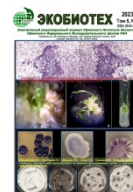




ЭКОБИОТЕХ

ISSN 2618-964X

<http://ecobiotech-journal.ru>



ОБЗОР

БИОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОТ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Искужина М.Г., Кузина Е.В.,
Мухаматдырова С.Р., Коршунова Т.Ю.*

Уфимский Институт биологии Уфимского федерального
исследовательского центра РАН, Уфа, Россия

*E-mail: lab.biotech@yandex.ru

Поступление в окружающую среду различных загрязнителей, связанных с антропогенной деятельностью, отрицательно сказывается на ее состоянии. Тяжелые металлы вносят значительный вклад в ухудшение экологической обстановки, что требует принятия определенных мер по его минимизации. Роль живых объектов (микроорганизмов, растений, грибов, водорослей) в биотрансформации этих ксенобиотиков в нетоксичные формы достаточно хорошо изучена и представляет собой развивающуюся область биотехнологий. Она предлагает эффективные, экономически выгодные и экологически безопасные подходы к очистке почв и водных экосистем, загрязненных металлами. В настоящем обзоре литературы проанализированы фиторемедиационные механизмы, включающие фитоэкстракцию, ризофильтрацию, фитостабилизацию, фитоволатилизацию, фитодegradацию, ризодеградацию и гидравлическое управление, а также различные стратегии бактерий, водорослей, грибов по минимизации вредного воздействия тяжелых металлов, такие как биоаккумуляция, биосорбция, биотрансформация, биоминерализация. Сравняются преимущества использования тех или иных механизмов, их ограничения и перспективы.

Ключевые слова: тяжелые металлы ♦ фиторемедиация ♦ биосорбция ♦ биотрансформация, биоаккумуляция ♦ биоминерализация

BIOLOGICAL METHODS OF ENVIRONMENTAL CLEANING FROM HEAVY METALS

Iskuzhina M.G., Kuzina E.V.,
Mukhamatdyarova S.R., Korshunova T.Yu.*

Ufa Institute of Biology of the Ufa Federal Research Centre
of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia

*E-mail: lab.biotech@yandex.ru

The entry into the environment of various pollutants associated with anthropogenic activities adversely affects its condition. Heavy metals make a significant contribution to the deterioration of the environmental situation, which requires the adoption of certain measures to minimize it. The role of living objects (microorganisms, plants, fungi, algae) in the biotransformation of these xenobiotics into non-toxic forms is well studied and is a developing area of biotechnology. It offers efficient, cost-effective and environmentally friendly approaches to clean up soils and aquatic ecosystems contaminated with metals. This literature review analyzes phytoremediation mechanisms, including phytoextraction, rhizofiltration, phytostabilization, phytovolatilization, phytodegradation, rhizodegradation, and hydraulic control, as well as various strategies of bacteria, algae, fungi, such as bioaccumulation, biosorption, biotransformation, biomineralization. The advantages of using certain mechanisms, their limitations and prospects are compared.

Keywords: heavy metals ♦ phytoremediation ♦ biosorption ♦ biotransformation ♦ bioaccumulation ♦ biomineralization

Поступила в редакцию: 10.08.2023

[Цитировать | Cite as](#)

DOI: [10.31163/2618-964X-2023-6-2-120-138](https://doi.org/10.31163/2618-964X-2023-6-2-120-138)

EDN: [HADIVX](https://www.edn.ru/HADIVX)



ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время загрязнение экосистем тяжелыми металлами (ТМ) входит в число глобальных мировых проблем [Ali et al., 2019; Nameed et al., 2020]. Несмотря на то, что некоторые из них (медь, молибден, марганец, железо и цинк) играют важную роль в клеточном метаболизме [Abdu et al., 2017; Ashraf et al., 2019], их присутствие в различных природных средах (почва, вода, воздух), а также наличие в пищевом сырье

как растительного, так и животного происхождения [Qin et al., 2021] может представлять серьезную опасность для живых объектов, в том числе для человека. Обладая стойкостью, токсичностью и способностью к биоаккумуляции, ТМ вызывают серьезные повреждения различных органов и систем [Ali et al., 2019; Zaynab et al., 2022].

Хотя существуют естественные пути поступления ТМ в окружающую среду, например, вулканические извержения, растворение минералов и пород в почве в результате выпадения кислотных дождей, поступление металлов из минеральных пород при почвообразовательном процессе и выветривании [Титов, и др., 2014; Медведев, Деревягин, 2017], накопление ТМ в основном связано с антропогенной деятельностью. Их источником служат различные предприятия по добыче и переработке полезных ископаемых, транспорт, тепло- и электроэнергетика, сельскохозяйственное производство (использование пестицидов и минеральных удобрений), очистные сооружения городов и многое другое [Сердюкова, 2017; Duan et al., 2016].

Задача очистки экосистем от ТМ диктует необходимость разработки новых и совершенствования уже имеющихся методов их детоксикации, которые условно делят на несколько групп:

1. Механические способы очистки почв от ТМ включают в себя удаление загрязненного слоя, который затем вывозится для складирования в другом месте; ограничение, т.е. механическую изоляцию загрязненного участка путем построения барьера, предотвращающего перемещение поллютанта. Применяется также перекрытие загрязненных почв естественным или искусственно созданным плодородным слоем.

2. К физическим методам детоксикации почвы относятся:

- витрификация или остеклование – нагревание почвы до высоких температур с помощью электрического тока для уменьшения подвижности ТМ путем перевода их в стеклообразное состояние [Thakare et al., 2021]. После обработки грунт содержит стекло и приобретает микрокристаллическую структуру;

- затвердевание – присоединение ТМ к связующим веществам неорганической (глина, цеолит, оксид железа/марганца) или органической (компост и цемент) природы [Thakare et al., 2021];

- сепарация, которая включает вспенивание, флокуляцию, гравитационное разделение, просеивание и т.д. Применяется, как правило при высоких концентрациях ТМ в почве;

- промывание почвы с помощью сурфактантов и других солубилизирующих агентов;

- электроремедиация, которая скорее относится к физико-химическим методам. Она основана на окислительно-восстановительных реакциях, происходящих в грунте при пропускании электрического тока и приводящих к частичному или полному окислению загрязняющих веществ [Абдуллин, 2017; Шулаев и др., 2020];

- пирометаллургический метод высокотемпературной экстракции. Его используют при значительном содержании загрязнителя в почве (до 20%).

3. Химические методы включают:

- стабилизацию поллютантов с помощью сорбентов, реакций комплексообразования и осаждения, в результате чего происходит осадкообразование или связывание их в малоподвижные формы;

- промывка, при которой используются различные химические реагентами (активный кислород и хлор, щелочные растворы) [Guo et al., 2016; Wang et al., 2020].

Применение всех вышеперечисленных методов сопровождается сильным воздействием на окружающую среду, техническими и финансовыми проблемами (например, образованием

вторичных отходов, высокими эксплуатационными затратами, необходимостью экскавации и перевозки загрязненного грунта на дальние расстояния, отчуждением значительных земельных площадей под полигоны хранения, потребностью в высококвалифицированном персонале и пр.) [Копчик, 2014; Zhang et al., 2017].

Особое место в ремедиации почв от ТМ занимает внесение органических веществ (навоз, компосты, твердые вещества биологического происхождения и муниципальные твердые отходы), которые традиционно используются для улучшения физических свойств и плодородия почв [Гукалов, 2020; Lwin et al., 2018]. Делаются попытки решить проблему детоксикации почв, загрязненных ТМ, посредством применения гуминовых веществ [Bahemmat et al., 2016]. Это позволяет повышать подвижность усвояемого фосфора в почве и почвенных растворах, улучшать структуру грунтов, их газопроницаемость, водопроницаемость [Бахов и др., 2018].

4. Биологические методы борьбы с загрязнением ТМ становятся все более популярными в последние годы. Развитие биоремедиационных технологий для восстановления почв началось в 1970-е годы [Zhang et al., 2017]. В их основе лежит способность живых объектов (микроорганизмов, высших растений, грибов и водорослей) метаболизировать многочисленные ксенобиотики, включая ТМ и их соединения. Преимущество биологических методов очистки заключается в том, что они не приводят к существенным изменениям в экосистеме, технологически просты и экономически выгодны [Янин и др., 2014; Dixit et al., 2015; Raklami et al., 2022]. Основное внимание в настоящем обзоре литературы будет уделено именно им.

ФИТОРЕМЕДИАЦИЯ

Биотехнология очистки почвы от ТМ с использованием растений – фиторемедиация, обладает такими достоинствами как низкая стоимость (использование солнечной энергии, отсутствие потребности в дорогостоящем оборудовании или узкоспециализированном персонале), простота во внедрении и обслуживании, экологическая чистота и эстетическая привлекательность для населения [Морозова, 2018; Muthusaravanan et al., 2018].

При извлечении растениями ТМ используются следующие механизмы: фитоэкстракция, ризофльтрация, фитостабилизация, фитоволатилизация, фитодеградация, ризодеградация [Ali et al., 2013; Muthusaravanan et al., 2018; Nedjimi, 2021].

