

УДК 579

DOI: 10.18522/2308-9709-2026-56-21

УСТОЙЧИВОСТЬ АКТИНОМИЦЕТОВ К ТЯЖЁЛЫМ МЕТАЛЛАМ И СПОСОБНОСТЬ К ИХ БИОСОРБЦИИ

Чайкина А. П.^{1*}

¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

*Chaykina@sfedu.ru**

ORCID: 0009-0002-6449-7813

Аннотация

В обзорной статье рассматриваются экологические, морфологические и биохимические особенности актиномицетов, позволяющие использовать их в качестве перспективных кандидатов для биосорбции тяжёлых металлов (ТМ). Особое внимание уделяется механизмам устойчивости актиномицетов к ТМ, их роли в естественных и антропогенно-нарушенных экосистемах. Обзор содержит обобщение экспериментальных данных по биосорбционной активности различных штаммов актиномицетов в отношении ряда тяжёлых металлов, приоритетных поллютантов, таких как свинец, кадмий, цинк, медь, хром. В статье проанализированы литературные данные по биосорбционной ёмкости различных штаммов, показавших в оптимальных условиях эффективность удаления металлов до 80-100 %. Отмечена экономическая целесообразность использования биомассы актиномицетов, в том числе отходов фармацевтической промышленности. Актиномицеты рассматриваются в качестве эффективных биосорбентов для ремедиации загрязнённых тяжёлыми металлами почв и сточных вод.

Ключевые слова

Актиномицеты; тяжёлые металлы; биосорбция; *Streptomyces*.

Введение

Актиномицеты – это аэробные грамположительные бактерии, принадлежащие к филуму Actinomycetota, отличающиеся способностью формировать субстратный и воздушный мицелий. Актиномицеты представляют одну из наиболее широко распространённых групп микроорганизмов. Они играют важную экологическую роль в окружающей среде, внося большой вклад в круговорот органического вещества, разлагают сложные органические соединения, в том числе антропогенные загрязнители, и способны сорбировать

тяжёлые металлы (ТМ), снижая их биодоступность и экотоксичность. Растущее антропогенное загрязнение тяжёлыми металлами является одной из наиболее серьёзных экологических проблем на сегодняшний день. Устойчивость актиномицетов к тяжёлым металлам и способность к их биоаккумуляции и биосорбции открывает перспективу использования ТМ-резистентных актиномицетов для биоремедиации загрязнённых территорий. Традиционные методы удаления металлов часто малоэффективны или дорогостоящи, что стимулирует развитие биотехнологических методов на основе микробной биосорбции. Среди микроорганизмов актиномицеты, особенно стрептомицеты, выделяются высокой устойчивостью к металлам и эффективностью сорбции, что делает их перспективными агентами для биоремедиации загрязнённых тяжёлыми металлами почв и вод. Цель данного обзора – проанализировать механизмы устойчивости актиномицетов к тяжёлым металлам и обобщить современные экспериментальные данные по эффективности биосорбции ТМ различными штаммами актиномицетов.

Методы поиска и анализа литературы

Поиск литературы производился в библиографических базах данных Scopus, ScienceDirect, PubMed, Web of Science, Google Scholar и eLibrary. Поисковые запросы включали комбинации ключевых слов и словосочетаний «*Streptomyces*», «*Streptomyces* biosorption», «*actinomycetes* heavy metal biosorption», «*actinobacteria* heavy metal resistance», «Pb biosorption», «Cd biosorption», «Zn biosorption», «Cr biosorption», «Cu biosorption» и др. Статьи выбирались по следующим критериям:

- Период публикации: преимущественно 2010–2025 гг., а также фундаментальные работы 1989–2025 гг. Всего отобрано 91 работа.
- Оригинальные экспериментальные исследования, опубликованные в рецензируемых научных журналах (*Ecotoxicology*, *Frontiers in Microbiology*, *Chemosphere*, *Почвоведение* и др.).
- Отбор работ, касающихся сорбции металлов биомассой актиномицетов производился преимущественно по эффективности удаления металла ($\geq 70\%$ удаления металла). Всего отобрано 42 экспериментальные статьи, посвященные эффективности удаления металлов живой и/или мертвой биомассой *Streptomyces* sp.

Актиномицеты, их экология и биохимические особенности

Актиномицеты – аэробные грамположительные бактерии, имеющие в своем геноме высокое содержание гуанин-цитозиновых пар (50–77 %),

способные к формированию истинного мицелия, сходного с грибным, но с гифами меньшего диаметра (0.4–1.5 мкм), либо распадающиеся на палочковидные и кокковидные структуры. На концах гиф актиномицетов образуются споры – структуры размножения. (Зенова, 1992; Звягинцев, Зенова, 2001). По морфологии актинобактерии условно делят на две группы: высшие, формирующие истинный субстратный и/или воздушный мицелий, и нокардиоформные, у которых мицелий распадается на отдельные участки (Barka et al., 2015). Клеточная стенка актиномицетов грамположительного типа, состоит из нескольких слоев пептидогликана с включенными тейхоевыми, тейхуроновыми, тейхулозоновыми кислотами. Структурные особенности тейхоевых кислот могут быть видоспецифическими маркерами внутри родов *Streptomyces*, *Nocardioopsis*, *Glycomyces*, *Nocardioides* (Tulskaya et al., 2011).

Актиномицеты образуют стабильные и устойчивые популяции в различных экосистемах, однако наиболее многочисленны в почвах (Williams, Wellington, 1982). Актиномицеты чувствительны к низким значениям pH и повышенной влажности; оптимальными условиями обитания для них являются щелочные сухие почвы (Bhatti et al., 2017). Однако встречаются ацидофильные, алкалофильные, ксерофильные, галофильные, психрофильные, термофильные представители (Зенова и др., 2011). Некоторые актиномицеты способны обитать в экстремальных «экзотических» условиях, таких как пустынные и вулканические почвы (Zenova et al., 2010), арктические почвы (Nikitin et al., 2021), гиперсолёные озёра (Zamora-Quintero et al., 2022), карбонатно-кальциевые отложения на стенах пещер (Martinet et al., 2023), донные отложения из Марианского жёлоба (Pathom-Aree et al., 2006) и т.д. Способ размножения актиномицетов экзоспорами может обеспечивать сохранение этих микроорганизмов, например, в условиях вечной мерзлоты на протяжении многих тысяч лет. Так, актиномицеты были выделены из отложений антарктических кернов возрастом более одной тысячи лет (Millán-Aguíñaga et al., 2019). Возраст в одну тысячу лет, однако, не является пределом. Актиномицеты пяти родов выделялись из образцов фекалий мамонта возрастом более 28000 лет, останки которого сохранились в условиях вечной мерзлоты (van Bergeijk et al., 2024).

Актиномицеты давно известны своей способностью к деструкции сложноразлагаемых субстратов: целлюлозы, лигноцеллюлозы, ксилана, хитина, пектина, многих других сложных полисахаридов (Yeager et al., 2017). Многими исследованиями установлена ведущая роль актиномицетов в разложении органических полимеров и обогащении почвы большим количеством

органического вещества и гумуса (Manucharova, 2009; Kirby, 2005). Актиномицеты выделяют ряд летучих веществ в ходе метаболизма, одним из которых является геосмин, который придаёт здоровой почве характерный «запах влажной земли» (Sharma et al., 2014).

Актиномицетам присущ целый ряд примечательных в микробном мире свойств, в том числе способность к синтезу огромного количества биологически активных веществ, таких как противоопухолевые, противовирусные, противогрибковые, антимикробные вещества, иммунодепрессанты, биосурфактанты, гормоны роста растений (Selim et al., 2021). В геноме стрептомицетов встречается несколько кластеров биосинтетических генов, которые кодируют синтез целого ряда вторичных метаболитов (Alam et al., 2022). Среди всего разнообразия синтезируемых веществ важнейшее место занимают антибиотики. Актиномицеты, в особенности представители родов *Streptomyces* и *Micromonospora*, являются продуцентами 70–80 % от всех известных на сегодняшний день антибиотиков (Chaudhary et al., 2013). Микроорганизмы-продуценты антибиотиков обладают различными механизмами резистентности к ним. Исследования показывают связь между множественной антибиотикорезистентностью и металлорезистентностью (Javed et al., 2021). Это может быть связано с тем, что соответствующие гены, отвечающие за оба типа устойчивости, часто локализованы на одних и тех же плазмидах или транспозонах (Remenár et al., 2014).

Механизмы токсического действия тяжёлых металлов и металлоидов

Тяжёлые металлы и металлоиды – группа химических элементов с атомной массой больше 50. К этой группе относятся все элементы, начиная с ванадия и заканчивая ураном (Водяницкий, 2008). Тяжёлые металлы в определённых токсичных концентрациях оказывают пагубное воздействие на живые организмы (Järup, 2003). Тяжёлые металлы и металлоиды являются системными токсикантами, воздействие высоких концентраций которых вызывает неблагоприятные последствия для здоровья человека, включая сердечно-сосудистые заболевания, аномалии развития, неврологические и нейроповеденческие расстройства, диабет, потерю слуха, гематологические и иммунологические расстройства, различные виды рака и многие другие заболевания (Jan et al., 2015).

Некоторые ТМ (марганец, хром, молибден, кобальт, цинк, железо, медь) в низких концентрациях являются эссенциальными микроэлементами. Они выступают как кофакторы ферментов; участвуют в окислительно-

восстановительных процессах, экспрессии генов, биосинтезе белков, нуклеиновых кислот, вторичных метаболитов в клетке (Prasad et al., 1999). Однако если концентрация металлов повышена, они будут оказывать токсический эффект. Такие элементы, как ртуть, мышьяк, кадмий или свинец не имеют функций в клетке, но обладают высоким сродством ко многим физиологически важным соединениям, могут заменять эссенциальные элементы в активных центрах металлосодержащих комплексов и некоторые функциональные группы биомолекул. Так, например, Pb^{2+} способен замещать катионы Mg^{2+} , Zn^{2+} , Ca^{2+} , Fe^{2+} и другие, тем самым осуществляя конкурентное ингибирование того или иного фермента (Скугорева и др., 2016). Высокое сродство ионов свинца и кальция к одним и тем же активным центрам и функциональным группам биомолекул приводит к конкуренции свинца и кальция за связывание с ними и, в итоге, к нарушениям кальциевого транспорта, а также к замене кальция на свинец в минеральном веществе костей. Кроме того, свинец способен связываться с сульфгидрильными и амидными группами ферментов. Ртуть в клетке образует ковалентные связи с остатками цистеина в белках, что также приводит к нарушению их функционирования. As(III) может инактивировать более 200 ферментов, связываясь с тиоловыми или сульфгидрильными группами белков, а As(V) может заменять собой фосфат (Tchounwou et al., 2012).

