Research, Innovation, Culture and Challenges of Our Time: Proceedings of the 4th International Scientific Conference]. Donetsk: Donetskii natsional'nyy universitet; 2019: 347–349 (in Russian).
36. Bhargava A., Carmona F.F., Bhargava M., Srivastava S. Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. *J. Environ. Manag.* 2012; 105: 103–120.
37. Martínez M., Bernal P., Almela C., Vélez D., García-Agustín P., Serrano R., Navarro-Aviñó J. An engineered plant that accumulates higher levels of heavy metals than *Thlaspi caerulescens*, with yields of 100 times more biomass in mine soils. *Chemosphere.* 2006; 64: 478–485.
38. Postrikan' B.N., Knyazev A.V., Kuluev B.R., Yakhin O.I., Chemeris A.V. Aktivnost' sinteticheskogo psevdofitokhelatinovogo gena v rasteniyakh tabaka [Potency of the synthetic pseudophytochelatin gene in tobacco plants]. *Fiziologiya rasteniy.* 2012; 59 (2): 303–308 (in Russian).

39. Alford É.R., PilonSmits E.A.H., Paschke M.W. Metallophytes – a view from the rhizosphere. *Plant Soil*. 2010; 337: 33–50.
40. Hu Jiangqin, Pang Jiliang, Wang Lilin, Xiang Taihe, Zhang Daoxiang. *Cultivating method of transgenic petunia capable of removing environmental pollutants efficiently: patent CN101768603*.
41. Terry Norman, Pilon-Smits Elizabeth, Zhu Yong Liang. *Heavy metal phytoremediation: patent US6576816*.
42. Gladkov E.A., Gladkova O.V. Ekobiogeotekhnologicheskie podkhody dlya povysheniya koeffitsienta biologicheskogo pogloshcheniya rasteniy v fitoremediatsii. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Ecobiogeotechnological approaches for increasing the biological absorption of plants in phytoremediation]. *Nauki o zemle*. 2019; 4 (4): 32–40 (in Russian).
43. Bhargava A., Carmona F.F., Bhargava M., Srivastava S. Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. *J. Environ. Manag.* 2012; 105: 103–120.
44. Wei S., da Silva J.A.T., Zhou Q. Agroimproving method of phytoextracting heavy metal contaminated soil. *J. Hazard. Materials*. 2008; 150: 662–668.
45. Korzh O.P., Savchenko I.G., Gura N.O. *Fitopemediatsiyinyi cnocib ochishcheniya gruntiv vid vazhkih metaliv: patent UA76416* [Phytoremediation technique for cleaning groundwater from heavy metals: Patent UA76416] (in Ukraine).
46. Postnikov D.A. *Sposob ochistki pochv ot tyazhelykh metallov: patent RU2365078S1* [Techniques for cleaning soils from heavy metals: Patent RU2365078C1] (in Russian).
47. Kireycheva L.V., Il'inskiy A.V., Yashin V.M. K voprosu fitoremediatsii pochv, zagryaznennykh kompleksom tyazhelykh metallov [On the issue of phytoremediation of soils contaminated with heavy metals]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo*. 2016; 4: 8–13 (in Russian).
48. Volkov K.S., Ivanova E.M., Veliksar S.G. Vozmozhnosti ispol'zovaniya rasteniy razlichnykh semeystv v tselyakh fitoremediatsii zagryaznennykh med'yu territoriy [Using plants of different families for phytoremediation of copper-contaminated territories]. *Problemy regional'noy ekologii*. 2013; 1: 97–101 (in Russian).
49. Alekseeva-Popova N.V., Drozdova I.V., Kalimova I.B. Kонтентирование tyazhelykh metallov vidami sem. Cruciferae flory severnogo Kavkaza v svyazi s problemoy fitoremediatsii [Concentration of heavy metals by species of the Cruciferae family in the North Caucasus: Phytoremediation problem]. *Geokhimiya*. 2015; 5: 466–474 (in Russian).
50. Ol'shanskaya L.N., Tarushkina Yu.A., Stoyanov A.V., Russkikh M.L. *Fitoremediatsionnye tekhnologii v zashchite gidrosfery: monografiya* [Phytoremediation technologies for hydrosphere protection: Monograph]. Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t.; 2011. 136 (in Russian).
51. Postnikov D.A. *Fitomelioratsiya i fitoremediatsiya pochv sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya s razlichnoy stepen'yu okul'turennosti i ekologicheskoy nagruzki* [Phytomelioration and phytoremediation of agricultural soils with various cultural state and environmental load]: avtoref. dis. ... d-ra s.kh. nauk. Bryansk: Izdat. tsentr FGOU VPO MGAU; 2009 (in Russian).
52. Khusnidinov Sh.K., Zamashchikov R.V., Dmitriev N.N., Butyrin M.V., Sosnitskaya T.N., Dagurov A.V. *Sposob ochistki pochv, zagryaznennykh mysh'yakom, kadmiem i svintsom, s ispol'zovaniem sverbigi vos-tochnoy: patent RU2020120991* [Method for cleaning soils contaminated with arsenic, cadmium and lead using eastern sverbiga: Patent RU2020120991] (in Russian).
53. Tebieva D.I., Bekuzarova S.A., Bekmurzov A.D., Kebalova L.A. *Sposob fitoremediatsii avtomobil'nykh dorog: patent RU2020110423* [Method for motorway phytoremediation: Patent RU2020110423] (in Russian).
54. Smirnov Yu.D., Kremcheev E.A., Matveeva V.A., Chukaeva M.A., Gromyka D.S. *Sposob ochistki pochv ot tyazhelykh metallov: patent RU2019124369* [Method for cleaning soils from heavy metals: Patent RU2019124369] (in Russian).
55. Ozerova D.V. Izuchenie protsessa fitoremediatsii pochv, zagryaznennykh tyazhelymi metallami [Studying the process of phytoremediation of soils contaminated with heavy metals]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh uchenykh BGTU im. V.G. Shukhova* [International research and technical conference of young scientists, Belgorod State Technical University named after V.G. Shukhov]. Belgorod: Belgorodskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskii universitet im. V.G. Shukhova; 2015: 499–500 (in Russian).