Фитоэкстракция является основным методом фиторемедиации для удаления ТМ и металлоидов из загрязненных почв, донных отложений или воды [Yan et al., 2020]. Для нее используются растения-гипераккумуляторы со значительной способностью к поглощению ТМ вместе с питательными веществами и водой, необходимыми для их роста. При этом поллютанты не разрушаются, а накапливаются в побегах, листьях и других частях растений [Suman et al., 2018]. По окончании фазы роста и транслокации, растения удаляются и перерабатываются с целью получения отдельных металлов, таких как свинец, кадмий, медь, никель, цинк и хром [Mahar et al., 2016]. Продолжительность применения данного механизма от начала до достижения полного восстановления зараженных почв в среднем занимает 10-20 лет [Etim, 2012]. В качестве фитоэкстракторов используют такие виды растений как овес посевной (*Avena sativa* L.) [Ahmed, Hou, 2023], подсолнечник обыкновенный (*Helianthus annuus* L.) [Alaboudi et al., 2018], кукуруза сахарная (*Zea mays* L.), горох посевной (*Pisum sativum* L.) [Shtangeeva et al., 2018], горец птичий (*Polygonum aviculare* L.) [Liu et al., 2018], ячмень обыкновенный (*Hordeum vulgare* L.) [Dahbia et al., 2018],

альпийская ярутка (*Thlaspi caerulescens* J. Presl et C. Presl) и резуха метельчатая (*Arabis paniculate* Franch) и др. [Raklami et al., 2022]. Принадлежащие к семейству *Brassicaceae* виды растений, продемонстрировали значительный потенциал для восстановления и удаления ТМ, таких как свинец, кадмий, цинк и никель. К ним относятся капуста сарептская (*Brassica juncea* L.), капуста огородная (*B. oleracea* L.), капуста полевая (*B. compestris* L.) и рапс (*B. napus* L.) [Ali et al., 2021; Hassan et al., 2022]. Травы часто используют для фитоэкстракции из-за их короткого жизненного цикла, высокой скорости роста и накопления биомассы и значительной устойчивости к абиотическим стрессам [Yan et al., 2020]. Так, с помощью клевера александрийского (*Trifolium alexandrinum* L.) извлекают кадмий, свинец, медь и цинк [Yan et al., 2020]. Осоку применяют для удаления хрома и кадмия [Subhasini, Sswamy, 2014], а очиток (*Sedum alfredii* Hance) – для биоремедиации почвы от цинка, свинца и кадмия [Lu et al., 2013].

Ризофилтрационный механизм, в первую очередь, используется для очистки подземных, поверхностных и сточных вод и болотистых территорий за счет адсорбции, осаждения, концентрации или поглощения ТМ подземной частью растений [Елизарьева и др., 2016], которые выращивают гидропонным методом для формирования мощной корневой системы с последующей акклиматизацией и помещением на загрязненный участок. Когда корни накапливают поллютанты, как и случае фитоэкстракции, растения собирают и перерабатывают для получения металлов. Для очистки воды, водно-болотных угодий обычно используются водные растения родов гиацинт (*Hyacinthus*), азолла (*Azolla*), ряска (*Lemna*) из-за их значительной способности к накоплению ТМ и устойчивости к ним, а также быстрого роста и высокой продуктивности биомассы. Наземные виды, такие как капуста сарептская (*B. juncea* L.) и подсолнечник (*Helianthus annuus* L.), имеют более длинную и разветвленную корневую систему по сравнению с водными растениями и тоже демонстрируют хорошие ризофилтрационные свойства в отношении ТМ [Yan et al., 2020]. Осока висячая (*Carex pendula* Huds.) показала хорошую эффективность при очистке свинецсодержащих сточных вод [Chandwani et al., 2023]. Фасоль обыкновенная (*Phaseolus vulgaris* L.) и подсолнечник однолетний (*Helianthus annuus* L.) были с успехом применены для удаления урана из грунтовых вод [Awa, Nadibarata, 2020]. При ризофилтрации часто используют растения таких родов как рогоз (*Typha*), тростник (*Phragmites*) и сыть (*Cyperus*), которые широко распространены в пресноводных системах [Tshithukhe et al., 2021].

Гидравлическое управление зачастую относят к ризофилтрации. В этом процессе деревья с длинными корнями действуют как насосы и вытягивают большое количество воды из почвы. Таким образом, поллютанты, присутствующие в грунтовых водах, также поглощаются вместе с водой [Etim, 2012]. Деревья с высокой паропроницаемостью, такие как тополь (*Populus*), ива (*Salix*), эвкалипт (*Eucalyptus*) лучше всего подходят для гидравлического управления. Потребление воды этими видами растений ограничивает попадание токсикантов в подземные воды и снижает риск их загрязнения [Muthusaravanan et al., 2018].

Фитостабилизация уменьшает подвижность и иммобилизует ТМ и другие поллютанты в почве, делая их недоступными для поглощения другими организмами. Процесс происходит в корневой зоне растений. Фитостабилизация укрепляет структуру почвы, предотвращает эрозийные процессы и ограничивает миграцию ТМ с ветром, дождем и грунтовыми водами [Muthusaravanan et al., 2018]. Для этих целей успешно зарекомендовали себя бодяг полевой (*Cirsium arvense* (L.) Scop.) [Lorestani et al., 2013], полевица Каstellана (*Agrostis castellana*

Boiss., Reut.) и язвенник обыкновенный (*Anthyllis vulneraria* L.) [Parmar, Singh, 2015; Pastor et al., 2015].

Фитоволатилизация предполагает поглощение растениями загрязняющих веществ, в том числе ТМ из почвы, преобразование их в менее токсичную форму и выведение в атмосферу через стебли и листья [Raklami et al., 2022]. Однако есть случаи фитоволатилизации ТМ и из корневой системы [Limmer, Burken, 2016; Muthusaravanan et al., 2018]. Этот способ часто применяется для удаления селена и ртути, поскольку они обладают высокой летучестью. Например, было показано, что астрагал кистевидный (*Astragalus racemosus* Pursh.) способствует превращению селена в диметилдиселенид посредством процесса фитоволатилизации, а резуховидка Талья (*Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh.) может преобразовывать ртуть до летучих соединений [Awa, Nadibarata, 2020]. Генетически модифицированный табак (*Nicotiana tabacum* L.) способен поглощать ртуть и метилртуть из почвы, переводить их в летучую форму и испарять в атмосферу [Govere, 2021]. Хара седеющая (*Chara canescens* Loisel.) и капуста сарептская (*B. juncea* L.) также осуществляют фитоволатилизацию селена и ртути [Yan et al., 2020].

Фитодеградация подразумевает способность растений извлекать загрязняющие вещества и расщеплять их до более простых, менее токсичных форм. Корни растений содержат ферменты, которые могут метаболизировать отходы производства ТМ, хлорированные соединения, углеводороды и гербициды [Muratova et al., 2015; Raklami et al., 2022]. Далее эти вещества либо депонируются в тканях растений, либо поступают в почву в виде побочных продуктов, которые разлагаются микроорганизмами на менее вредные соединения [Наволокина, Агапов, 2019; Muthusaravanan et al., 2018]. Хорошими фитодеградационными свойствами обладают птерис ленточный (*Pteris vittata* L.), арундо тростниковый (*Arundo donax* L.), канна серо-голубая (*Canna glauca* L.), сыть папирусная (*Cyperus papyrus* L.), рогоз узколистный (*Typha angustifolia* L.) и азолла каролинская (*Azolla caroliniana* Willd.) [Muthusaravanan et al., 2018].

Ризодеградация – разрушение загрязняющих веществ в почве с помощью корневых экссудатов растений и микроорганизмов ризосферной зоны [Янкевич и др., 2015; Muthusaravanan et al., 2018]. Корни обеспечивают поверхности для прикрепления и выделяют экссудаты, содержащие питательные вещества для бактерий и, таким образом, повышают их численность и деструктивную активность в 10–100 раз [Awa, Nadibarata, 2020]. Кроме того, ферменты, синтезируемые растениями, помогают разлагать органические загрязнители (в том числе соединения ТМ) в почве [Muratova et al., 2015; Awa, Nadibarata, 2020]. Более подробно этот раздел будет рассмотрен ниже.

Таким образом, существует несколько способов использования растений для очистки загрязненных территорий от ТМ. Использование того или иного механизма определяется множеством факторов, таких как глубина загрязнения, местность, климатические и почвенные условия и др. [Suman et al., 2018].

Основным недостатком технологий фиторемедиации является ее длительность, на полную очистку загрязненного участка уходят месяцы или годы. Кроме того, климатические условия, физико-химические характеристики почвы и биотические стрессы могут ограничивать рост растений и, следовательно, процесс биоремедиации. Немаловажную роль играет возраст растений, так как молодые и здоровые особи поглощают больше объема ТМ [Raklami et al., 2022]. Кроме того, отсутствие эффективных методов утилизации загрязненной биомассы растений ограничивает применение фиторемедиации

[Shen et al., 2022]. Также очень важно, чтобы зоны фиторемедиации были отгорожены от дикой природы для предотвращения загрязнения пищевой цепи [Liu et al., 2018].