Основное токсическое действие кадмия в клетке связано с его высоким сродством к тиоловым и дисульфидным группам биомолекул. Кадмий ингибирует активность ферментов цепи переноса электронов в митохондриях, тем самым увеличивая проницаемость митохондриальной мембраны и снижая трансмембранный потенциал, повышает продукцию активных форм кислорода и вызывает окислительный стресс (Genchi et al., 2020).

Перечисленные металлы (Pb, Hg, Cd, As) считаются наиболее опасными для организма человека и животных, так как они токсичны даже в самых малых концентрациях (Morais et al., 2012).

У тяжёлых металлов широкий спектр оказываемых ими отрицательных эффектов в клетке: они могут индуцировать окислительный стресс, повреждать клеточные мембраны и ДНК, нарушать или ингибировать ферментативные функции, модифицировать структуру белков, нарушать энергетические процессы в клетке (Abdu et al., 2017). Производство активных форм кислорода и окислительный стресс играют ключевую роль в токсичности и канцерогенности таких металлов, как мышьяк, кадмий, хром, свинец и ртуть (Tchounwou et al., 2012).

В общем виде в основе токсичности тяжёлых металлов лежат три механизма: связывание с функциональными группами молекул, индуцирование окислительного стресса и замена эссенциальных элементов из металлоорганических комплексов (Скугорева и др., 2016).

Микробные сообщества в условиях загрязнения тяжёлыми металлами

Пагубные эффекты воздействия тяжёлых металлов на почвенные микроорганизмы стали известны еще на заре развития микробиологии как науки (Lipman, Burgess, 1914). Несмотря на весь спектр отрицательных эффектов, оказываемых металлами на микроорганизмы, многие представители почвенных микробных сообществ, в частности актиномицеты, смогли адаптироваться к условиям загрязнённой металлами почвы и выработать механизмы толерантности к тяжёлым металлам (Gadd, Griffiths, 1977).

Анализы метабеномов, проведенные разными группами исследователей, показывали высокое содержание актинобактерий в загрязнённых тяжёлыми металлами почвах. Так, согласно данным Hemmat-Jou с соавторами (2018) самым распространённым родом в образцах почв, загрязнённых цинком и свинцом, был род *Solirubrobacter*, принадлежащий к филуму Actinobacteria. При этом представители филума Actinobacteria в целом занимали второе место по численности в бактериальном сообществе. По данным, полученным Jue с соавторами (2024), филум Actinomycetota был одним из доминирующих в почвах, загрязнённых сурьмой. Согласно исследованию микробного разнообразия загрязнённых ТМ почв Кореи, актинобактерии являлись одной из трёх доминирующих по численности групп бактерий (Hur, Park, 2019).

При изучении микробных сообществ хемозёмов бывшего оз. Атаманского, в которых валовое содержание ТМ превышает ПДК в десятки и сотни раз (Бауэр и др., 2018), выявлялось доминирование актинобактерий, что может быть обусловлено как их резистентностью к высоким содержаниям ТМ, так и их повышенной устойчивостью к низкому содержанию влаги в среде (Кочаровская и др., 2021).

Филогенетические исследования устойчивых к тяжёлым металлам стрептомицетов показывали широкую распространённость генов устойчивости к ТМ в рамках рода *Streptomyces*, а также независимое неоднократное возникновение разных механизмов устойчивости к ТМ в ходе эволюции (Álvarez et al., 2013). По некоторым данным, в условиях загрязнения почв тяжёлыми металлами, именно стрептомицеты являются доминирующей группой бактерий, тогда как в ненарушенных почвах относительная доля всех

актинобактерий составляет только 20 % от всего микробного сообщества. Морфологические и биохимические особенности позволяют стрептомицетам колонизировать новые экологические ниши в экстремальных условиях окружающей среды, включая интенсивное загрязнение ТМ. Это свидетельствует о развитии стрептомицетами специальных стратегий, позволяющих им успешно существовать в условиях повышенного содержания ТМ в среде (Широких, 2014).

Устойчивость микроорганизмов к тяжёлым металлам

Микроорганизмы могут использовать разнообразные механизмы для защиты собственных клеток от пагубного действия тяжёлых металлов. По классификации Djinni и Djoudi (2022), эти механизмы включают:

1. Биотрансформацию – перевод металла в менее токсичную форму путём алкилирования, окислительно-восстановительных реакций и др.
2. Синтез внеклеточных хелаторов, состоящих из полимерных веществ, способных связывать и фиксировать металлы. К таким веществам относятся, например, биосурфактанты и сидерофоры.
3. Возврат металлов обратно во внеклеточную среду с помощью эффлюксных насосов (активный метаболизм).
4. Биоаккумуляцию – внутриклеточное накопление живыми клетками.
5. Биосорбцию – метаболически независимый процесс, включающий адсорбцию металлов на отрицательно заряженных функциональных группах поверхности клетки (например, карбоксильных, фосфатных, сульфатных и других), которые входят в состав белков и экзополисахаридов.

Также к косвенным механизмам адаптации микроорганизмов к воздействию ТМ можно отнести их участие в круговороте углерода в почве, что способствует изменению количества органического вещества, и впоследствии влияет на подвижность металлов в почве. Ещё один косвенный механизм – влияние микроорганизмов на значения pH и окислительно-восстановительного потенциала почвы, что также влияет на биодоступность металлов в почве (Timková et al., 2018).

Кроме того, некоторые микроорганизмы могут использовать соединения тяжёлых металлов, вовлекая их в пути своего метаболизма. Например, некоторые металлы, в основном металлы с переменной валентностью, такие как хром, медь или железо, могут выступать в качестве доноров или акцепторов электронов в клетках (Abdu et al., 2017).

В широком же смысле биосорбцией можно назвать способность биологического материала связывать и концентрировать отдельные ионы или молекулы из водных растворов (Li et al., 2010). Сорбция металлов биологическими методами перспективна и не имеет некоторых технических и экономических ограничений, по сравнению с использованием физико-химических методов для данных целей (Zabochnicka-Świątek, Krzywonos, 2014). Традиционно используемые методы удаления ионов металлов из водных растворов – физико-химические. Это химическое осаждение, фильтрация, ионный обмен, электрохимическая обработка, мембранные технологии, адсорбция на активированном угле, выпаривание и т. д. Однако в большинстве случаев эти методы либо малоэффективны, либо чрезвычайно дороги для требуемых объёмов очистки сточных вод (Wang, Chen, 2009). Биосорбенты имеют преимущества перед минеральными сорбентами, так как они имеют гетерогенную многослойную структуру, в которой каждый слой отличается по структуре и химическому составу. В последние годы всё большее внимание уделяется использованию именно актиномицетов в качестве биосорбента для удаления тяжёлых металлов.

Способностью к биосорбции тяжёлых металлов обладают разные микроорганизмы: грибы, микроводоросли, бактерии, дрожжи, актиномицеты (Mustapha, Halimoon, 2015). Способность к биосорбции зависит от внутренних структурных и биохимических свойств микроорганизма, генетических и физиологических адаптаций, модификации металла окружающей средой, а также доступности и токсичности металла (Timková et al., 2018). Для биосорбции металлов можно использовать как живую, так и мёртвую биомассу, а также клеточные продукты, такие как полисахариды.

Актиномицеты, чаще всего представители самого большого рода *Streptomyces*, являются хорошими кандидатами на роль «биологического оружия» для борьбы с загрязнением тяжёлыми металлами. Интерес исследователей к использованию актиномицетов для биосорбции растёт. В библиографической базе данных ScienceDirect по запросу «biosorption» и «*Streptomyces*» находится всего 273 работы, датированные до 2010 года, а за последние 15 лет (2010-2025) – 1180 работ.

Многие штаммы стрептомицетов стабильны, устойчивы к высоким концентрациям ТМ, выдерживают низкую влажность, быстро растут, а также их использование для биосорбции металлов экономически выгодно, не требует больших затрат при высокой эффективности сорбции (Yuan et al., 2009).

На поверхности клеточной стенки стрептомицетов тейхоевые кислоты, поверхностные белки, а также экзополисахариды могут играть ключевую роль в связывании ионов металлов. В электростатическое взаимодействие с ионом того или иного тяжёлого металла обычно вовлечены карбоксильные, гидроксильные, карбонильные, фосфатные, сульфатные и аминокгруппы, за счёт чего и может происходить биосорбция металлов. Для определения характера сорбции металлов, а именно определения вовлечённых в процесс функциональных групп, используется метод инфракрасной Фурье-спектроскопии (FTIR, Fourier Transform Infrared Spectroscopy) (Presentato et al., 2020).

Для характеристики биосорбционных процессов используют изотермы адсорбции, которых существует множество, но наиболее часто применяемыми являются модели изотерм Ленгмюра и Фрейндлиха (Переломов и др., 2013). Изотерма Ленгмюра показывает однородную монослойную природу адсорбента и позволяет рассчитать максимальную адсорбционную ёмкость, при которой адсорбент насыщается, и адсорбция прекращается (Langmuir, 1918). Изотерма Фрейндлиха показывает адсорбцию на гетерогенных многослойных поверхностях, насыщения адсорбента не происходит. Также существует модель Дубинина-Радускевича, подходящая для описания адсорбции на тонкопористых сорбентах (Скугорева и др., 2021).

На эффективность сорбции биомассой актиномицетов может влиять множество факторов: концентрация биосорбента, тип и концентрация металла, pH, время контакта раствора с биосорбентом, а также размер и структура частиц сорбента, и, конечно же, вид и штамм микроорганизма, и состояние (живая/неживая) биомассы (Priya et al., 2022).

Эффективность биосорбции ТМ актиномицетами

Различные штаммы самого крупного рода актинобактерий *Streptomyces* показывают хорошую способность к биосорбции тяжёлых металлов (Mosbah, Sahmoune, 2013). Некоторые исследователи считают перспективным *Streptomyces rimosus*, который в разных исследованиях показывал достаточно высокие значения сорбции различных тяжёлых металлов: кадмия – до 63.3 мг/г; шестивалентного хрома – до 29 мг/г, трёхвалентного хрома – до 83.3 мг/г; свинца – до 137 мг/г (Mosbah, Sahmoune, 2013; Selatnia et al., 2004b); цинка – до 80 мг/г (Mameri et al., 1999); никеля – до 32.6 мг/г (Selatnia et al., 2004c); трёхвалентного железа – до 122 мг/г (Selatnia et al., 2004d).