56. Salt D.E., Prince R.C., Pickering I. J., Raskin I. Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian Mustard. *Plant Physiol.* 1995; 109: 1427–1433.
57. Hart J.J., Welch R.M., Norvell W.A., Sullivan L.A., Kochian L.V. Characterization of cadmium binding, uptake and translocation in intact seedlings of bread and durum wheat cultivars. *Plant Physiol.* 1998; 116: 1413–1420.
58. Ul'rikh D.V., Timofeeva S.S. Fitoremediatsiya zagryaznennykh pochv i tekhnogennykh gruntov khvostokhranilishch na territorii mednorudnykh predpriyatiy yuzhnogo Urala [Phytoremediation of contaminated soils and technogenic grounds of tailings dumps on the territory of copper ore enterprises of the Southern Urals]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)*. 2016; 3: 341–349 (in Russian).
59. Zhang Xingli, Zhou Qixing, Shi Honglei, Gao Yuanyuan. *Method for restoring Cd-polychlorinated dibenzofurans polluted soil by utilizing French marigold: patent CN103480625*.
60. Lin Maohong, Zhou Qixing, Su Hui, Zhou Ruiren, Gao Yuanyuan. *Method for remediating soil polluted with cadmiumpolychlorinated biphenyl compounds: patent CN103191915*.
61. Jing Yande. *New application of French marigold, Balsamine and Nephrolepis auriculata on repairing contaminated soil: patent CN102886377*.
62. Gal'chenko S.V., Cherdakova A.S. Fitoremediatsiya gorodskikh pochv tsinerariy serebristoy (Cineraria Silverdust L.) [Phytoremediation of urban soils by Cineraria Silverdust L.]. *Nauka, obrazovanie, proizvodstvo v reshenii ekologicheskikh problem (Ekologiya-2021): materialy XVII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii: v 2 t* [Research, education, and industry in solving environmental problems (Ecology-2021): Proceedings of the 17th International Research and Technical Conference: In 2 volumes]. Ufa: Ufimskiy gosudarstvennyy aviatsionnyy tekhnicheskiy universitet; 2021: 49–55 (in Russian).
63. Vysotskiy S.P., Frknze O.V. Tekhnologiya fitoremediatsii zagryaznennykh tyazhelymi metallami pochv s pomoshch'yu dekorativnykh travyanistykh rasteniy [phytoremediation techniques for soils contaminated with heavy metals using ornamental herbaceous plants]. *Vestnik Donbasskoy natsional'noy akademii stroitel'stva i arkhitektury*. 2019; 5 (139): 105–112 (in Russian).
64. Dovban K.I. *Zelenye udobreniya v sovremennom zemledelii: voprosy teorii i praktiki* [Green fertilizers in modern agriculture: Theoretical and practical issues]. Minsk: Belorusskaya nauka; 2009. 404. (in Russian).
65. Gal'chenko S.V., Mazhayskiy Yu.A., Guseva T.M., Cherdakova A.S. Fitoremediatsiya gorodskikh pochv, zagryaznennykh tyazhelymi metallami, dekorativnymi tsvetochnymi kul'turami [Phytoremediation of urban soils contaminated with heavy metals by ornamental flower crops]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo universiteta imeni S.A. Esenina*. 2015; 4 (49) (in Russian).
66. Frunze O.V. Fitoremediatsiya zagryaznennykh tyazhelymi metallami pochv s pomoshch'yu drevesnykh rasteniy [Phytoremediation of soils contaminated with heavy metals using woody plants]. *Biodiagnostika sostoyaniya prirodnykh i prirodno-tekhnogennykh sistem: materialy XIX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii c mezhdunarodnym uchastiem* [Biodiagnostics of natural and natural-technogenic systems: Proceedings of the 19th All-Russian research and practical conference with international participation]. Kirov: Vyatskiy gosudarstvennyy universitet; 2021: 332–334 (in Russian).
67. Anilova L.V., Sal'nikova E.V., Primak O.V., Sharygina M.V. Perspektivy fitoremediatsii pochvennogo pokrova urbanizirovannykh territoriy (na primere g. Orenburga) [Prospects for phytoremediation of the soil cover in the urbanized territories of the Orenburg city]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2012; 6 (142): 82–85 (in Russian).
68. Yashin V.M., Pylonok P.I., Mayssner R., Rupp Kh. Otsenka zagryazneniya i perspektivy fitoremediatsii allyuvial'nykh pochv Okskoy poymy [Pollution assessment and phytoremediation prospects of alluvial soils of the Oka floodplain]. *Novye metody i rezul'taty issledovaniy landshaftov v Evrope, tsentral'noy Azii i Sibiri* [New methods and results of landscape studies in Europe, Central Asia and Siberia]: monografiya: v 5 t. Moscow: Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut agrokhimii im. D.N. Pryanishnikova; 2018: 212–217 (in Russian).
69. Lukatkin A.S., Bashmakov D.I. *Sposob biologicheskoy ochistki pochv: patent RU2231944C2* [Method for biological purification of soils: Patent RU2231944C2] (in Russian).