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДОРΟΣЛЕЙ В ДЕТОКСИКАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

В последние десятилетия биотехнологии с использованием водорослей играют важную роль в борьбе с промышленным загрязнением, в том числе ТМ [Саванина и др., 2016; Zeraatkar et al., 2016; Tripathi, Poluri, 2021; Manikandan et al., 2022]. Преимуществом использования водорослей является их неприхотливость и активное размножение. Они, как и некоторые бактерии и грибы, обладают значительной биосорбционной способностью. Поглощение ими ионов ТМ может быть усилено физическими воздействиями (нагревание/кипячение, замораживание, измельчение или сушка биомассы), которые изменяют поверхность клеток водорослей, создавая дополнительные участки связывания [Zeraatkar et al., 2016]. Показано, что морские макроводоросли из отделов *Cyanophyta* и *Chlorophyta* эффективно сорбируют мышьяк и висмут, а представители *Phaeophyta* являются гипераккумуляторами ТМ из-за присутствия значительных количеств альгинатов и сульфатированных полисахаридов внутри клеточных стенок, к которым металлы имеют высокое сродство [Салахов, 2019; Ankit et al., 2022]. Но прикрепленный образ жизни этих водорослей, медленные темпы набора биомассы и рост в открытом море ограничивает их активное использование в биоремедиации водных объектов [Куклин, 2016; Tripathi, Poluri, 2021].

Микроводоросли обладают большей эффективностью восстановления ТМ за счет более простой структуры и малого времени регенерации [Tripathi, Poluri, 2021]. Они могут накапливать металлы до 10% биомассы [Manikandan et al., 2022]. По мнению некоторых авторов [Ankit et al., 2022], виды родов *Chlorella* и *Scenedesmus* являются наиболее подходящими для снижения вредного воздействия этих поллютантов. Удаление ТМ микроводорослями осуществляется непосредственно с помощью двух основных механизмов – биосорбции и биоаккумуляции. За биосорбцию (пассивное накопление) ТМ отвечают такие компоненты клеточной стенки как фукоидан и альгинат [Salam, 2019]. При биоаккумуляции ионы ТМ переносятся через клеточные мембраны с помощью пассивных и активных транспортных систем и накапливаются внутри клеток [Manikandan et al., 2022]. Однако некоторым микроводорослям присущи и другие механизмы детоксикации ТМ. Например, штамм *Spirulina platensis* вырабатывает фермент арсенит-S-аденозилметионинметилтрансферазу, который обладает способностью метилировать мышьяк, делая его нетоксичным [Sahu et al., 2019].

Однако значительным ограничением использования микроводорослей является дальнейшая переработка их биомассы для удаления воды. Для этого существует ряд методов (центрифугирование, фильтрация и др.) [Нагорнов, Мещерякова, 2015]. Они весьма эффективны, но требуют дорогостоящего оборудования. Для решения этой проблемы предложена иммобилизация клеток водорослей, которая может не только упростить процесс разделения, но также позволяет создавать более высокую плотность клеток, улучшить их продуктивность и рециркуляцию биомассы [Ubando et al., 2021]. С помощью закрепленных на носителе микроводорослей возможно удаление соединений золота, железа, цинка, кобальта, марганца, кадмия, свинца, никеля, ртути, меди, урана. Для иммобилизации клеток/биомассы применяют такие методы как флокуляция, адсорбция, ковалентное связывание с носителями, сшивание клеток и их улавливание в полимерной матрице

[Chekroun, Baghour, 2013]. Сообщалось о совместной иммобилизации микроводорослей с бактерией *Azospirillum brasilense*, которая увеличивает рост, содержание пигментов и липидов, а также размер клеток и популяции микроводорослей [Mallick, 2020].

В настоящее время растет интерес к цианобактериям как биоремедиантам. Предложено удалять мышьяк из водной среды с помощью *Synechocystis* sp. [Cassier-Chauvat, Chauvat, 2014], а цианобактерии родов *Oscillatoria*, *Nodularia*, *Nostoc* и *Cyanothece* были признаны подходящими для биосорбции свинца и ртути [Yadav et al., 2020]. Зеленые водоросли также считаются перспективными агентами биоремедиации от ТМ. Так, *Spirogyra* и *Cladophora* активно сорбируют свинец, медь, ртуть из водных растворов. Виды родов *Hydrodictylon*, *Oedogonium* и *Rhizoclonium* накапливают значительные количества ванадия и мышьяка [Mani, Kumar, 2014].

Кроме того, небольшие затраты на крупномасштабное культивирование, высокая поглощающая способность делают водоросли подходящими кандидатами для биологической очистки от ТМ не только природных водоемов, но и производственных сточных вод [Ankit et al., 2022].

РОЛЬ ГРИБОВ В СНИЖЕНИИ ТОКСИЧНОСТИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Использование грибов как абсорбентов биологического происхождения [Amin et al., 2021] является одной из наиболее перспективных альтернатив для борьбы с загрязнением окружающей среды, вызываемым ТМ. Их легко выращивать, они производят большую биомассу и массивную сеть гиф и с ними возможны генетические и морфологические манипуляции [Deshmukh et al., 2016]. Кроме того, грибы устойчивы к ТМ и легко адаптируются к изменениям pH и температуры. Благодаря уникальному химическому составу клетки грибов обладают значительной способностью связывать металлы внутриклеточными белками и осуществлять их хелатирование на клеточных стенках [Refaey et al., 2021]. Межклеточные механизмы включают взаимодействие с соединениями серы, органическими кислотами, пептидами, полифосфатами и их транспорт во внутриклеточные компартменты [Hassan et al., 2013; Prakash, 2017]. Восстановление ТМ грибами происходит с помощью биосорбции, биоаккумуляции и биоволатилизации.

Среди высших грибов для удаления ТМ применяют вешенки (*Pleurotus*), которые легко сорбируют свинец, кадмий и хром [Ayele et al., 2021], а наиболее известными биосорбентами ТМ среди низших грибов являются дрожжи (*Saccharomyces*, *Candida*) и плесневые грибы (*Aspergillus*, *Penicillium*, *Rhizopus*). Например, мицелий штаммов рода *Rhizopus* аккумулирует свинец, кадмий, медь, цинк и уран; виды рода *Aspergillus* используются для удаления кадмия, меди свинца; *Trichoderma atroviride*, *T. narzianum* и *T. virens* поглощают цинк, медь, свинец, кадмий и мышьяк; *Saccharomyces cerevisiae* накапливают уран [Ayele et al., 2021]. Дрожжи участвуют в детоксикации ТМ благодаря наличию у них внеклеточных гликопротеинов, осуществляющих связывание этих поллютантов.

Ремедиацию почвы, загрязненной ТМ, возможно осуществлять с помощью органических метаболитов микромицетов. Так, при инокулировании почвы сапротрофными микромицетами родов *Aspergillus* и *Penicillium* выделение щавелевой и лимонной кислоты этими грибами приводило к иммобилизации металлов [Arwidsson et al., 2010].

Необходимо отметить роль в снижении фитотоксичности ТМ арбускулярных микоризных грибов, которые имеют симбиотические отношения с растением-хозяином и являются важными компонентами механизма ризодеградации [Riaz et al., 2021]. Микориза

способствует фиторемедиации, удерживая ТМ на мицелии грибов (в качестве физического барьера), а также снижает их биодоступность, транслокацию и биоаккумуляцию в тканях растений. К примеру, на корнях табака (*N. tabacum* L.) мицелий микоризных грибов может накапливать в 10-20 раз больше кадмия, чем растения без микоризы [Raklami et al., 2022]. Кроме того, инокуляция микоризными грибами не только снижает токсичность ТМ, но и улучшает параметры роста растений [Hassan et al., 2013]. Так, показано, что у проростков кукурузы (*Z. mays* L.) обработка микоризными грибами ослабляла окислительный стресс, вызванный свинцом. При этом наблюдалось увеличение высоты, биомассы и базального диаметра растений [Aghababaei et al., 2014; Dhalaria et al., 2020]. Известно, что применение изолятов *Rhizophagus irregularis* и *Funneliformis mosseae* усиливало рост и способствовало наращиванию биомассы подсолнечника за счет снижения фитотоксичности кадмия, цинка и меди [Hassan et al., 2013], а грибы *Glomus intraradices* улучшали рост берхея (*Berkheya coddii* Roessler.) за счет извлечения никеля [Wang, 2017].

Несмотря на то, что использование грибов для удаления ТМ имеет ряд преимуществ, они по-прежнему мало применяются в этом направлении. Это связано с тем, что их выращивание требует более высоких затрат, чем культивирование бактерий. Также грибы растут и размножаются медленнее, чем микроорганизмы и, следовательно, биоремедиация с их помощью является более длительным процессом [Refaey et al., 2021].

БИОРЕМЕДИАЦИЯ С ПОМОЩЬЮ БАКТЕРИЙ

Преимуществом использования бактерий в процессах очистки и восстановления окружающей среды от ТМ является их высокая выживаемость в самых разных, даже экстремальных условиях благодаря быстрому размножению, а также способность разлагать широкий спектр токсикантов с помощью специфических ферментных систем [Abo-Alkasem et al., 2023]. Они обладают небольшим размером, за счет которого биомасса микроорганизмов обеспечивает большую площадь поверхности для «улавливания» поллютантов. Стратегии, выработанные бактериями для выживания в среде, загрязненной ТМ, включают такие механизмы, как биосорбция, биоаккумуляция, биоминерализация, биотрансформация и метилирование [Строкова и др., 2019; Seifan, Berenjjan, 2019].

Биосорбция (пассивное поглощение) может осуществляться мертвой биомассой или живыми клетками бактерий путем поверхностного комплексообразования на клеточной стенке и других внешних слоях [Raklami et al., 2022].