Streptomyces rimosus является широко используемым промышленным продуцентом антибиотиков тетрациклиновой группы, вследствие чего в фармацевтической промышленности образуется большое количество отходов – биомассы стрептомицетов. Многие другие виды стрептомицетов, например *Streptomyces griseus*, *S. noursei*, *S. aureus*, *S. natalensis*, *S. fradiae*, также используются в фармацевтике как продуценты антибиотиков разных классов (Khushboo et al., 2022). Экономическую целесообразность процессов биосорбции можно улучшить ещё больше, используя для этого биомассу отходов фармацевтической промышленности от производства антибиотиков (Selatnia et al., 2004d). Описаны работы, где в качестве биосорбента авторы используют мёртвую биомассу тех или иных видов стрептомицетов (*S. rimosus*, *S. fradiae*) – отход после производства антибиотиков – и указывают, что такой способ имеет большой потенциал в использовании для удаления ТМ из загрязнённых сточных вод (Simeonova et al., 2008; Kirova et al., 2015). Использование мёртвой биомассы для сорбции металлов часто рассматривается как более выгодное, чем живой биомассы, так как первая не требует подачи питательных веществ, не подвержена токсическому действию сорбируемых металлов, а также может обладать более высокой биосорбционной ёмкостью (Öztürk et al., 2004).

Исследования показывают, что мёртвая биомасса *Streptomyces rimosus* способна удалять до 95 % ионов хрома из раствора (Sahmoune, 2018). Устойчивость живой биомассы стрептомицетов к шестивалентному хрому, несмотря на его очень высокую токсичность, может быть связана со способностью восстанавливать Cr(VI) до Cr(III). Трёхвалентный хром является, по некоторым оценкам, в тысячу раз менее токсичным, чем шестивалентный хром, а также менее растворимым в воде и более подвижным (Bagchi et al., 2002). Это делает некоторые штаммы стрептомицетов весьма перспективными для биоремедиации загрязнённых хромом почв и сточных вод (Polti et al., 2007). Например, биомасса штамма *Streptomyces rochei* ANH, выделенного из донных отложений в Средиземном море, показывала высокую эффективность биосорбции Cr(VI) – до 85 %, при подобранных оптимальных условиях сорбции. Данный штамм демонстрировал устойчивость и к другим ТМ: определённые минимальные ингибирующие концентрации составили 125 мг/л для Cr(VI), 60 мг/л для Cd(II) и Pb(II). Кроме того, в эксперименте по очистке сточных вод кожевенного завода биомассой *Streptomyces rochei* ANH удалялось 100 % Ni(II), Cu(II), Mn(II), Fe(II), 95 % Pb(II) и Cd(II), и 86 % Cr(VI) (Hamdan et al., 2021).

Согласно данным других исследователей, *Streptomyces mutabilis* является очень перспективным биосорбентом загрязнённых шестивалентным хромом сточных вод. Выделенный из почвы района водоочистных сооружений *Streptomyces mutabilis* демонстрировал не только крайне высокую устойчивость к Cr(VI) – МИК определена как 135 мг/л, но и крайне высокую эффективность удаления ионов хрома биомассой стрептомицета (до 100 % в оптимальных условиях сорбции) (Zabermawi et al., 2021).

По сообщению Latha, Vinothini и Dhanasekaran изолят, определённый как *Streptomyces werraensis*, показывал максимальную эффективность биосорбции Cr(VI) – 82.3 %, при загрузке металла в концентрации 100 мг/л, а также устойчивость к Cr(VI), Ni(II), Zn, Pb(II) и Cu(II) (Latha et al., 2015).

Биомассу стрептомицетов, полученную как отход фармацевтической промышленности, соответствующим образом обрабатывали для получения удобной формы биосорбента. Мёртвая биомасса *Streptomyces* sp. удаляла до 90.76 % Zn(II) и 93.04 % Pb(II) из растворов при концентрациях каждого металла 25 мг/л (Kumari et al., 2023).

Штамм *Streptomyces* sp. VITSVK9, выделенный из донных отложений Бенгальского залива в Индии, выдерживал концентрации до 200 мг/л ртути и 1800 мг/кг свинца. Этот штамм демонстрировал способность к сорбции до 81.94 % Hg(II) и 83.23 % Pb(II) при концентрациях 200 мг/л и 150 мг/л данных металлов соответственно (Sanjenbam et al., 2012).

В другой работе этот же штамм, *Streptomyces* sp. VITSVK9, тестировали на способность к биосорбции кадмия в разных условиях. При подборе оптимальных значений загрузки биомассы (3 г/л) и pH (4.0), начальной концентрации металла в 100 мг/л, отмечался максимальный уровень биосорбции Cd(II) – 41 % (Saurav, Kannabiran, 2011a).

В ещё одной работе, посвящённой исследованию биосорбционных возможностей *Streptomyces* sp. VITSVK9, сообщалось о 76 % и 84 % сорбции Cr(III) и Cr(VI) биомассой, соответственно (Saurav, Kannabiran, 2011b).

Эффективность биосорбции ТМ биомассой *Streptomyces zinciresistens* была достаточно высокой – максимальный уровень удаления ионов Cd из раствора составил 76.53 %, а Zn – 77.38 % (Lin et al., 2012).

Живая биомасса штамма *Streptomyces cyaneus* Kw42, выделенного из сточных вод, сорбировала до 58.4 % Cu, 67.7 % Pb и 52 % Cd. Мёртвая биомасса

этого штамма в оптимизированных условиях показывала эффективность сорбции до 83.4 % Pb, 74.5 % Cu и 68.4 % Cd (Abd El-Motaleb et al., 2020).

Некоторые штаммы актиномицетов редких родов также показывают высокую биосорбционную активность в отношении тяжёлых металлов. Так, высокорезистентный штамм *Promicromonospora* sp. UTMC 2243 показывал огромную сорбирующую активность в отношении кадмия (фиксировалась устойчивость к концентрации Cd (II) 9.2 ммоль/л). Процентная доля удаления кадмия из раствора составляла до 96.5 % при культивировании до 10 суток при начальной концентрации кадмия 4.5 ммоль/л (Hamed et al., 2015).

Анализ 42 работ, посвящённых исследованию эффективности биосорбции ТМ штаммами актиномицетов, показал, что наиболее универсальным является *Streptomyces rochei*, удаляющий 7 ТМ с эффективностью 86-100%. Хронологический анализ работ показывает смещение фокуса с лабораторных штаммов актиномицетов на поиск новых экстремофильных, либо морских штаммов, перспективных для удаления ТМ. В последние годы отмечается тенденция к переходу от варьирования экспериментальных условий к использованию RSM-моделирования для прогнозирования оптимальных параметров биосорбции ТМ (рН, концентрация биомассы, концентрация металла, температура).

В таблице 1 приводятся экспериментальные данные из литературы по биосорбционной активности различных штаммов актиномицетов (стрептомицетов) в отношении ряда наиболее часто исследуемых тяжёлых металлов.

Таблица 1 – Биосорбционная активность разных штаммов актиномицетов

Металл	Штамм	Максимальное удаление металла, %	Максимальная биосорбционная ёмкость, мг/г	Оптимальные условия				Ссылка на источник
				pH	T, °C	Концентрация биомассы	Концентрация металла, мг/л	
Pb (II)	<i>Streptomyces</i> sp.	93.04		н/д	н/д	н/д	25.00	(Kumari et al., 2023)
	<i>S. humidus</i> DBPb2	66.47		7.0	н/д	н/д	100.00	(Reti et al., 2024)
	<i>S. cyaneus</i> Kw42	83.40		8.0	40	0.30 %	100.00	(Abd El-Motaleb et al., 2020)
	<i>Streptomyces</i> sp.VITSVK9	83.23		7.0	н/д	3.0 г/л	150.00	(Sanjenbam, et al., 2012)
	<i>S. rochei</i> ANH	95.00		н/д	25	10.00 г/л	14.50	(Hamdan, et al., 2021)
	<i>S. rimosus</i>		137.00	н/д	н/д	н/д	н/д	(Selatnia et al., 2004b)
Cd (II)	<i>S. cyaneus</i> Kw42	68.40		8.0	40	0.30 %	100.00	(Abd El-Motaleb et al., 2020)
	<i>S. zinciresistens</i> CCNWNQ0016T	76.53	85.00	5.0	н/д	1.00 %	2 ммоль/л	(Lin et al., 2012)
	<i>Streptomyces</i> sp.VITSVK9	41.00		4.0	н/д	3.0 г/л	100.00	(Saurav, Kannabiran, 2011a)
	<i>S. rochei</i> ANH	95.00		н/д	25	10.00 г/л	15.40	(Hamdan et al., 2021)
	<i>S. rimosus</i>		63.30	н/д	н/д	н/д	н/д	(Selatnia et al., 2004a)
	<i>Streptomyces</i> HL-12		24.24	6.0	28	2.00–2.50 г/л	н/д	(Yuan et al., 2009)
	<i>Streptomyces</i> sp. K33		38.49	6.0	28	2.00–2.50 г/л	н/д	(Yuan et al., 2009)
Zn (II)	<i>Streptomyces</i> sp.	90.76		н/д	н/д	н/д	25.00	(Kumari et al., 2023)
	<i>S. zinciresistens</i> CCNWNQ0016T	77.38	26.81	5.0	н/д	1.00 %	2 ммоль/л	(Lin et al., 2012)
	<i>S. rimosus</i>		80.00	7.5	н/д	н/д	н/д	(Mameri et al., 1999)
	<i>S. fradiae</i>		61.09	н/д	н/д	н/д	н/д	(Kirova et al., 2015)
	<i>Streptomyces</i> sp. WR1L1S8	39.02		н/д	28	н/д	50.00	(Djinni, Djoudi, 2022)
	<i>S. lunalinharesii</i>	60.00		6.0	25	2.50 г/л	20.00	(Veneu et al., 2013)
Cu (II)	<i>S. lunalinharesii</i>	81.00		5.0	25	2.50 г/л	20.00	(Veneu et al., 2013)
	<i>S. cyaneus</i> Kw42	74.50		8.0	40	0.30 %	100.00	(Abd El-Motaleb et al., 2020)
	<i>S. rochei</i> ANH	100.00		н/д	25	10.00 г/л	2.80	(Hamdan et al., 2021)