70. Abdullaev S.F., Safaraliev N.M., Partoev K. Issledovanie biologicheskogo pogloshcheniya tyazhelykh metallov rasteniyem-fitoremediantom – topinambur (Helianthus tuberosus L.) [Study of biological accumulation of heavy metals by a phytoremediant plant – Jerusalem artichoke (Helianthus tuberosus L.)]. *Khimicheskaya bezopasnost'*. 2019; 3 (1): 110–117 (in Russian).
71. Roemer W., Kang D., Egle K., Gerke J., Keller H. The acquisition of cadmium by *Lupinus albus* L., *Lupinus angustifolius* L., and *Lolium multiflorum* Lam. *J. of Plant Nutr. and Soil Sci.* 2000; 163: 623–628.
72. Trejo N., Matus I., Pozo A., Walter I., Hirzel J. Cadmium phytoextraction capacity of white lupine (*Lupinus albus* L.) and narrow-leaved lupine (*Lupinus angustifolius* L.) in three contrasting agroclimatic conditions of Chile. *Chilean J. Agric. Res.* 2016; 76 (2): 228–235.
73. Fumagalli P., Comolli R., Ferre Ch., Ghiani A., Gentili R., Citterio S. The rotation of white lupine (*Lupinus albus* L.) with metal-accumulating plant crops: A strategy to increase the benefits of soil phytoremediation. *Journal of Environmental Management*. 2014; 145: 35–42.
74. Bolysheva T.N., Kasatkov V.A., Abakar A.U. Ispol'zovanie lyupina uzkolistnogo (*Lupinus Angustifolius* L.) dlya fitoremediatsii pochv s polimetallicheskim zagryazneniem [Use of narrow-leaved lupine (*Lupinus Angustifolius* L.) for phytoremediation of soils with polymetallic contamination]. *Problemy agrokhimii i ekologii*. 2016; 4: 51–53 (in Russian).
75. Kurilenko V.V., Osmolovskaya N.G. *Fitoremediatsionnyy sposob ochistki pochv, zagryaznennykh tyazhelymi metallami: patent RU2017137084* [Phytoremediation method for cleaning soils contaminated with heavy metals: Patent RU2017137084] (in Russian).

Received March 02, 2024; accepted April 19, 2024.

Information about the authors

Meshcheryakova Viktoriya Yur'evna, Medical Resident, Chair of Pharmaceutical Chemistry and Pharmaceutical Technology, Voronezh State University. 394018, Russia, Voronezh, Universitetskaya Sq., 1; e-mail: Victoria_24mv@icloud.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6648-8024>.

D'yakova Nina Alekseevna, Doctor of Sciences (Pharmaceutical Sciences), Associate Professor, Chair of Pharmaceutical Chemistry and Pharmaceutical Technology, Voronezh State University. 394018, Russia, Voronezh, Universitetskaya Sq., 1; e-mail: Ninochka_V89@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0766-3881>.

Pavlova Yuliya Aleksandrovna, Teaching Assistant, Chair of Pharmaceutical Chemistry and Pharmaceutical Technology, Voronezh State University. 394018, Russia, Voronezh, Universitetskaya Sq., 1; e-mail: u.a.selivanova@yandex.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1204-927X>.

For citation

Meshcheryakova V.Yu., D'yakova N.A., Pavlova Yu.A. Perspektivy ispol'zovaniya razlichnykh rasteniy s tsel'yu fitoremediatsii pochv, zagryaznennykh tyazhelymi metallami [Phytoremediation prospects for soils contaminated with heavy metals]. *Ulyanovskiy mediko-biologicheskij zhurnal*. 2024; 3: 139–154. DOI: 10.34014/2227-1848-2024-3-139-154 (in Russian).