Биоаккумуляция (активное поглощение) представляет собой процесс, при котором ионы ТМ проходят через клеточную мембрану в цитоплазму и связываются там с белками или накапливаются в вакуолях. Наиболее важными продуктами жизнедеятельности бактериальных клеток, обладающими способностью к связыванию ионов, являются экзополисахариды, которые, в основном, состоят из сложных высокомолекулярных органических макромолекул. Экзополисахариды защищают бактерии от негативных воздействий окружающей среды, таких как токсичность ТМ, засуха, засоление и т.д. [Ojuederie, Babalola, 2017]. Они обнаружены у бактерий *Pseudomonas putida*, *P. syringae*, *Rhizobium leguminosarum*, *Salipaludibacillus agaradhaerens* [Ашихмина и др., 2018; Verma et al., 2021].

Биоминерализация ионов металлов – образование минералов за счет активности микроорганизмов [Tayang, Songachan, 2021]. Это явление широко распространено и представляет собою важную часть биологических, геологических и химических циклов

[Zhang et al., 2019]. Некоторые бактерии способны осаждать в виде минералов оксиды, сульфаты и фосфаты [Arias et al., 2017], однако отложение карбонатов является более важным для биоминерализации ТМ. Так, микроорганизм *Terrabacter tumescens* образует минеральные карбонаты никеля, меди, свинца, кобальта, цинка, кадмия, кальция за счет продукции фермента уреазы, который гидролизует мочевины. Благодаря этой реакции повышается рН почвы и образуются карбонаты, что приводит к минерализации растворимых ионов ТМ, присутствующих в почвенной среде [Li et al., 2016]. В настоящее время многие исследования сосредоточены на изучении уреолитических бактерий, которые продемонстрировали очень высокие показатели удаления ТМ из окружающей среды [Zhao et al., 2019], например, таких как *Sporosarcina pasteurii*, *Stenotrophomonas rhizophila* и *Variovorax boronicumulans* [Jalilvand et al., 2020].

Биотрансформация – это процесс, в котором в результате взаимодействия бактерий и ТМ происходит образование менее токсичных соединений металлов [Emenike et al., 2018]. Было описано множество бактерий на предмет их способности к биотрансформации металлов, например, виды *Micrococcus* и *Acinetobacter*, переводящие мышьяк в менее растворимые и менее токсичные формы [Pande et al., 2022]. Также следует отметить штаммы рода *Alcaligenes*, трансформирующие элементарную ртуть в ее одновалентные соединения [Tekere, 2020].

Биовыщелачивание – метод, основанный на способности некоторых микроорганизмов превращать ТМ в растворимые и экстрагируемые соединения [Gu et al., 2018]. Бактерии, используемые в этом процессе, могут мобилизовать ТМ в почве посредством автотрофного и гетеротрофного выщелачивания [Işildar et al., 2019; Wang et al., 2020]. Ацидофильные микроорганизмы, участвующие в автотрофном выщелачивании (виды родов *Acidithiobacillus*, *Thiobacillus*) [Roy, Roy, 2015; Pande et al., 2022], окисляют железо (II) и восстанавливают элементарную серу. Конечные продукты этих реакций, трехвалентное железо и серная кислота, снижают рН почвы, что приводит к увеличению растворимости металлов [Roy, Roy, 2015]. Мобилизация металлов посредством гетеротрофного биовыщелачивания достигается за счет образования и выделения органических кислот (щавелевой, глюконовой, малоновой и т.д.), которые повышают растворимость ТМ за счет их хелатирования [Wang et al., 2010]. Кроме того, гетеротрофы, такие как *Pseudomonas aeruginosa*, могут продуцировать биосурфактанты и сидерофоры для связывания и удаления токсичных металлов из загрязненной почвы [Feng et al., 2021].

Метилирование – процесс, при котором загрязняющие вещества, включая ТМ, превращаются в летучие соединения под действием ферментативной активности микроорганизмов [Raklami et al., 2022; Tarfeen et al., 2022]. Значительной способностью переводить ртуть, селен, мышьяк и свинец в газообразную форму обладают бактерии родов *Pseudomonas*, *Escherichia*, *Clostridium*, *Bacillus* [Abo-Alkasem et al., 2023].

Несмотря на явные преимущества (о которых говорилось в начале раздела), широкое применение бактерий для биоремедиации окружающей среды от ТМ имеет ряд ограничений. К примеру, необходимо обеспечить оптимальные условия для жизнедеятельности бактерий, что достигается проведением дополнительных агротехнических мероприятий (внесение удобрений, полив, вспашка и пр.), которые приводят к дополнительным затратам. Следующим недостатком является устойчивость микроорганизмов только к определенным загрязнителям. Многие штаммы, являющиеся перспективными агентами экологической биотехнологии, не могут быть использованы при биоремедиации нарушенных территорий из-за своей патогенности для человека и животных [Tarfeen et al., 2022]. Кроме того,

существует проблема сохранения достаточной численности интродуцированных бактерий в открытой экосистеме. Тем не менее, некоторые из этих недостатков могут быть устранены путем совместного применения микроорганизмов и растений, о чем пойдет речь в следующем разделе.

МИКРОБНО-РАСТИТЕЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ В ОЧИСТКЕ ПОЧВЫ ОТ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Микроорганизмы являются важной составляющей биологической системы, которая обеспечивает минерализацию различных веществ, включая соединения ТМ. Для выполнения этой задачи необходимо их стабильное функционирование в почве [Янкевич и др., 2015], чего можно достигнуть с помощью растений. Последние, как часть естественного биоценоза, способны обеспечить высокую численность почвенных бактерий-деструкторов и их высокую функциональную активность [Wu et al., 2019; Zhao et al., 2019].

Поэтому микробно-растительные комплексы можно использовать в процессах очистки и восстановления загрязненных участков. Благодаря взаимовыгодному сосуществованию такие ассоциации обладают значительной адаптивностью к неблагоприятным условиям окружающей среды [Домрачева и др., 2022; Kuzina et al., 2021; Korshunova et al., 2023]. Корни служат поверхностью для прикрепления бактерий и выделяют экссудаты, способствующие возрастанию плотности микробной популяции в прикорневой зоне, создавая т.н. «ризосферный эффект» [Wu et al., 2019; Zhao et al., 2019; Chetverikov et al., 2021]. Экссудаты (органические кислоты, аминокислоты, углеводы и пр.) играют важную роль в изменении биодоступности металлов, поскольку высвобождение определенных органических соединений не только мобилизует последние путем образования металлокомплексов, но и участвуют в отборе и формировании микробиоты ризосферы [Solís-Ramos et al., 2021]. В настоящее время существует большой научный интерес к изменению качества и количества корневых экссудатов с помощью отбора растений и их генетической модификации для селективной стимуляции колонизации специфическими микроорганизмами (Raklami et al., 2022).

Ризосферные микроорганизмы, в свою очередь, активируют антиоксидантную систему растений [Jamil et al., 2022], которая помогает им пережить неблагоприятные условия среды и способны усиливать их рост путем продукции различных биологически активных веществ (ферментов, фитогормонов, сидерофоров и т.п.), улучшения фосфорного, азотного питания, а также опосредованной стимуляции за счет антагонистической активности по отношению к фитопатогенам [Korshunova et al., 2019; Viesser et al., 2020]. Так, синтез бактериями фитогормона ауксинового ряда приводит к возрастанию поступления растительных экссудатов в ризосферу, в результате чего происходит интенсивное размножение микроорганизмов, которые активно связывают ТМ в хелатные комплексы [Pishchik et al., 2016]. При фиторемедиации почвы, содержащей кадмий, с помощью базилика, обработанного штаммом *Arthrobacter* sp. [Prapadgee, Khonsue, 2015], а также при инокуляции люцерны, растущей на почве, загрязненной смесью ТМ, бактериями *Pseudomonas aeruginosa*, происходило извлечение поллютантов из почвы [Agnello et al., 2016]. Штаммы *Magnaporthe oryzae* и *Burkholderia* sp. снижали биодоступность никеля и кадмия в почве и уменьшали их накопление в корнях и побегах томатов [Mandal et al., 2016]. В исследовании, проведенном с пасленом черным (*Solanum nigrum* L.), инокулированным микромицетом *Mucor circinelloides* и растущем в почвах, загрязненных свинцом, наблюдалась высокая эффективность удаления этого металла [Sun et al., 2017]. Инокуляция люцерны посевной

(*Medicago sativa* L.) бактериальным консорциумом, состоящим из штаммов *Proteus* sp., *Pseudomonas* sp. и *Ensifer meliloti*, усилила прорастание семян, ускорила ростовые процессы у растений и ослабила стресс от ТМ за счет снижения содержания антиоксидантных ферментов и накопления ТМ, что, в конечном счете, сделало более эффективным процесс фитостабилизации [Raklami et al., 2022].