Металл	Штамм	Максимальное удаление металла, %	Максимальная биосорбционная ёмкость, мг/г	Оптимальные условия				Ссылка на источник
				pH	T, °C	Концентрация биомассы	Концентрация металла, мг/л	
	<i>Streptomyces</i> sp.WR1L1S8	42.00		н/д	28	н/д	50.00	(Djinni, Djoudi, 2022)
	<i>S. coelicolor</i> A3(2)	21.80		5.0	25	1 г/л	250.00	(Öztürk et al., 2004)
	<i>S. fradiae</i>		16.00	5.5	20	н/д	700.00	(Simeonova et al., 2008)
Cr (III)	<i>Streptomyces</i> sp.VITSVK9	76.00		4.0	н/д	3.00 г/л	80.00	(Saurav, Kannabiran, 2011b)
	<i>S. rimosus</i>		83.30	4.8	20	3.00 г/л		(Sahmoune et al., 2009)
Cr (VI)	<i>Streptomyces</i> sp.VITSVK9	84.00		7.0	н/д	3.00 г/л	100.00	(Saurav, Kannabiran, 2011b)
	<i>S. werraensis</i> LD22	82.30		7.0	н/д	3.00 г/л	100.00	(Latha et al., 2015)
	<i>S. mutabilis</i>	100.00		7.0	45	0.12 г/л	50.00	(Zabermawi et al., 2021)
	<i>S. rochei</i> ANH	85.00		5,0	30	10.00 мг/мл	50.00	(Hamdan et al., 2021)
Hg (II)	<i>Streptomyces</i> sp.VITSVK9	81.94		7.0	н/д	2.50 г/л	200.00	(Sanjenbam et al., 2012)
Fe (II)	<i>S. rochei</i> ANH	100.00		н/д	25	10.00 г/л	10.50	(Hamdan et al., 2021)
	<i>Streptomyces</i> sp.WR1L1S8	60.74		н/д	28	н/д	50.00	(Djinni, Djoudi, 2022)
Fe (III)	<i>S. rimosus</i>		122.00	н/д	н/д	3.00 г/л	100.00	(Selatnia et al., 2004d)
Ni (II)	<i>S. rochei</i> ANH	100.00		н/д	25	10.00 г/л	6.50	(Hamdan et al., 2021)
	<i>S. coelicolor</i> A3(2)	7.30		8.0	25	1.00 г/л	250.00	(Öztürk, et al., 2004)
	<i>S. roseorubens</i> SY		208.39	5.0	н/д	1.00 г/л	100.00	(Long et al., 2018)
	<i>S. rimosus</i>		32.60	н/д	н/д	3.00 г/л	н/д	(Selatnia et al., 2004c)
Mn (II)	<i>S. rochei</i> ANH	100.00		н/д	25	10.00 г/л	2.50	(Hamdan et al., 2021)

Примечание. н/д – нет данных.

Не во всех работах авторы приводят данные по дизайну эксперимента полностью. Например, во многих статьях не упоминается температура, при которой происходила сорбция, хотя фактор температуры является важным и влияет на эффективность процесса биосорбции (El-Gendy, El-Bondkly, 2016). Ряд авторов (Saurav, Kannabiran, 2011a; Saurav, Kannabiran, 2011b; Sanjenbam et al., 2012) в работах по исследованию сорбционных способностей штамма *Streptomyces* sp. VITSVK9 не приводят данные по температуре. Но, с другой стороны, некоторые исследователи утверждают, что фактор температуры, а также время контакта, концентрация металла и жизнеспособность клеток незначительно влияют на удаление металла (Hamdan et al., 2021). Не во всех работах обращено внимание на такой фактор, как размер частиц биосорбента, хотя, скорее всего, это связано с техническими ограничениями постановки эксперимента по исследованию размера частиц биосорбента на эффективность биосорбции.

Наиболее популярные металлы для исследования их биосорбции актиномицетами – Zn, Cd, Pb. Такой интерес практически обоснован, и значимость исследований связана со следующими факторами:

1) Данные металлы считаются наиболее приоритетными загрязнителями, так как их техногенное и антропогенное накопление в окружающей среде идёт высокими темпами (Антонова, Сафонова, 2007).

2) Фоновое содержание этих металлов (кроме кадмия) и в ненарушенных почвах относительно высокое (Бауэр и др., 2015). Что касается кадмия, несмотря на то что его содержание в почве обычно в разы ниже, чем концентрации свинца, цинка или меди, высокая токсичность делает этот элемент одним из наиболее опасных поллютантов среди всех ТМ; поступление кадмия в верхние слои почвы носит преимущественно антропогенный характер (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989).

В последние годы возрастает интерес к хрому – в библиографической базе данных ScienceDirect находится 330 работ, связанных с биосорбцией шестивалентного хрома стрептомицетами, за последние 10 лет (2016-2025). Это в 2,8 раза больше, чем работ, опубликованных до 2016 года.

Меньше всего внимания исследователей привлекают ртуть, а также никель и марганец. Это может быть объяснено тем, что в целом мировой кларк ртути в почвах невысок и равен 0.12 мг/кг (Водяницкий, 2009), а также относительно низким, по сравнению с другими ТМ, уровнем загрязнения ртутью нарушенных почв (Корчагина и др., 2014). Это частично объясняет

меньшее количество исследований по биосорбции ртути актиномицетами, поскольку её экологическая значимость и количество в экосистемах ниже, чем у более распространённых тяжёлых металлов. Никель и марганец являются эссенциальными элементами, менее токсичными, чем, например, кадмий или свинец, и относятся ко второй и третьей группам опасности соответственно (Водяницкий, 2012). Однако, встречаются данные, что, согласно новым исследованиям, в почвах свинец должен считаться менее опасным металлом, а медь и никель – более опасными, чем полагалось ранее (Водяницкий, 2013).

Практическое применение биосорбции актиномицетами

Актиномицеты успешно использовались для очистки реальных сточных вод различных предприятий от ТМ. Так, мёртвую биомассу *Streptomyces mutabilis* использовали для удаления Cr (VI) из промышленных сточных вод предприятий г. Джидда в Саудовской Аравии. Было показано полное удаление хрома из сточных вод за 7 дней (Zabermawi et al., 2021). В работе описана методика погружения упакованной в диализные трубки живой биомассы *S. rochei* ANH в промышленные стоки кожевенного завода, после чего выдерживали на протяжении 3 часов. В результате фиксировали от почти полного до полного удаления (86-100%) ряда тяжёлых металлов (Hamdan et al., 2021).

В литературе упоминаются работы по биоаугментации активного ила выбранными штаммами актиномицетов на муниципальной станции очистки сточных вод в Индии (Pattapulavar, Christopher, 2025), а также по биоремедиации загрязнённых ТМ почв в США с помощью актиномицетного консорциума. Утверждается, что через 2 года наблюдалось уменьшение концентрации ТМ и органических поллютантов в почве (Alori et al., 2022).

Таким образом, эффективность применения биомассы актиномицетов для удаления ТМ показана не только в лабораторных условиях, но и для реальных промышленных сточных вод и почв. Актиномицеты являются не только перспективным, но и применимым биотехнологическим решением для биоремедиации.

Заключение

Актиномицеты обладают уникальными биохимическими адаптациями, которые обеспечивают их выживание в условиях загрязнения тяжёлыми металлами и способность к эффективной биосорбции тяжёлых металлов. Структуры клеточной стенки и метаболические процессы играют активную роль в связывании и детоксикации металлов, что делает актиномицеты,

особенно род *Streptomyces*, перспективными агентами для биоремедиации. Использование мёртвой биомассы, получаемой из отходов производства антибиотиков, повышает экономическую целесообразность технологий биосорбции. Несмотря на необходимость дальнейшей оптимизации и масштабирования, существующие данные подтверждают потенциал актиномицетов для устойчивой очистки загрязнённых почв и сточных вод. Таким образом, актиномицеты являются весьма перспективными микроорганизмами для применения в целях биоремедиации, так как они устойчивы к жёстким условиям окружающей среды и могут демонстрировать довольно высокую биосорбционную ёмкость, а их использование экономически выгодно.

Благодарности и финансирование

Исследование выполнено при поддержке Стратегической Программы академического Лидерства Южного Федерального Университета («Приоритет 2030»).

Список источников

1. Антонова Ю. А., Сафонова М. А. Тяжёлые металлы в городских почвах // Фундаментальные исследования. – 2007. – № 11 – С. 43-44.
2. Бауэр Т. В., Линник В. Г., Минкина Т. М., Манджиева С. С., Невидомская Д. Г. Эколого-геохимические исследования техногенных почв в пойменных ландшафтах Северского Донца (бассейн Нижнего Дона) // Геохимия. – 2018. – № 10. – С. 956-966.
3. Бауэр Т. В., Минкина Т. М., Манджиева С. С., Чаплыгин, В. А., Невидомская Д. Г., Сушкова С. Н., Бакоев С. Ю. Фоновое содержание и состав соединений цинка, меди и свинца в черноземе обыкновенном естественных ландшафтов Ростовской области // Мелиорация и гидротехника. – 2015. – №. 4 (20). – С. 186-199.
4. Водяницкий Ю. Н. Загрязнение почв тяжелыми металлами и металлоидами и их экологическая опасность (аналитический обзор) // Почвоведение. – 2013. – №. 7. – С. 872-872.
5. Водяницкий Ю. Н. Нормативы содержания тяжелых металлов и металлоидов в почвах // Почвоведение. – 2012. – №. 3. – С. 368-368.
6. Водяницкий Ю. Н. Тяжелые и сверхтяжелые металлы и металлоиды в загрязненных почвах. – 2009.
7. Водяницкий Ю. Н. Тяжелые металлы и металлоиды в почвах // М.: ГНУ Почвенный институт им. ВВ Докучаева РАСХН. – 2008. – Т. 86.

8. Звягинцев Д. Г., Зенова Г. М. Экология актиномицетов. – М.: ГЕОС. – 2001. – С. 256.
9. Зенова Г. М. Почвенные актиномицеты. М.: Изд-во МГУ, 1992. – С. 78.
10. Зенова Г. М., Манучарова Н. А., Звягинцев Д. Г. Экстремофильные и экстремотолерантные актиномицеты в почвах разных типов //Почвоведение. – 2011. – №. 4. – С. 457-478.
11. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 439 с.
12. Корчагина К. В., Смагин А. В., Решетина Т. В. Оценка техногенного загрязнения городских почв на основе профильного распределения тяжелых металлов и плотности сложения //Почвоведение. – 2014. – №. 8. – С. 988-988.
13. Кочаровская Ю. Н. и др. Изучение микробных сообществ хемоземов озера Атаманское Ростовской области //VII Пущинская конференция "Биохимия, физиология и биосферная роль микроорганизмов". Школа-конференция для молодых ученых, аспирантов и студентов" Генетические технологии в микробиологии и микробное разнообразие". – 2021. – С. 60-62.
14. Переломов Л. В., Переломова И. В., Пинский Д. Л. Молекулярные механизмы взаимодействия между микроэлементами и микроорганизмами в биокосных системах (биосорбция и биоаккумуляция) //Агрохимия. – 2013. – №. 3. – С. 80-94.
15. Скугорева С. Г., Ашихмина Т. Я., Фокина А. И., Лялина Е. И. Химические основы токсического действия тяжёлых металлов (обзор) //Теоретическая и прикладная экология. – 2016. – №. 1. – С. 4-13.
16. Скугорева С. Г., Кантор Г. Я., Домрачева Л. И. Оценка эффективности сорбции ионов свинца (II) с помощью моделей кинетики и изотермы сорбции //Теоретическая и прикладная экология. – 2021. – №. 3. – С. 44-51.
17. Широких И. Г., Соловьева Е. С., Ашихмина Т. Я. Комплексы актиномицетов в почвах промышленной и селитебной зон Кирова //Почвоведение. – 2014. – №. 2. – С. 203-203.
18. Abd El-Motaleb M, Abd El-Motaleb M. M., El-Sabbagh S. M., Mohamed W. S. E., Wafy K. R. Biosorption of Cu²⁺, Pb²⁺ and Cd²⁺ from wastewater by dead biomass of *Streptomyces cyaneus* Kw42 //Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci. – 2020. – Vol. 9. – P. 422-435.
19. Abdu N., Abdullahi A. A., Abdulkadir A. Heavy metals and soil microbes //Environmental chemistry letters. – 2017. – Vol. 15. – №. 1. – P. 65-84.