Таким образом, при загрязнении почвы ТМ, растения формируют уникальные условия преимущественно для тех микропартнеров, которые могут снижать фитотоксичность почвы. В создании устойчивой среды необходимым условием является способность бактерий-интродуцентов активно колонизировать корни растений и поддерживать определенную численность популяции. В силу взаимовыгодного сосуществования растительно-микробные системы имеют преимущества для выживания при повышенных концентрациях ТМ. При этом оно обусловлено не только повышением толерантности к ксенобиотикам, но и совместным активным удалением токсиканта из среды обитания [Пищик и др., 2016].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время антропогенное загрязнение тяжелыми металлами считается одной из самых крупных экологических проблем, решением которой заняты ученые многих стран. В этом обзоре были проанализированы основные подходы снижения концентрации этих поллютантов биологическим методом. Показано, что растения, грибы, водоросли и микроорганизмы, выступая в качестве агентов биоремедиации, обладают как достоинствами, так и недостатками, поэтому наибольшая эффективность этого процесса достигается при их комплексном действии. Особенно хорошо зарекомендовали себя в этом отношении ассоциации растений и микроорганизмов, которые способны к взаимовыгодному партнерству в ходе очистки природных объектов от ТМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуллин И.Н. Очистка загрязненных почв от тяжелых металлов // Наука и инновации в современных условиях: сборник статей международной научно-практической конференции. 2017. Ч. 4. С. 16-17.
2. Ашихмина Т.Я., Домрачева Л.И., Кондакова Л.В., Широких И.Г., Широких А.А., Фокина А.И., Зыкова Ю.Н. Микроорганизмы как агенты биомониторинга и биоремедиации загрязненных почв. Киров, Науч. изд-во ВятГУ, 2018. 254 с.
3. Бахов Ж.К. Возможности применения гуматов для детоксикации // Научные труды ЮКГУ им. М. Ауэзова. 2018. № 4 (48). С. 324-328.
4. Гукалов В.В. Комплексообразование, как фактор оптимизации кислотно-основного и окислительно-восстановительного состояния почв // Плодородие. 2020. № 1 (112). С. 37-40. DOI: 10.25680/S19948603.2020.112.11
5. Домрачева Л.И., Скугорева С.Г., Ковина А.Л., Коротких А.И., Стариков П.А., Ашихмина Т.Я. Специфика растительно-микробных комплексов при антропогенном загрязнении почвы (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. С. 14-25. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-3-014-025
6. Елизарьева Е.Н., Янбаев Ю.А., Кулагин А.Ю. Особенности выбора фиторемедиационных технологий очистки почв и сточных вод от ионов тяжелых металлов // Вестник удмуртского университета. Биология. Наука о земле. 2016. Т. 26 (3). С. 7-19.

7. Копчик Г.Н. Современные подходы к ремедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) // Почвоведение. 2014. № 7. С. 851-868.
8. Куклин А.П. Макроводоросли в мониторинге загрязнения водотоков тяжелыми металлами // Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Рациональное природопользование. Современное минералообразование: Труды VI Всероссийского симпозиума с международным участием и XIII Всероссийских чтений памяти академика А.Е. Ферсмана. Забайкальский государственный университет. Чита, 2016. С. 178-188.
9. Медведев И.Ф., Дервягин С.С. Тяжелые металлы в экосистемах / Саратов, изд-во Ракурс, 2017. 178 с.
10. Морозова М.А. Фитомередиация как метод очистки почв // Academy. № 6 (32). 2018. С. 104-106.
11. Наволокина А.С., Агапов А.И. Методы фиторемедиации для преподавания дисциплин естественно-технологического цикла в школе // Актуальные проблемы биологической и химической экологии: Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции. 2019. С. 374-377.
12. Нагорнов С.А., Мещерякова Ю.В. Исследование условий культивирования микроводоросли хлорелла в трубчатом фотобиореакторе // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2015. Т. 21 (4). С. 653-659. DOI: 10.17277/vestnik
13. Пищик В.Н., Воробьев Н.И., Проворов Н.А., Хомяков Ю.В. Механизмы адаптации растений и микроорганизмов в растительно-микробных системах к тяжелым металлам // Микробиология. 2016. Т. 85 (3). С. 231-247.
14. Саванина Я.В., Барский Е.Л., Фомина И.А., Лобакова Е.С. Диализная культура цианобактерий в биомониторинге качества водной среды // Материалы XXV Международной конференции «Новые информационные технологии в медицине, биологии, фармакологии и экологии». 2016. С. 249-261.
15. Салахов Д.О. Способность бурых водорослей *Fucus vesiculosus* к очистке морской среды от тяжелых металлов // Комплексные исследования Мирового океана: Материалы IV Всероссийской научной конференции молодых ученых. Севастополь, 2019. С. 234-235.
16. Сердюкова А.Ф. Последствия загрязнения почвы тяжелыми металлами // Молодой ученый. 2017. № 51 (185). С. 131-135.
17. Строкова В.В., Власов Д.Ю., Франк-Каменецкая О.В. Микробная карбонатная биоминерализация как инструмент природоподобных технологий в строительном материаловедении // Строительные материалы. 2019. № 7. С. 66-72.
18. Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В. Тяжелые металлы и растения / Карельский научный центр РАН, 2014. 194 с.
19. Шулаев Н.С., Пряничникова В.В., Кадырова Р.Р., Овсянникова И.В., Быковский Н.А., Даминева Р.М. Электрохимическая очистка грунтов с различной концентрацией нефтяных загрязнений при использовании единого источника электрического напряжения // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. Т. 10 (6). С. 674-680. DOI: 10.28999/2541-9595-2020-10-6-674-680

20. Янин Е.П. Ремедиация территорий, загрязненных химическими элементами: общие подходы, правовые аспекты, основные способы (зарубежный опыт) // Проблемы окружающей среды и природные ресурсы: обзорная информация. 2014. № 3. С. 3-105.
21. Янкевич М.И., Хадеева В.В., Мурыгина В.П. Биоремедиация почв: вчера, сегодня, завтра // Биосфера. 2015. Т. 7 (2). С. 199-208.
22. Abdu N., Abdullahi A.A., Abdulkadir A. Heavy metals and soil microbes // Environ. Chem. Lett. 2017. V. 15. P. 65-84. [DOI: 10.1007/s10311-016-0587-x](https://doi.org/10.1007/s10311-016-0587-x)
23. Abo-Alkasem M.I., Hassan N.H., Abo Elsouid M.M. Microbial bioremediation as a tool for the removal of heavy metals // Bull. Natl. Res. Cent. 2023. V. 47: 31. [DOI: 10.1186/s42269-023-01006-z](https://doi.org/10.1186/s42269-023-01006-z)
24. Aghababaei F., Raiesi F., Hosseinpour A. The significant contribution of mycorrhizal fungi and earthworms to maize protection and phytoremediation in Cd-polluted soils // Pedobiologia. 2014. V. 57 (4-6.) P. 223-233. [DOI: 10.1186/s42269-023-01006-z](https://doi.org/10.1186/s42269-023-01006-z)
25. Agnello A.C., Bagard M., van Hullebusch E.D., Esposito G., Huguenot D. Comparative bioremediation of heavy metals and petroleum hydrocarbons co-contaminated soil by natural attenuation, phytoremediation, bioaugmentation and bioaugmentation-assisted phytoremediation // Sci. Total Environ. 2016. V. 563. P. 693-703. [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.10.061](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.061)
26. Ahmed I., Hou P. *Avena sativa* under toxic elements / Medicinal plant responses to stressful conditions. Ed. A.A.H.A. Latef. CRC Press, 2023. Chap. 5.
27. Alaboudi K.A., Ahmed B., Brodie G. Phytoremediation of Pb and Cd contaminated soils by using sunflower (*Helianthus annuus*) plant // Ann. Agric. Sci. 2018. V. 63 (1). P. 123-127. [DOI: 10.1016/j.aoad.2018.05.007](https://doi.org/10.1016/j.aoad.2018.05.007)
28. Ali H., Khan E., Ilahi I. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation // J. Chem. 2019. P. 1-14. [DOI: 10.1155/2019/6730305](https://doi.org/10.1155/2019/6730305)
29. Ali H., Khan E., Sajad M.A. Phytoremediation of heavy metals – concepts and applications // Chemosphere. 2013. V. 91 (7). P. 869-881. [DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.01.075](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075)
30. Ali S., Shahid M. J., Hussain A., Rizwan M., Ahmad A., Adrees M. Metals phytoextraction by *Brassica* species / Approaches to the remediation of inorganic pollutants. Springer, Singapore, 2021. P. 361-384. [DOI: 10.1007/978-981-15-6221-1_18](https://doi.org/10.1007/978-981-15-6221-1_18)
31. Amin I., Nazir R., Mushtaq A., Rather J. Nano-bioremediation: an innovative approach for remedying heavy metals using fungi // Bioremediat. Biodegrad. 2021. V. 12: 487.
32. Ankit, Bauddh K., Korstad J. Phycoremediation: Use of algae to sequester heavy metals // Hydrobiology. 2022. V. 1 (3). P. 288-303. [DOI: 10.3390/hydrobiology1030021](https://doi.org/10.3390/hydrobiology1030021)
33. Arias D., Cisternas L.A., Rivas M. Biomineralization mediated by ureolytic bacteria applied to water treatment: A review // Crystals. 2017. V. 7 (11): 345. [DOI: 10.3390/cryst7110345](https://doi.org/10.3390/cryst7110345)
34. Arwidsson Z., Elgh-Dalgren K., von Kronhelm T., Sjöberg R., Allard B., van Hees P. Remediation of heavy metal contaminated soil washing residues with amino polycarboxylic acids // J. Hazard. Mater. 2010. V. 173 (1-3). P. 697-704. [DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.08.141](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.08.141)
35. Ashraf S., Ali Q., Zahir Z.A., Ashraf S., Asghar H.N. Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2019. P. 714-727. [DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.02.068](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.068)

36. Awa S.H., Hadibarata T. Removal of heavy metals in contaminated soil by phytoremediation mechanism: a review // *Water Air Soil Pollut.* 2020. V. 231 (2): 47. DOI: [10.1007/s11270-020-4426-0](https://doi.org/10.1007/s11270-020-4426-0)
37. Ayele A., Haile S., Alemu D., Kamaraj M. Comparative utilization of dead and live fungal biomass for the removal of heavy metal: a concise review // *Sci. World. J.* 2021. DOI: [10.1155/2021/5588111](https://doi.org/10.1155/2021/5588111)
38. Bahemmat M., Farahbakhsh M., Kianirad M. Humic Substances-enhanced electroremediation of heavy metals contaminated soil // *J. Hazard. Mater.* 2016. V. 312. P. 307-318. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2016.03.038](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.03.038)
39. Cassier-Chauvat C., Chauvat F. Responses to oxidative and heavy metal stresses in cyanobacteria: recent advances // *Int. J. Mol. Sci.* 2014. V. 16 (1). P. 871-886. DOI: [10.3390/ijms16010871](https://doi.org/10.3390/ijms16010871)
40. Chandwani S., Kayasth R., Naik H., Amaresan N. Current status and future prospect of managing lead (Pb) stress through microbes for sustainable agriculture // *Environ. Monit. Assess.* 2023. V. 195 (4): 479. DOI: [10.1007/s10661-023-11061-8](https://doi.org/10.1007/s10661-023-11061-8)
41. Chekroun K.B., Baghour M. The role of algae in phytoremediation of heavy metals: a review // *J. Mater. Environ. Sci.* 2013. V. 4 (6). P. 873-880.
42. Chetverikov S., Vysotskaya L., Kuzina E., Arkhipova T., Bakaeva M., Rafikova G., Korshunova T., Chetverikova D., Hkudaygulov G., Kudoyarova G. Effects of association of barley plants with hydrocarbon-degrading bacteria on the content of soluble organic compounds in clean and oil-contaminated sand // *Plants.* 2021. V. 10: 975. DOI: [10.3390/plants10050975](https://doi.org/10.3390/plants10050975)
43. Dabha Z., Benchaban M.M.H., Mohamed A.H. Phytoremediation of contaminated agricultural soil by lead from traffic pollution using a common barley *Hordeum vulgare* // *IJER.* 2013. V. 2 (3). P. 49-57.
44. Deshmukh R., Khardenavis A.A., Purohit H.J. Diverse metabolic capacities of fungi for bioremediation // *Indian J. Microbiol.* 2016. V. 56. P. 247-264. DOI: [10.1007/s12088-016-0584-6](https://doi.org/10.1007/s12088-016-0584-6)
45. Dhalaria R., Kumar D., Kumar H., Nepovimova E., Kuča K., Torequl Islam, M., Verma R. Arbuscular mycorrhizal fungi as potential agents in ameliorating heavy metal stress in plants // *Agronomy.* 2020. V. 10 (6): 815. DOI: [10.3390/agronomy10060815](https://doi.org/10.3390/agronomy10060815)
46. Dixit R., Wasiullah, Malaviya D., Pandiyan K., Singh U.B., Sahu A., Shukla R., Singh B.P., Rai J.P., Sharma P.K., Lade H., Paul D. Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: an overview of principles and criteria of fundamental processes // *Sustainability.* 2015. V. 7 (2). P. 2189-2212. DOI: [10.3390/su7022189](https://doi.org/10.3390/su7022189)
47. Duan Q., Lee J., Liu Y., Chen H., Hu H. Distribution of heavy metal pollution in surface soil samples in China: a graphical review // *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 2016. V. 97. P. 303-309. DOI: [10.1007/s00128-016-1857-9](https://doi.org/10.1007/s00128-016-1857-9)
48. Emenike C.U., Jayanthi B., Agamuthu P., Fauziah S.H. Biotransformation and removal of heavy metals: a review of phytoremediation and microbial remediation assessment on contaminated soil. // *Environ. Rev.* 2018. V. 26 (2). P. 156-168. DOI: [10.1139/er-2017-0045](https://doi.org/10.1139/er-2017-0045)
49. Etim E.E. Phytoremediation and its mechanisms: a review // *Int. J. Environ. Bioenergy.* 2012. V. 2 (3). P. 120-136.
50. Feng L., Jiang X., Huang Y., Wen D., Fu T., Fu R. Petroleum hydrocarbon-contaminated soil bioremediation assisted by isolated bacterial consortium and sophorolipid // *Environ. Pollut.* 2021. V. 273: 116476. DOI: [10.1016/j.envpol.2021.116476](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116476)

51. Govere E.M. Environmental phytoremediation and analytical technologies for heavy metal removal and assessment / Plant biotechnol.: experience and future prospects. Springer, 2021. P. 203-213. [DOI: 10.1155/2019/6730305](https://doi.org/10.1155/2019/6730305)
52. Gu T., Rastegar S.O., Mousavi S.M., Li M., Zhou M. Advances in bioleaching for recovery of metals and bioremediation of fuel ash and sewage sludge // Bioresour. Technol. 2018. V. 261. P. 428-440. [DOI: 10.1016/j.biortech.2018.04.033](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.033)
53. Guo X., Wei Z., Wu Q., Li C., Qian T., Zheng W. Effect of soil washing with only chelators or combining with ferric chloride on soil heavy metal removal and phytoavailability: field experiments // Chemosphere. 2016. V. 147. P. 412-419. [DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.12.087](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.12.087)
54. Hameed M., Dijoo Z.K., Bhat R.A., Qayoom I. Concerns and threats of heavy metals' contamination on aquatic ecosystem / Bioremediation and Biotechnology. Techniques for Noxious Substances Remediation. Eds. R. A. Bhat, K. R. Hakeem. Springer, 2020. Chap. 4. P. 1-19. [DOI: 10.1007/978-3-030-48690-7_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-48690-7_1)
55. Hassan S.S., Bhat S.A., Kumar V., Ganai B.A., Ameen F. Phytoremediation of Heavy Metals: An Indispensable Contrivance in Green Remediation Technology// Plants. 2022. V. 11: 1255. [DOI: 10.3390/plants11091255](https://doi.org/10.3390/plants11091255)
56. Hassan S.E., Hijri M, St-Arnaud M. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on trace metal uptake by sunflower plants grown on cadmium contaminated soil // Nano Biotechnol. 2013. V. 30 (6). P. 780-793. [DOI: 10.1016/j.nbt.2013.07.002](https://doi.org/10.1016/j.nbt.2013.07.002)
57. İşildar A., Van Hullebusch E.D., Lenz M., Du Laing G., Marra A., Cesaro A., Kuchta K. Biotechnological strategies for the recovery of valuable and critical raw materials from waste electrical and electronic equipment (WEEE) a review // J. Hazard. Mater. 2019. V. 362. P. 467-481. [DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.08.050](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.08.050)
58. Jalilvand N., Akhgar A., Alikhani H.A. Removal of heavy metals zinc, lead, and cadmium by biomineralization of urease-producing bacteria isolated from iranian mine calcareous soils // J. Soil. Sci. Plant. Nutr. 2020. P. 206-219. [DOI: 10.1007/s42729-019-00121-z](https://doi.org/10.1007/s42729-019-00121-z)
59. Jamil F., Mukhtar H., Fouillaud M., Dufossé L. Rhizosphere signaling: insights into plant–rhizomicrobiome interactions for sustainable agronomy // Microorganisms. 2022. V. 10: 899. [DOI: 10.3390/microorganisms10050899](https://doi.org/10.3390/microorganisms10050899)
60. Korshunova T., Kuzina E., Mukhamatdyarova S., Sharipova Y., Iskuzhina M. Promising strains of hydrocarbon-oxidizing pseudomonads with herbicide resistance and plant growth-stimulating properties for bioremediation of oil-contaminated agricultural soils // Agriculture. 2023. V. 13 (6): 1111. [DOI: 10.3390/agriculture13061111](https://doi.org/10.3390/agriculture13061111)
61. Korshunova T.Yu., Chetverikov S.P., Bakaeva M.D., Kuzina E.V., Rafikova G.F., Chetverikova D.V., Loginov O.N. Microorganisms in the elimination of oil pollution consequences (review) // Appl. Biochem. Microbiol. 2019. V. 55 (4). P. 344-354.
62. Kuzina E., Rafikova G., Vysotskaya L., Arkhipova T., Bakaeva M., Chetverikova D., Kudoyarova G., Korshunova T., Chetverikov S. Influence of hydrocarbon-oxidizing bacteria on the growth, biochemical characteristics, and hormonal status of barley plants and the content of petroleum hydrocarbons in the soil // Plants. 2021. V. 10 (8): 1745. [DOI: 10.3390/plants10081745](https://doi.org/10.3390/plants10081745)
63. Li M., Cheng X., Guo H., Yang Z. Biomineralization of carbonate by *Terrabacter tumescens* for heavy metal removal and biogrouting applications // J. Environ. Eng. 2016. V. 142 (9): 4015005. [DOI: 10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000970](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000970)