20. Alam K., Mazumder A., Sikdar S., Zhao Y.-M., Hao J., Song C., Wang Y., Sarkar R., Islam S., Zhang Y. et al. Streptomyces: The biofactory of secondary metabolites //Frontiers in Microbiology. – 2022. – Vol. 13. – P. 968053.
21. Alori E. T. et al. Bioremediation techniques as affected by limiting factors in soil environment //Frontiers in Soil Science. – 2022. – Vol. 2. – P. 937186.
22. Álvarez A., Catalano S. A., Amoroso M. J. Heavy metal resistant strains are widespread along Streptomyces phylogeny //Molecular Phylogenetics and Evolution. – 2013. – Vol. 66. – №. 3. – P 1083-1088.
23. Bagchi D., Stohs S J., Downs B. W., Bagchi M., Preuss H. G. Cytotoxicity and oxidative mechanisms of different forms of chromium //Toxicology. – 2002. – Vol. 180. – №. 1. – P. 5-22.
24. Barka E. A., Vatsa P., Sanchez L., Gaveau-Vaillant N., Jacquard C., Klenk H.-P., Clément C., Ouhdouch Y., Gilles van Wezel P. Taxonomy, Physiology, and Natural Products of Actinobacteria // Microbiology and Molecular Biology Reviews. – 2015. – Vol. 80, №1 – P. 1-43.
25. Bhatti A. A., Haq S., Bhat R. A. Actinomycetes benefaction role in soil and plant health //Microbial pathogenesis. – 2017. – Vol. 111. – P. 458-467.
26. Chaudhary H. S, Soni B., Shrivastava A. R, Shrivastava S. Diversity and versatility of actinomycetes and its role in antibiotic production //Journal of Applied Pharmaceutical Science. – 2013. – Vol. 3. – №. 8 – P. S83-S94.
27. Djinni I., Djoudi W. Streptomyces sp. WR1L1S8 a potent endophytic marine strain for heavy metal resistance and copper removal enhanced by RSM modeling //Acta Ecologica Sinica. – 2022. – Vol. 42. – №. 2. – P. 80-89.
28. El-Gendy M. M. A. A., El-Bondkly A. M. A. Evaluation and enhancement of heavy metals bioremediation in aqueous solutions by Nocardiosis sp. MORSY1948, and Nocardia sp. MORSY2014 //Brazilian journal of microbiology. – 2016. – Vol. 47. – №. 3. – P. 571-586.
29. Gadd G. M., Griffiths A. J. Microorganisms and heavy metal toxicity //Microbial ecology. – 1977. – Vol. 4. – P. 303-317.
30. Genchi G., Sinicropi M. S., Lauria G., Carocci A., Catalano A. The effects of cadmium toxicity //International journal of environmental research and public health. – 2020. – Vol. 17. – №. 11. – P. 3782.
31. Hamdan A. M., Abd-El-Mageed H., Ghanem N. Biological treatment of hazardous heavy metals by Streptomyces rochei ANH for sustainable water management in agriculture //Scientific reports. – 2021. – V. 11. – №. 1. – P. 9314.
32. Hamed J., Dehghani M., Mohammadian F. Isolation of extremely heavy metal resistant strains of rare actinomycetes from high metal content soils in

Iran //International Journal of Environmental Research. – 2015. – Vol. 9. – №. 2. – P. 475-480.

33. Hemmat-Jou M. H., Safari-Sinegani A. A., Mirzaie-Asl A., Tahmourespour A. Analysis of microbial communities in heavy metals-contaminated soils using the metagenomic approach //Ecotoxicology. – 2018. – Vol. 27. – №. 9. – P. 1281-1291.

34. Hur M., Park S. J. Identification of microbial profiles in heavy-metal-contaminated soil from full-length 16s rRNA reads sequenced by a pacbio system //Microorganisms. – 2019. – Vol. 7. – №. 9. – P. 357.

35. Jan A. T., Azam M., Siddiqui K., Ali A., Choi I., Haq Q. M. R. Heavy metals and human health: mechanistic insight into toxicity and counter defense system of antioxidants //International journal of molecular sciences. – 2015. – Vol. 16. – №. 12. – P. 29592-29630.

36. Järup L. Hazards of heavy metal contamination //British medical bulletin. – 2003. – Vol. 68. – №. 1. – P. 167-182

37. Javed Z., Tripathi G. D., Mishra M., Dashora K. Actinomycetes–the microbial machinery for the organic-cycling, plant growth, and sustainable soil health //Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. – 2021. – Vol. 31. – P. 101893.

38. Jue J., Zhang D., Cao M., Li Y., Liang Q., Liu F., Dong Y. Q. Response of microbial community composition and function to land use in mining soils of Xikuang Mountain in Hunan //Plos one. – 2024. – Vol. 19. – №. 5. – P. e0299550.

39. Kannabiran K. Actinobacteria are better bioremediating agents for removal of toxic heavy metals: an overview //International Journal of Environmental Technology and Management. – 2017. – Vol. 20. – №. 3-4. – P. 129-138.

40. Khushboo P., Kumar P., Dubey K. K., Usmani Z., Sharma M., Gupta V. K. Biotechnological and industrial applications of Streptomyces metabolites //Biofuels, Bioproducts and Biorefining. – 2022. – Vol. 16. – №. 1. – P. 244-264.

41. Kirby R. Actinomycetes and lignin degradation //Advances in applied microbiology. – 2005. – Vol. 58. – P. 125-168.

42. Kirova G. K., Velkova Z. Y., Stoytcheva M. S., Gochev V. K. Zinc Biosorption by Waste Streptomyces fradiae Biomass: Equilibrium and Kinetics //Ecologia Balkanica. – 2015. – Vol. 7. – №. 2. – P. 63-72.

43. Kumari S., Agrawal N. K., Agarwal A., Kumar A., Malik N., Goyal D., Rajput V. D., Minkina T., Sharma P., Garg M. C. A prominent Streptomyces sp. biomass-based biosorption of zinc (II) and lead (II) from aqueous solutions: Isotherm and kinetic //Separations. – 2023. – Vol. 10. – №. 7. – P. 393.

44. Langmuir I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum //Journal of the American Chemical society. – 1918. – Vol. 40. – №. 9. – P. 1361-1403.
45. Latha S., Vinothini G., Dhanasekaran D. Chromium [Cr (VI)] biosorption property of the newly isolated actinobacterial probiont *Streptomyces werraensis* LD22 //3 Biotech. – 2015. – Vol. 5. – P. 423-432.
46. Li H., Lin Y., Guan W., Chang J., Xu L., Guo J., Wei G. Biosorption of Zn(II) by live and dead cells of *Streptomyces ciscaucasicus* strain CCNWHX 72-14 //Journal of hazardous materials. – 2010. – V. 179. – №. 1-3. – P. 151-159.
47. Lin Y., Wang X., Wang B., Mohamad O., Wei G. Bioaccumulation characterization of zinc and cadmium by *Streptomyces zinciresistens*, a novel actinomycete //Ecotoxicology and environmental safety. – 2012. – Vol. 77. – P. 7-17.
48. Lipman C. B., Burgess P. S. The Effect of Copper, Zinc, Iron and Lead Salts on Ammonification and Nitrification in Soils. – University of California Press, 1914. – Vol. 1.
49. Long J., Gao X., Su M., Li H., Chen D., Zhou S. Performance and mechanism of biosorption of nickel(II) from aqueous solution by non-living *Streptomyces roseorubens* SY //Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2018. – Vol. 548. – P. 125-133.
50. Mameri N., Boudries N., Addour L., Belhocine D., Lounici H., Grib H., Pauss A. Batch zinc biosorption by a bacterial nonliving *Streptomyces rimosus* biomass //Water research. – 1999. – Vol. 33. – №. 6. – P. 1347-1354.
51. Manucharova N. A. The microbial destruction of chitin, pectin, and cellulose in soils //Eurasian Soil Science. – 2009. – Vol. 42. – P. 1526-1532.
52. Martinet L., Naômé A., Rezende L. C. D., Tellatin D., Pignon B., Docquier J.-D., Sannio F., Baiwir D., Mazzucchelli G., Frédérick M. Lunaemycins, new cyclic hexapeptide antibiotics from the cave moonmilk-dweller *Streptomyces lunaelactis* MM109T //International Journal of Molecular Sciences. – 2023. – Vol. 24. – №. 2. – P. 1114.
53. Millán-Aguíñaga N., Soldatou S., Brozio S., Munnoch J. T., Howe J., Hoskisson P. A., Duncan K. R. Awakening ancient polar Actinobacteria: diversity, evolution and specialized metabolite potential //Microbiology. – 2019. – Vol. 165. – №. 11. – P. 1169-1180.
54. Morais S., E Costa F. G., Lourdes Pereir M. D. Heavy metals and human health //Environmental health—emerging issues and practice. – 2012. – Vol. 10. – №. 1. – P. 227-245.
55. Mosbah R., Sahmoune M. Biosorption of heavy metals by *Streptomyces* species—an overview //Open Chemistry. – 2013. – Vol. 11. – №. 9. – P. 1412-1422.