64. Limmer M., Burken J. Phytovolatilization of organic contaminants. // Environ. Sci. Technol. 2016. V. 50 (13). P. 6632-6643. DOI: [10.1021/acs.est.5b04113](https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04113)
65. Liu Y., Yang Y., Li C., Ni X., Ma W., Wei, H. Assessing soil metal levels in an industrial environment of northwestern china and the phytoremediation potential of its native plants // Sustainability. 2018. V. 10 (8): 2686. DOI: [10.3390/su10082686](https://doi.org/10.3390/su10082686)
66. Lorestani B., Yousefi N., Cheraghi M., Farmany A. Phytoextraction and phytostabilization potential of plants grown in the vicinity of heavy metal-contaminated soils: a case study at an industrial town site // Environ. Monit. Assess. 2013. V. 185. P. 10217-10223. DOI: [10.1007/s10661-013-3326-9](https://doi.org/10.1007/s10661-013-3326-9)
67. Lu L., Tian S., Zhang J., Yang X., Labavitch J.M., Webb S.M., Latimer M., Brown P.H. Efficient xylem transport and phloem remobilization of Zn in the hyperaccumulator plant species *Sedum alfredii* // New Phytol. 2013. V. 198 (3). P. 721-731. DOI: [10.1111/nph.12168](https://doi.org/10.1111/nph.12168)
68. Lwin C.S., Seo B.H., Kim H.U., Owens G., Kim K.R. Application of soil amendments to contaminated soils for heavy metal immobilization and improved soil quality – a critical review // J. Soil. Sci. Plant. Nutr. 2018. V. 64 (2). P. 156-167. DOI: [10.1080/00380768.2018.1440938](https://doi.org/10.1080/00380768.2018.1440938)
69. Mahar P., Wang A., Ali M.K., Awasthi A.H., Lahori Q., Wang, R., Li Z. Zhang Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: a review // Ecotoxicol. Environ. Saf 2016. V. 126. P. 111-121. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2015.12.023](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.12.023)
70. Mallick N. Immobilization of microalgae / Immobilization of Enzymes and Cells. Eds. J.M. Guisan, J.M. Bolivar, F. López-Gallego, J. Rocha-Martín. Humana, New York, NY, 2020. P. 453-471. DOI: [10.1007/978-1-0716-0215-7_31](https://doi.org/10.1007/978-1-0716-0215-7_31)
71. Mandal A., Thakur J.K., Sahu A., Bhattacharjya S., Manna M.C., Patra A.K. Plant-microbe interaction: an approach to sustainable agriculture / Plant-microbe interaction: an approach to sustainable agriculture. Eds. D. Varma, A. Tuteja. Springer, Singapore, 2016. P. 227-247. DOI: [10.1007/978-981-10-2854-0_11](https://doi.org/10.1007/978-981-10-2854-0_11)
72. Mani D., Kumar C. Biotechnological advances in bioremediation of heavy metals contaminated ecosystems: an overview with special reference to phytoremediation // Int. J. Environ. Sci. Technol. V. 11. 2014. P. 843-872. DOI: [10.1007/s13762-013-0299-8](https://doi.org/10.1007/s13762-013-0299-8)
73. Manikandan A., Suresh Babu P., Shyamalagowri S., Kamaraj M., Muthukumar P., Aravind, J. Emerging role of microalgae in heavy metal bioremediation // J. Basic. Microbiol. 2022. V. 62 (3-4). P. 330-347. DOI: [10.1002/jobm.202100363](https://doi.org/10.1002/jobm.202100363)
74. Muratova A., Dubrovskaya E., Golubev S., Grinev V., Chernyshova M., Turkovskaya O. The coupling of the plant and microbial catabolisms of phenanthrene in the rhizosphere of *Medicago sativa* // J. Plant. Physiol. 2015. V. 188. P. 1-8 DOI: [10.1016/j.jplph.2015.07.014](https://doi.org/10.1016/j.jplph.2015.07.014)
75. Muthusaravanan S., Sivarajasekar N., Vivek J.S., Paramasivan T., Naushad M., Prakashmaran J., Gayathri V., Omar K., Al-Duaij. Phytoremediation of heavy metals: mechanisms, methods and enhancements // Environ. Chem. Lett. 2018. V. 16. P. 1339-1359. DOI: [10.1007/s10311-018-0762-3](https://doi.org/10.1007/s10311-018-0762-3)
76. Nedjimi B. Phytoremediation: a sustainable environmental technology for heavy metals decontamination // SN Appl. Sci. 2021. V. 3 (3): 286. DOI: [10.1007/s42452-021-04301-4](https://doi.org/10.1007/s42452-021-04301-4)
77. Ojuederie O.B., Babalola O.O. Microbial and plant-assisted bioremediation of heavy metal polluted environments: a review // Int. J. Environ. Res. Public. Health. 2017. V. 14 (12): 1504. DOI: [10.3390/ijerph14121504](https://doi.org/10.3390/ijerph14121504)

78. Pande V., Pandey S.C., Sati D., Bhatt P., Samant M. Microbial interventions in bioremediation of heavy metal contaminants in agroecosystem. // Front. Microbiol. 2022. V. 13: 824084 DOI: [10.3389/fmicb.2022.824084](https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.824084)
79. Parmar S., Singh V. Phytoremediation approaches for heavy metal pollution: a review // J. Plant. Sci. Res. 2015. V. 2 (2): 135.
80. Pastor J., GutiÉrrez-ginÉs M.J., HernÁndez A.J. Heavy-metal phytostabilizing potential of *Agrostis castellana* Boiss. Reuter // Int. J. Phytoremed. 2015. V. 17 (10). P. 988-998. DOI: [10.1080/15226514.2014.1003786](https://doi.org/10.1080/15226514.2014.1003786)
81. Pishchik V.N., Vorobyov N.I., Provorov N.A., Khomyakov Yu.V. Mechanisms of adaptation of plants and microorganisms in plant-microbial systems to heavy metals // Mikrobiologiya. 2016. V. 85 (3). P. 231-247.
82. Prakash V. Mycoremediation of environmental pollutants // Int. J. Chem. Tech. Res. 2017. V. 10 (3). P. 149-155.
83. Prapadgee B., Khonsue N. Bacterial-assisted cadmium phytoremediation by *Ocimum gratissimum* L. in polluted agricultural soil: a field trial experiment // Int. J. Env. Sci. Tech. 2015. V. 12. P. 3843-3852. DOI: [10.1007/s13762-015-0816-z](https://doi.org/10.1007/s13762-015-0816-z)
84. Qin G., Niu Z., Yu J., Li Z., Ma J., Xiang P. Soil heavy metal pollution and food safety in China: Effects, sources and removing technology // Chemosphere. 2021.V. 267. P. 129-205. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2020.129205](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129205)
85. Raklami A, Meddich A, Oufdou K, Baslam M. Plants – microorganisms-based bioremediation for heavy metal cleanup: recent developments, phytoremediation techniques, regulation mechanisms and molecular responses // Int. J. Mol. Sci. 2022. V. 23(9): 5031. DOI: [10.3390/ijms23095031](https://doi.org/10.3390/ijms23095031)
86. Refaey M., Abdel-Azeem A.M., Abo Nahas H.H., Abdel-Azeem M.A., El-Saharty A.A. Role of fungi in bioremediation of soil contaminated with heavy metals / Industrially important fungi for sustainable development / Eds. A.M. Abdel-Azeem, A.N. Yadav, N. Yadav, Z. Usmani. Springer, 2021. P. 509-540. DOI: [10.1007/978-3-030-67561-5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-67561-5)
87. Riaz M., Kamran M., Fang Y., Wang Q., Cao H., Arbuscular mycorrhizal fungi-induced mitigation of heavy metal phytotoxicity in metal contaminated soils: A critical review // J. Hazard. Mater. 2021. V. 402: 123919. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2020.123919](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123919)
88. Roy S., Roy M. Bioleaching of heavy metals by sulfur oxidizing bacteria: a review // Int. Res. J. Environ. Sci. 2015. V. 4. P. 75-79.
89. Sahu A., Pattanayak A., Sahoo R.K., Gaur M., Sahoo K., Subudhi E. Arsenite S-adenosylmethionine producing *Spirulina platensis*: A new trump card on the face of global arsenic poisoning / The role of microalgae in wastewater treatment. Springer Nature Singapore, 2019. P. 29-55.
90. Salam K.A. Towards sustainable development of microalgal biosorption for treating effluents containing heavy metals // BRJ. V. 6 (2). 2019. P. 948. DOI: [https://doi.org.10.18331/BRJ2019.6.2.2](https://doi.org/10.18331/BRJ2019.6.2.2)
91. Seifan M., Berenjian A. Microbially induced calcium carbonate precipitation: a widespread phenomenon in the biological world // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2019. V. 103 (12). P. 4693-4708. DOI: [10.1007/s00253-019-09861-5](https://doi.org/10.1007/s00253-019-09861-5)
92. Shen X, Dai M, Yang J, Sun L, Tan X, Peng C, Ali I, Naz I. A critical review on the phytoremediation of heavy metals from environment: Performance and challenges // Chemosphere. 2022. V. 291. P.132979. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2021.132979](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132979)