56. Mustapha M. U., Halimoon N. Microorganisms and biosorption of heavy metals in the environment: a review paper //J. Microb. Biochem. Technol. – 2015. – Vol. 7. – №. 5. – P. 253-256.
57. Nikitin D. A., Lysak L. V., Kutovaya O. V., Gracheva T. A. Ecological-trophic structure and taxonomic characteristics of the communities of soil microorganisms in the northern part of the Novaya Zemlya Archipelago //Eurasian Soil Science. – 2021. – Vol. 54. – P. 1689-1704.
58. Öztürk A., Artan T., Ayar A. Biosorption of nickel(II) and copper(II) ions from aqueous solution by *Streptomyces coelicolor* A3 (2) //Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. – 2004. – Vol. 34. – №. 2. – P. 105-111.
59. Pathom-Aree W., Stach J. E. M., Ward A. C., Horikoshi K., Bull A. T., Goodfellow M. Diversity of actinomycetes isolated from Challenger Deep sediment (10,898 m) from the Mariana Trench //Extremophiles. – 2006. – Vol. 10. – P. 181-189.
60. Pattapulavar V., Christopher J. G. The role of actinomycetes in a cleaner environment //Sustainable Environmental Remediation: Avenues in Nano and Biotechnology. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. – P. 1-33.
61. Polti M. A., Amoroso M. J., Abate C. M. Chromium (VI) resistance and removal by actinomycete strains isolated from sediments //Chemosphere. – 2007. – Vol. 67. – №. 4. – P. 660-667.
62. Prasad M. N. V., Hagemeyer J., Rengel Z. Heavy metals as essential nutrients //Heavy metal stress in plants: From molecules to ecosystems. – 1999. – P. 231-251.
63. Presentato A. K., Piacenza E., Turner R. J., Zannoni D., Cappelletti M. Processing of metals and metalloids by actinobacteria: cell resistance mechanisms and synthesis of metal (loid)-based nanostructures //Microorganisms. – 2020. – Vol. 8. – №. 12. – P. 2027.
64. Priya A. K., Gnanasekaran L., Dutta K., Rajendran S., Balakrishnan D., Soto-Moscoso M. Biosorption of heavy metals by microorganisms: Evaluation of different underlying mechanisms //Chemosphere. – 2022. – Vol. 307. – P. 135957.
65. Remenár M., Karellová E., Harichová J., Zámocký M., Krčová K., Ferianc P. Actinobacteria occurrence and their metabolic characteristics in the nickel-contaminated soil sample //Biologia. – 2014. – Vol. 69. – P. 1453-1463.
66. Reti W., Djoudi W., Djinni I., Belabbas H., Haddad S., Hamma A., Souagui S., Kecha M. Optimization of lead biosorption yield by *Streptomyces humidus* DBPb2 derived from a public waste dump using the response surface methodology //Water, Air, & Soil Pollution. – 2024. – Vol. 235. – №. 8. – P. 489.

67. Sahmoune M. N. Performance of *Streptomyces rimosus* biomass in biosorption of heavy metals from aqueous solutions // *Microchemical Journal*. – 2018. – Vol. 141. – P. 87-95.
68. Sahmoune M. N. Louhab K., Boukhiar A., Addad J., Barr S. Kinetic and equilibrium models for the biosorption of Cr (III) on *Streptomyces rimosus* // *Toxicological & Environmental Chemistry*. – 2009. – Vol. 91. – №. 7. – P. 1291-1303.
69. Sanjenbam P., Saurav K., Kannabiran K. Biosorption of mercury and lead by aqueous *Streptomyces VITSVK9* sp. isolated from marine sediments from the bay of Bengal, India // *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. – 2012. – Vol. 6. – P. 198-202.
70. Saurav K., Kannabiran K. Biosorption of Cd(II) and Pb(II) ions by aqueous solutions of novel alkalophilic *Streptomyces VITSVK5* spp. biomass // *Journal of Ocean University of China*. – 2011a. – Vol. 10. – № – P. 61-66.
71. Saurav K., Kannabiran K. Biosorption of Cr(III) and Cr(VI) by *Streptomyces VITSVK9* spp // *Annals of Microbiology*. – 2011b. – Vol. 61. – P. 833-841.
72. Selatnia A., Bakhti M. Z., Madani A., Kertous L., Mansouri Y. Biosorption of Cd²⁺ from aqueous solution by a NaOH-treated bacterial dead *Streptomyces rimosus* biomass // *Hydrometallurgy*. – 2004a. – Vol. 75. – №. 1-4. – P. 11-24.
73. Selatnia A., Boukazoula A., Kechid N., Bakhti M. Z., Chergui A., Kerchich Y. Biosorption of lead (II) from aqueous solution by a bacterial dead *Streptomyces rimosus* biomass // *Biochemical Engineering Journal*. – 2004b. – Vol. 19. – №. 2. – P. 127-135.
74. Selatnia A., Boukazoula A., Kechid N., Bakhti M. Z., Chergui A., Kerchich Y. Biosorption of Ni²⁺ from aqueous solution by a NaOH-treated bacterial dead *Streptomyces rimosus* biomass // *Minerals Engineering*. – 2004c. – Vol. 17, № 7-8. – P. 903-911.
75. Selatnia A., Boukazoula A., Kechid N., Bakhti M. Z., Chergui A. Biosorption of Fe³⁺ from aqueous solution by a bacterial dead *Streptomyces rimosus* biomass // *Process Biochemistry*. – 2004d. – Vol. 39. – № 11. – P. 1643-1651.
76. Selim M. S. M., Abdelhamid S. A., Mohamed S. S. Secondary metabolites and biodiversity of actinomycetes // *Journal of Genetic Engineering and biotechnology*. – 2021. – Vol. 19. – №. 1. – P. 72.
77. Sharma M., Dangi P., Choudhary M. Actinomycetes: source, identification, and their applications // *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. – 2014. – Vol. 3. – №. 2. – P. 801-832.

78. Simeonova A., Godjevargova T., Ivanova D. Biosorption of heavy metals by dead *Streptomyces fradiae* // *Environmental engineering science*. – 2008. – Vol. 25. – №. 5. – P. 627-634.
79. Tchounwou P. B., Yedjou C. G., Patlolla A. K., Sutton D. J. Heavy metal toxicity and the environment // *Molecular, clinical and environmental toxicology: volume 3: environmental toxicology*. – 2012. – P. 133-164.
80. Timková I., Sedláková-Kaduková J., Pristaš P. Biosorption and bioaccumulation abilities of actinomycetes/streptomycetes isolated from metal contaminated sites // *Separations*. – 2018. – Vol. 5. – №. 4. – P. 54.
81. Tulskeya E. M., Shashkov A. S., Streshinskaya G. M., Senchenkova S. N., Potekhina N. V., Kozlova Yu. I., Evtushenko L. I. Teichuronic and teichulosonic acids of actinomycetes // *Biochemistry (Moscow)*. – 2011. – Vol. 76. – № 7. – P. 736-744.
82. van Bergeijk D. A., Augustijn H. E, Elsayed S. S., Willemse J., Carrión V. J., Du C., Urem M., Grigoreva L. V., Cheprasov M. Y. et al. Taxonomic and metabolic diversity of Actinomycetota isolated from faeces of a 28,000-year-old mammoth // *Environmental Microbiology*. – 2024. – Vol. 26. – №. 2. – P. e16589.
83. Veneu D. M., Torem M. L., Pino G. A. H. Fundamental aspects of copper and zinc removal from aqueous solutions using a *Streptomyces lunalinharesii* strain // *Minerals Engineering*. – 2013. – Vol. 48. – P. 44-50.
84. Wang J., Chen C. Biosorbents for heavy metals removal and their future // *Biotechnology advances*. – 2009. – Vol. 27. – №. 2. – P. 195-226.
85. Williams S. T., Wellington E. M. H. Actinomycetes // *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*. – 1982. – Vol. 9. – P. 969-987.
86. Yeager C. M., Gallegos-Graves L., Dunbar J., Hesse C. N., Daligault H., Kuske C. R. Polysaccharide degradation capability of Actinomycetales soil isolates from a semiarid grassland of the Colorado Plateau // *Applied and environmental microbiology*. – 2017. – Vol. 83. – №. 6. – P. e03020-16.
87. Yuan H., Zhang J., Lu Z., Min H., Wu C. Studies on biosorption equilibrium and kinetics of Cd²⁺ by *Streptomyces* sp. K33 and HL-12 // *Journal of Hazardous Materials*. – 2009. – Vol. 164. – №. 2-3. – P. 423-431.
88. Zabermawi N. O, Bakran F. M, Jastaniah S. D, Noor S. O, Aly M. M. Biosorption of Chromium Ions by *Streptomyces Mutabilis* Isolated from Industrial Wastewater Treatment Plant. *Biosc.Biotech.Res.Comm.* – 2021. – №. 14(2).
89. Zabochnicka-Świątek M., Krzywonos M. Potentials of biosorption and bioaccumulation processes for heavy metal removal // *Polish Journal of Environmental Studies*. – 2014. – Vol. 23. – №. 2.

90. Zamora-Quintero A. Y., Torres-Beltrán M., Guillén Matus D. G., Oroz-Parra I., Millán-Aguíñaga N. Rare actinobacteria isolated from the hypersaline Ojo de Liebre Lagoon as a source of novel bioactive compounds with biotechnological potential // *Microbiology*. – 2022. – Vol. 168. – №. 2. – P. 001144.

91. Zenova G. M., Dubrova M. S., Zvyagintsev D. G. Structural-functional specificity of the complexes of psychrotolerant soil actinomycetes // *Eurasian Soil Science*. – 2010. – Vol. 43. – P. 447-452.

References

1. Antonova Yu. A., Safonova M. A. Heavy metals in urban soils // *Fundamental Research*. – 2007. – №11. – P. 43-44.

2. Bauer T. V., Linnik V. G., Minkina T. M., Mandzhieva S. S., Nevidomskaya D. G. Ecological and geochemical studies of technogenic soils in floodplain landscapes of the Seversky Donets (Lower Don basin) // *Geochemistry International*. – 2018. – №. 10. – P. 956-966.

3. Bauer T. V., Minkina T. M., Mandzhieva S. S., Chaplygin V. A., Nevidomskaya D. G., Sushkova S. N., Bakoev S. Yu. Background content and speciation of zinc, copper and lead compounds in ordinary chernozem of natural landscapes of Rostov oblast // *Melioration and Water Management*. – 2015. – №. 4 (20). – P. 186-199.

4. Vodyanitsky Yu. N. Soil contamination with heavy metals and metalloids and their ecological hazard (analytical review) // *Eurasian Soil Science*. – 2013. – Vol. 46, №. 7. – P. 872-872.

5. Vodyanitsky Yu. N. Standards for the content of heavy metals and metalloids in soils // *Eurasian Soil Science*. – 2012. – Vol. 45, №. 3. – P. 368-368.

6. Vodyanitsky Yu. N. Heavy and superheavy metals and metalloids in contaminated soils. – 2009.

7. Vodyanitsky Yu. N. Heavy metals and metalloids in soils. – Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 2008. – Vol. 86.

8. Zvyagintsev D. G., Zenova G. M. Ecology of actinomycetes. – Moscow: GEOS, 2001. – 256 p.

9. Zenova G. M. Soil actinomycetes. – Moscow: Moscow State University Publ., 1992. – 78 p.

10. Zenova G. M., Manucharova N. A., Zvyagintsev D. G. Extremophilic and extremotolerant actinomycetes in soils of different types // *Eurasian Soil Science*. – 2011. – Vol. 44, No. 4. – P. 457-478.

11. Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants: Translated from English. – Moscow: Mir, 1989. – 439 p.