93. Shtangeeva I., Perämäki P., Niemelä M., Kurashov E., Krylova Y. Potential of wheat (*Triticum aestivum* L.) and pea (*Pisum sativum*) for remediation of soils contaminated with bromides and PAH // *Int. J. Phytoremediation*. 2018. V. 20 (6). P. 560-566. DOI: [10.1080/15226514.2017.1405375](https://doi.org/10.1080/15226514.2017.1405375)
94. Solís-Ramos L.Y., Coto-López C., Andrade-Torres A. Role of arbuscular mycorrhizal symbiosis in remediation of anthropogenic soil pollution // *Symbiosis*. 2021. V. 84 (3). P. 321-336. DOI: [10.1007/s13199-021-00774-4](https://doi.org/10.1007/s13199-021-00774-4)
95. Subhashini V., Sswamy V.S. "Pythoremediation of Cadmium and Chromium Contaminated Soils by *Cyperus Rotundus*" // *L. J. AURSTEM*. 2014. V 6 (1). P. 97-101.
96. Suman J., Uhlik O., Viktorova J., Macek T. Phytoextraction of heavy metals: a promising tool for clean-up of polluted environment? // *Front. Plant Sci*. 2018. V. 9. P. 1476. DOI: [10.3389/fpls.2018.01476](https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01476)
97. Sun L., Cao X., Li M., Zhang X., Li X., Cui Z. Enhanced bioremediation of lead-contaminated soil by *Solanum nigrum* L. with *Mucor circinelloides* // *Environ. Sci. Pollut. Res*. 2017. V. 24. P. 9681-9689. DOI: [10.1007/s11356-017-8637-x](https://doi.org/10.1007/s11356-017-8637-x)
98. Tarfeen N., Nisa K.U., Hamid B., Bashir Z., Yatoo A.M., Dar M.A., Sayyed R.Z. Microbial remediation: A promising tool for reclamation of contaminated sites with special emphasis on heavy metal and pesticide pollution: A review // *Processes*. 2022. V. 10 (7). P. 1358. DOI: [10.3390/pr10071358](https://doi.org/10.3390/pr10071358)
99. Tayang A., Songachan, L.S. Microbial bioremediation of heavy metals // *Curr. Sci*. 2021. V. 120 (6). P. 1013-1025.
100. Tekere M. Biological strategies for heavy metal remediation / *Methods for bioremediation of water and wastewater pollution* // Eds. M.I. Ahamed, E. Lichtfouse, A.M. Asiri. Environmental chemistry for a sustainable world. Cham, 2020. P. 393-413. DOI: [10.1007/978-3-030-48985-4_18](https://doi.org/10.1007/978-3-030-48985-4_18)
101. Thakare M., Sarma H., Datar S., Roy A., Pawar P., Gupta K., Prasad R. Understanding the holistic approach to plant-microbe remediation technologies for removing heavy metals and radionuclides from soil // *CRBIOT*. 2021. V. 3. P. 84-98. DOI: [10.1016/j.crbiot.2021.02.004](https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2021.02.004)
102. Tripathi S., Poluri K.M. Heavy metal detoxification mechanisms by microalgae: Insights from transcriptomics analysis // *Environ. Pollut*. 2021. V. 285. P. 117-143. DOI: [10.1016/j.envpol.2021.117443](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117443)
103. Tshithukhe G., Motitsoe S.N., Hill M.P. Heavy metals assimilation by native and non-native aquatic macrophyte species: a case study of a river in the Eastern Cape province of South Africa // *Plants*. 2021. V. 10 (12): 2676. DOI: [10.3390/plants10122676](https://doi.org/10.3390/plants10122676)
104. Ubando A.T., Africa A.D.M., Maniquiz-Redillas M.C., Culaba A.B., Chen W.H., Chang J.S. Microalgal biosorption of heavy metals: a comprehensive bibliometric review // *J. Hazard. Mater*. 2021. V. 402. P. 123–431. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2020.123431](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123431)
105. Verma S., Bhatt P., Verma A., Mudila H., Prasher P., Rene E. R. Microbial technologies for heavy metal remediation: effect of process conditions and current practices // *Clean. Technol. Environ. Polic*. 2021. V. 25. P. 1485–1507. DOI: [10.1007/s10098-021-02029-8](https://doi.org/10.1007/s10098-021-02029-8)
106. Viesser J.A., Sugai-Guerios M.H., Malucelli L.C., Pincerati M.R., Karp S.G., Maranhão L.T. Petroleum-tolerant rhizospheric bacteria: isolation, characterization and bioremediation potential // *Sci. Rep*. 2020. V. 10: 2060. DOI: [10.1038/s41598-020-59029-9](https://doi.org/10.1038/s41598-020-59029-9)
107. Wang F. Arbuscular mycorrhizas and ecosystem restoration / *Arbuscular mycorrhizas and stress tolerance of plants* // Ed Q.S. Wu. Springer, Singapore, 2017. P. 245-292. DOI: [10.1007/978-981-10-4115-0_11](https://doi.org/10.1007/978-981-10-4115-0_11)

108. Wang S., Zheng G., Zhou L. Heterotrophic microorganism *Rhodotorula mucilaginosa* R30 improves tannery sludge bioleaching through elevating dissolved CO₂ and extracellular polymeric substances levels in bioleach solution as well as scavenging toxic DOM to *Acidithiobacillus* species // *Water. Res.* 2010. V. 44. P. 5423-5431. DOI: [10.1016/j.watres.2010.06.055](https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.06.055)
109. Wang X., Ma L., Wu J., Xiao Y., Tao J., Liu X. Effective bioleaching of low-grade copper ores: insights from microbial cross experiments. // *Bioresour. Technol.* 2020. V. 308: 123273. DOI: [10.1016/j.biortech.2020.123273](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123273)
110. Wang Z., Wang H., Wang H., Li Q., Li Y. Effect of soil washing on heavy metal removal and soil quality: A two-sided coin // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2020. V. 203. P. 110-981. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2020.110981](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110981)
111. Wu L., Ning D., Zhang B., Li Y., Zhang P., Shan X., Zhou J. Global diversity and biogeography of bacterial communities in wastewater treatment plants // *Nat. Microbiol.* 2019. V. 4 (7). P. 1183-1195. DOI: [10.1038/s41564-019-0426-5](https://doi.org/10.1038/s41564-019-0426-5)
112. Yadav A.P., Dwivedi S., Kumar V., Kushwaha S, Goswami A.L., Reddy B.S. Cyanobacterial extracellular polymeric substances for heavy metal removal: a mini review // *J. Compos. Sci.* 2021. V. 5 (1): 1. DOI: [10.3390/jcs5010001](https://doi.org/10.3390/jcs5010001)
113. Yan A., Wang Y., Tan S.N., Mohd Yusof M.L., Ghosh S., Chen Z., Phytoremediation: a promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land // *Front. Plant. Sci.* 2020. V. 11: 359. DOI: [10.3390/jcs5010001](https://doi.org/10.3390/jcs5010001)
114. Zaynab M., Al-Yahyai R., Ameen A., Sharif Y., Ali L., Fatima M., Li S. Health and environmental effects of heavy metals // *J. King. Saud. Univ. Sci.* 2022. V. 34 (1): 101653. DOI: [10.1016/j.jksus.2021.101653](https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101653)
115. Zeraatkar A.K., Ahmadzadeh H., Talebi A.F., Moheimani N.R., McHenry M.P., Potential use of algae for heavy metal bioremediation, a critical review // *J. Environ. Manag.* 2016. P. 817-831. DOI: [10.1016/j.jenvman.2016.06.059](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.059)
116. Zhang K., Xue Y., Xu H., Yao Y. Lead removal by phosphate solubilizing bacteria isolated from soil through biomineralization // *Chemosphere.* 2019. V. 224. P. 272-279. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2019.02.140](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.140)
117. Zhang S., Gedalanga P.B., Mahendra S. Advances in bioremediation of 1,4-dioxane contaminated waters // *J. Environ. Manag.* 2017. V. 204 (2). P. 765-774. DOI: [10.1016/j.jenvman.2017.05.033](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.033)
118. Zhao F.Z., Bai L., Wang J.Y., Deng J., Ren C.J., Han X.H., Wang, J. Change in soil bacterial community during secondary succession depend on plant and soil characteristics // *Catena.* 2019. V. 173. P. 246-252. DOI: [10.1016/j.catena.2018.10.024](https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.024)
119. Zhao X., Wang M., Wang H., Tang D., Huang J., Sun Y. Study on the remediation of Cd pollution by the biomineralization of urease-producing bacteria. // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2019. V. 16 (2): 268. DOI: [10.3390/ijerph16020268](https://doi.org/10.3390/ijerph16020268)

Цитировать как

Искужина М.Г., Кузина Е.В., Мухаматдырова С.Р., Коршунова Т.Ю. Биологические методы очистки окружающей среды от тяжелых металлов // *Экобиотех*, 2023, Т. 6 № 2. С. 120-138. DOI: [10.31163/2618-964X-2023-6-2-120-138](https://doi.org/10.31163/2618-964X-2023-6-2-120-138), EDN: HADIVX

Cited as

Iskuzhina M.G., Kuzina E.V., Mukhamatdyarova S.R., Korshunova T.Yu. Biological methods of cleaning of the environment from heavy metals. *Ėkobioteh.* 2023, V. 6 (2). P. 120-138. DOI: [10.31163/2618-964X-2023-6-2-120-138](https://doi.org/10.31163/2618-964X-2023-6-2-120-138), EDN: HADIVX (In Rus.)