12. Kocharovskaya Yu. N. et al. Study of microbial communities of chemozems of Lake Atamanskoye, Rostov Region // VII Pushchino Conference "Biochemistry, Physiology and Biosphere Role of Microorganisms". School-conference for young scientists, graduate students and students "Genetic technologies in microbiology and microbial diversity". – 2021. – P. 60-62.
13. Korchagina K. V., Smagin A. V., Reshetina T. V. Assessment of technogenic pollution of urban soils based on the profile distribution of heavy metals and bulk density // Eurasian Soil Science. – 2014. – Vol. 47, №. 8. – P. 988-988.
14. Perelomov L. V., Perelomova I. V., Pinsky D. L. Molecular mechanisms of interaction between microelements and microorganisms in bio-inert systems (biosorption and bioaccumulation) // Agrochemistry. – 2013. – № 3. – P. 80-94.
15. Skugoreva S. G., Ashikhmina T. Ya., Fokina A. I., Lyalina E. I. Chemical basis of the toxic effect of heavy metals (review) // Theoretical and Applied Ecology. – 2016. – №. 1. – P. 4-13.
16. Skugoreva S. G., Kantor G. Ya., Domracheva L. I. Evaluation of the sorption efficiency of lead (II) ions using models of sorption kinetics and isotherms // Theoretical and Applied Ecology. – 2021. – №. 3. – P. 44-51.
17. Shirokikh I. G., Solovieva E. S., Ashikhmina T. Ya. Actinomycete complexes in soils of the industrial and residential zones of Kirov // Eurasian Soil Science. – 2014. – №. 2. – P. 203–203.
18. Abd El-Motaleb M., Abd El-Motaleb M. M., El-Sabbagh S. M., Mohamed W. S. E., Wafy K. R. Biosorption of Cu²⁺, Pb²⁺ and Cd²⁺ from wastewater by dead biomass of *Streptomyces cyaneus* Kw42 // Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci. – 2020. – Vol. 9. – P. 422-435.
19. Abdu N., Abdullahi A. A., Abdulkadir A. Heavy metals and soil microbes // Environmental chemistry letters. – 2017. – Vol. 15. – №. 1. – P. 65-84.
20. Alam K., Mazumder A., Sikdar S., Zhao Y.-M., Hao J., Song C., Wang Y., Sarkar R., Islam S., Zhang Y. et al. *Streptomyces*: The biofactory of secondary metabolites // Frontiers in Microbiology. – 2022. – Vol. 13. – P. 968053.
21. Alori E. T. et al. Bioremediation techniques as affected by limiting factors in soil environment // Frontiers in Soil Science. – 2022. – V. 2. – P. 937186.
22. Álvarez A., Catalano S. A., Amoroso M. J. Heavy metal resistant strains are widespread along *Streptomyces* phylogeny // Molecular Phylogenetics and Evolution. – 2013. – Vol. 66. – №. 3. – P 1083-1088.
23. Bagchi D., Stohs S J., Downs B. W., Bagchi M., Preuss H. G. Cytotoxicity and oxidative mechanisms of different forms of chromium // Toxicology. – 2002. – Vol. 180. – №. 1. – P. 5-22.

24. Barka E. A., Vatsa P., Sanchez L., Gaveau-Vaillant N., Jacquard C., Klenk H.-P., Clément C., Ouhdouch Y., Gilles van Wezel P. Taxonomy, Physiology, and Natural Products of Actinobacteria // *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. – 2015. – Vol. 80, №1 – P. 1-43.
25. Bhatti A. A., Haq S., Bhat R. A. Actinomycetes benefaction role in soil and plant health // *Microbial pathogenesis*. – 2017. – Vol. 111. – P. 458-467.
26. Chaudhary H. S., Soni B., Shrivastava A. R., Shrivastava S. Diversity and versatility of actinomycetes and its role in antibiotic production // *Journal of Applied Pharmaceutical Science*. – 2013. – Vol. 3. – №. 8 – P. S83-S94.
27. Djinni I., Djoudi W. Streptomyces sp. WR1L1S8 a potent endophytic marine strain for heavy metal resistance and copper removal enhanced by RSM modeling // *Acta Ecologica Sinica*. – 2022. – Vol. 42. – №. 2. – P. 80-89.
28. El-Gendy M. M. A. A., El-Bondkly A. M. A. Evaluation and enhancement of heavy metals bioremediation in aqueous solutions by Nocardiosis sp. MORSY1948, and Nocardia sp. MORSY2014 // *Brazilian journal of microbiology*. – 2016. – Vol. 47. – №. 3. – P. 571-586.
29. Gadd G. M., Griffiths A. J. Microorganisms and heavy metal toxicity // *Microbial ecology*. – 1977. – Vol. 4. – P. 303-317.
30. Genchi G., Sinicropi M. S., Lauria G., Carocci A., Catalano A. The effects of cadmium toxicity // *International journal of environmental research and public health*. – 2020. – Vol. 17. – №. 11. – P. 3782.
31. Hamdan A. M., Abd-El-Mageed H., Ghanem N. Biological treatment of hazardous heavy metals by Streptomyces rochei ANH for sustainable water management in agriculture // *Scientific reports*. – 2021. – V. 11. – №. 1. – P. 9314.
32. Hamedi J., Dehghani M., Mohammadipanah F. Isolation of extremely heavy metal resistant strains of rare actinomycetes from high metal content soils in Iran // *International Journal of Environmental Research*. – 2015. – Vol. 9. – №. 2. – P. 475-480.
33. Hemmat-Jou M. H., Safari-Sinegani A. A., Mirzaie-Asl A., Tahmourespour A. Analysis of microbial communities in heavy metals-contaminated soils using the metagenomic approach // *Ecotoxicology*. – 2018. – Vol. 27. – №. 9. – P. 1281-1291.
34. Hur M., Park S. J. Identification of microbial profiles in heavy-metal-contaminated soil from full-length 16s rRNA reads sequenced by a pacbio system // *Microorganisms*. – 2019. – Vol. 7. – №. 9. – P. 357.

35. Jan A. T., Azam M., Siddiqui K., Ali A., Choi I., Haq Q. M. R. Heavy metals and human health: mechanistic insight into toxicity and counter defense system of antioxidants //International journal of molecular sciences. – 2015. – Vol. 16. – №. 12. – P. 29592-29630.
36. Järup L. Hazards of heavy metal contamination //British medical bulletin. – 2003. – Vol. 68. – №. 1. – P. 167-182
37. Javed Z., Tripathi G. D., Mishra M., Dashora K. Actinomycetes—the microbial machinery for the organic-cycling, plant growth, and sustainable soil health //Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. – 2021. – Vol. 31. – P. 101893.
38. Jue J., Zhang D., Cao M., Li Y., Liang Q., Liu F., Dong Y. Q. Response of microbial community composition and function to land use in mining soils of Xikuang Mountain in Hunan //Plos one. – 2024. – Vol. 19. – №. 5. – P. e0299550.
39. Kannabiran K. Actinobacteria are better bioremediating agents for removal of toxic heavy metals: an overview //International Journal of Environmental Technology and Management. – 2017. – Vol. 20. – №. 3-4. – P. 129-138.
40. Khushboo P., Kumar P., Dubey K. K., Usmani Z., Sharma M., Gupta V. K. Biotechnological and industrial applications of Streptomyces metabolites //Biofuels, Bioproducts and Biorefining. – 2022. – Vol. 16. – №. 1. – P. 244-264.
41. Kirby R. Actinomycetes and lignin degradation //Advances in applied microbiology. – 2005. – Vol. 58. – P. 125-168.
42. Kirova G. K., Velkova Z. Y., Stoytcheva M. S., Gochev V. K. Zinc Biosorption by Waste Streptomyces fradiae Biomass: Equilibrium and Kinetics //Ecologia Balkanica. – 2015. – Vol. 7. – №. 2. – P. 63-72.
43. Kumari S., Agrawal N. K., Agarwal A., Kumar A., Malik N., Goyal D., Rajput V. D., Minkina T., Sharma P., Garg M. C. A prominent Streptomyces sp. biomass-based biosorption of zinc (II) and lead (II) from aqueous solutions: Isotherm and kinetic //Separations. – 2023. – Vol. 10. – №. 7. – P. 393.
44. Langmuir I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum //Journal of the American Chemical society. – 1918. – Vol. 40. – №. 9. – P. 1361-1403.
45. Latha S., Vinothini G., Dhanasekaran D. Chromium [Cr (VI)] biosorption property of the newly isolated actinobacterial probiont Streptomyces werraensis LD22 //3 Biotech. – 2015. – Vol. 5. – P. 423-432.
46. Li H., Lin Y., Guan W., Chang J., Xu L., Guo J., Wei G. Biosorption of Zn(II) by live and dead cells of Streptomyces ciscaucasicus strain CCNWHX 72-14 //Journal of hazardous materials. – 2010. – V. 179. – №. 1-3. – P. 151-159.

47. Lin Y., Wang X., Wang B., Mohamad O., Wei G. Bioaccumulation characterization of zinc and cadmium by *Streptomyces zinciresistens*, a novel actinomycete // *Ecotoxicology and environmental safety*. – 2012. – Vol. 77. – P. 7-17.
48. Lipman C. B., Burgess P. S. The Effect of Copper, Zinc, Iron and Lead Salts on Ammonification and Nitrification in Soils. – University of California Press, 1914. – Vol. 1.
49. Long J., Gao X., Su M., Li H., Chen D., Zhou S. Performance and mechanism of biosorption of nickel(II) from aqueous solution by non-living *Streptomyces roseorubens* SY // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2018. – Vol. 548. – P. 125-133.
50. Mameri N., Boudries N., Addour L., Belhocine D., Lounici H., Grib H., Pauss A. Batch zinc biosorption by a bacterial nonliving *Streptomyces rimosus* biomass // *Water research*. – 1999. – Vol. 33. – №. 6. – P. 1347-1354.
51. Manucharova N. A. The microbial destruction of chitin, pectin, and cellulose in soils // *Eurasian Soil Science*. – 2009. – Vol. 42. – P. 1526-1532.
52. Martinet L., Naômé A., Rezende L. C. D., Tellatin D., Pignon B., Docquier J.-D., Sannio F., Baiwir D., Mazzucchelli G., Frédérick M. Lunaemycins, new cyclic hexapeptide antibiotics from the cave moonmilk-dweller *Streptomyces lunaelactis* MM109T // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2023. – Vol. 24. – №. 2. – P. 1114.
53. Millán-Aguñaga N., Soldatou S., Brozio S., Munnoch J. T., Howe J., Hoskisson P. A., Duncan K. R. Awakening ancient polar Actinobacteria: diversity, evolution and specialized metabolite potential // *Microbiology*. – 2019. – Vol. 165. – №. 11. – P. 1169-1180.
54. Morais S., E Costa F. G., Lourdes Pereir M. D. Heavy metals and human health // *Environmental health—emerging issues and practice*. – 2012. – Vol. 10. – №. 1. – P. 227-245.
55. Mosbah R., Sahmoune M. Biosorption of heavy metals by *Streptomyces* species—an overview // *Open Chemistry*. – 2013. – Vol. 11. – №. 9. – P. 1412-1422.
56. Mustapha M. U., Halimoon N. Microorganisms and biosorption of heavy metals in the environment: a review paper // *J. Microb. Biochem. Technol.* – 2015. – Vol. 7. – №. 5. – P. 253-256.
57. Nikitin D. A., Lysak L. V., Kutovaya O. V., Gracheva T. A. Ecological-trophic structure and taxonomic characteristics of the communities of soil microorganisms in the northern part of the Novaya Zemlya Archipelago // *Eurasian Soil Science*. – 2021. – Vol. 54. – P. 1689-1704.

58. Öztürk A., Artan T., Ayar A. Biosorption of nickel(II) and copper(II) ions from aqueous solution by *Streptomyces coelicolor* A3 (2) //Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. – 2004. – Vol. 34. – №. 2. – P. 105-111.
59. Pathom-Aree W., Stach J. E. M., Ward A. C., Horikoshi K., Bull A. T., Goodfellow M. Diversity of actinomycetes isolated from Challenger Deep sediment (10,898 m) from the Mariana Trench //Extremophiles. – 2006. – Vol. 10. – P. 181-189.
60. Pattapulavar V., Christopher J. G. The role of actinomycetes in a cleaner environment //Sustainable Environmental Remediation: Avenues in Nano and Biotechnology. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. – P. 1-33.
61. Polti M. A., Amoroso M. J., Abate C. M. Chromium (VI) resistance and removal by actinomycete strains isolated from sediments //Chemosphere. – 2007. – Vol. 67. – №. 4. – P. 660-667.
62. Prasad M. N. V., Hagemeyer J., Rengel Z. Heavy metals as essential nutrients //Heavy metal stress in plants: From molecules to ecosystems. – 1999. – P. 231-251.
63. Presentato A. K., Piacenza E., Turner R. J., Zannoni D., Cappelletti M. Processing of metals and metalloids by actinobacteria: cell resistance mechanisms and synthesis of metal (loid)-based nanostructures //Microorganisms. – 2020. – Vol. 8. – №. 12. – P. 2027.
64. Priya A. K., Gnanasekaran L., Dutta K., Rajendran S., Balakrishnan D., Soto-Moscoso M. Biosorption of heavy metals by microorganisms: Evaluation of different underlying mechanisms //Chemosphere. – 2022. – Vol. 307. – P. 135957.
65. Remenár M., Karelová E., Harichová J., Zámocký M., Krčová K., Ferianc P. Actinobacteria occurrence and their metabolic characteristics in the nickel-contaminated soil sample //Biologia. – 2014. – Vol. 69. – P. 1453-1463.
66. Reti W., Djoudi W., Djinni I., Belabbas H., Haddad S., Hamma A., Souagui S., Kecha M. Optimization of lead biosorption yield by *Streptomyces humidus* DBPb2 derived from a public waste dump using the response surface methodology //Water, Air, & Soil Pollution. – 2024. – Vol. 235. – №. 8. – P. 489.
67. Sahmoune M. N. Performance of *Streptomyces rimosus* biomass in biosorption of heavy metals from aqueous solutions //Microchemical Journal. – 2018. – Vol. 141. – P. 87-95.
68. Sahmoune M. N. Louhab K., Boukhiar A., Addad J., Barr S. Kinetic and equilibrium models for the biosorption of Cr (III) on *Streptomyces rimosus*

//Toxicological & Environmental Chemistry. – 2009. – Vol. 91. – №. 7. – P. 1291-1303.

69. Sanjenbam P., Saurav K., Kannabiran K. Biosorption of mercury and lead by aqueous Streptomyces VITSVK9 sp. isolated from marine sediments from the bay of Bengal, India // Frontiers of Chemical Science and Engineering. – 2012. – Vol. 6. – P. 198-202.

70. Saurav K., Kannabiran K. Biosorption of Cd(II) and Pb(II) ions by aqueous solutions of novel alkalophilic Streptomyces VITSVK5 spp. biomass // Journal of Ocean University of China. – 2011a. – Vol. 10. – № – P. 61-66.

71. Saurav K., Kannabiran K. Biosorption of Cr(III) and Cr(VI) by Streptomyces VITSVK9 spp // Annals of Microbiology. – 2011b. – Vol. 61. – P. 833-841.

72. Selatnia A., Bakhti M. Z., Madani A., Kertous L., Mansouri Y. Biosorption of Cd²⁺ from aqueous solution by a NaOH-treated bacterial dead Streptomyces rimosus biomass // Hydrometallurgy. – 2004a. – Vol. 75. – №. 1-4. – P. 11-24.

73. Selatnia A., Boukazoula A., Kechid N., Bakhti M. Z., Chergui A., Kerchich Y. Biosorption of lead (II) from aqueous solution by a bacterial dead Streptomyces rimosus biomass // Biochemical Engineering Journal. – 2004b. – Vol. 19. – №. 2. – P. 127-135.

74. Selatnia A., Boukazoula A., Kechid N., Bakhti M. Z., Chergui A., Kerchich Y. Biosorption of Ni²⁺ from aqueous solution by a NaOH-treated bacterial dead Streptomyces rimosus biomass // Minerals Engineering. – 2004c. – Vol. 17, № 7-8. – P. 903-911.

75. Selatnia A., Boukazoula A., Kechid N., Bakhti M. Z., Chergui A. Biosorption of Fe³⁺ from aqueous solution by a bacterial dead Streptomyces rimosus biomass // Process Biochemistry. – 2004d. – Vol. 39. – № 11. – P. 1643-1651.

76. Selim M. S. M., Abdelhamid S. A., Mohamed S. S. Secondary metabolites and biodiversity of actinomycetes // Journal of Genetic Engineering and biotechnology. – 2021. – Vol. 19. – №. 1. – P. 72.

77. Sharma M., Dangi P., Choudhary M. Actinomycetes: source, identification, and their applications // International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. – 2014. – Vol. 3. – №. 2. – P. 801-832.

78. Simeonova A., Godjevargova T., Ivanova D. Biosorption of heavy metals by dead Streptomyces fradiae // Environmental engineering science. – 2008. – Vol. 25. – №. 5. – P. 627-634.

79. Tchounwou P. B., Yedjou C. G., Patlolla A. K., Sutton D. J. Heavy metal toxicity and the environment //Molecular, clinical and environmental toxicology: volume 3: environmental toxicology. – 2012. – P. 133-164.
80. Timková I., Sedláková-Kaduková J., Pristaš P. Biosorption and bioaccumulation abilities of actinomycetes/streptomycetes isolated from metal contaminated sites //Separations. – 2018. – Vol. 5. – №. 4. – P. 54.
81. Tulskeya E. M., Shashkov A. S., Streshinskaya G. M., Senchenkova S. N., Potekhina N. V., Kozlova Yu. I., Evtushenko L. I. Teichuronic and teichulosonic acids of actinomycetes // Biochemistry (Moscow). – 2011. – Vol. 76. – № 7. – P. 736-744.
82. van Bergeijk D. A., Augustijn H. E, Elsayed S. S., Willemse J., Carrión V. J., Du C., Urem M., Grigoreva L. V., Cheprasov M. Y. et al. Taxonomic and metabolic diversity of Actinomycetota isolated from faeces of a 28,000-year-old mammoth //Environmental Microbiology. – 2024. – Vol. 26. – №. 2. – P. e16589.
83. Veneu D. M., Torem M. L., Pino G. A. H. Fundamental aspects of copper and zinc removal from aqueous solutions using a Streptomyces lunalinharesii strain //Minerals Engineering. – 2013. – Vol. 48. – P. 44-50.
84. Wang J., Chen C. Biosorbents for heavy metals removal and their future //Biotechnology advances. – 2009. – Vol. 27. – №. 2. – P. 195-226.
85. Williams S. T., Wellington E. M. H. Actinomycetes //Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties. – 1982. – Vol. 9. – P. 969-987.
86. Yeager C. M., Gallegos-Graves L., Dunbar J., Hesse C. N., Daligault H., Kuske C. R. Polysaccharide degradation capability of Actinomycetales soil isolates from a semiarid grassland of the Colorado Plateau //Applied and environmental microbiology. – 2017. – Vol. 83. – №. 6. – P. e03020-16.
87. Yuan H., Zhang J., Lu Z., Min H., Wu C. Studies on biosorption equilibrium and kinetics of Cd²⁺ by Streptomyces sp. K33 and HL-12 //Journal of Hazardous Materials. – 2009. – Vol. 164. – №. 2-3. – P. 423-431.
88. Zabermawi N. O, Bakran F. M, Jastaniah S. D, Noor S. O, Aly M. M. Biosorption of Chromium Ions by Streptomyces Mutabilis Isolated from Industrial Wastewater Treatment Plant. Biosc.Biotech.Res.Comm. – 2021. – №. 14(2).
89. Zabochnicka-Świątek M., Krzywonos M. Potentials of biosorption and bioaccumulation processes for heavy metal removal //Polish Journal of Environmental Studies. – 2014. – Vol. 23. – №. 2.

90. Zamora-Quintero A. Y., Torres-Beltrán M., Guillén Matus D. G., Oroz-Parra I., Millán-Aguiñaga N. Rare actinobacteria isolated from the hypersaline Ojo de Liebre Lagoon as a source of novel bioactive compounds with biotechnological potential //Microbiology. – 2022. – Vol. 168. – №. 2. – P. 001144.
91. Zenova G. M., Dubrova M. S., Zvyagintsev D. G. Structural-functional specificity of the complexes of psychrotolerant soil actinomycetes //Eurasian Soil Science. – 2010. – Vol. 43. – P. 447-452.

RESISTANCE OF ACTINOMYCETES TO HEAVY METALS AND THEIR BIOSORPTION CAPABILITY

Chaykina A.P.¹

¹Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

*Chaykina@sfedu.ru**

ORCID: 0009-0002-6449-7813

Abstract

The review examines the ecological, morphological, and biochemical features of actinomycetes that make them promising candidates for the biosorption of heavy metals (HM). Particular attention is paid to the mechanisms of actinomycete resistance to HM and their role in natural and anthropogenically disturbed ecosystems. The review summarizes experimental data on the biosorption efficiency of various actinomycete strains towards several priority pollutant heavy metals, such as lead, cadmium, zinc, copper, and chromium. The article analyzes literature data on the biosorption capacity of various strains, which have demonstrated removal efficiencies of up to 80-100% under optimized conditions. The economic feasibility of using actinomycete biomass, including waste from the pharmaceutical industry, is noted. Actinomycetes are considered as effective biosorbents for the remediation of heavy metal-contaminated soils and wastewater.

Keywords

Actinomycetes; heavy metals; biosorption; *Streptomyces*.

Статья поступила в редакцию 10 июня 2026 г.

Поступила после доработки 24 июня 2026 г.

Принята к печати 28 июня 2026 г.

Received 10, June, 2026

Revised 24, June, 2026

Accepted 28, June, 2026