

Обзорная статья

УДК 631.46:631.95:579.262

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2026-1-64-86>

БАКТЕРИИ В ТЕХНОЛОГИЯХ БИОРЕМЕДИАЦИИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ

Н. В. Сырчина ^{1✉}, Л. В. Пилип ², Т. Я. Ашихмина ^{1,3}

¹ Вятский государственный университет

Россия, 610000, г. Киров, ул. Московская, д. 36

² Вятский государственный агротехнологический университет

Россия, 610017, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133

³ Институт биологии Коми научного центра УрО РАН

Россия, 167982, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28

Поступила в редакцию 04.08.2025 г., после доработки 04.09.2025 г., принята 04.09.2025 г., опубликована 31.03.2026 г.

Аннотация. Защита почв от загрязнения и восстановление их природных функций входит в число важнейших задач устойчивого развития. В настоящее время учеными разных стран проводятся активные исследования, направленные на поиск наилучших технологий ремедиации загрязненных территорий. Перспективными в этом отношении могут стать технологии биоремедиации, предполагающие использование различных микроорганизмов (МО), в частности бактерий, для разрушения или инактивации загрязняющих веществ. Бактерии имеют весьма пластичный генетический аппарат. Благодаря мутационному процессу в геноме этих МО появляются новые гены, позволяющие не только выживать в загрязненной среде, но и использовать ксенобиотики для получения энергии и пластических веществ. Наибольший интерес в качестве агентов биоремедиации могут представлять бактерии, относящиеся к типам Firmicutes, Proteobacteria, Actinobacteria и Cyanobacteria. Эффективные штаммы этих бактерий способны инактивировать тяжелые металлы, разрушать нефтяные углеводороды, ароматические соединения, пестициды, фармацевтические препараты, красители, синтетические полимеры и другие поллютанты. Метаболические возможности бактерий могут быть расширены и усилены за счет редактирования их генома и создания искусственных саморегулирующихся консорциумов, включающих симбиотические МО, реализующие разные метаболические пути. Серьезным препятствием на пути широкого внедрения технологий биоремедиации в практику является недостаточная устойчивость и жизнеспособность выращенных в биореакторах штаммов в природной среде. Повышению стабильности и эффективности микробных технологий может способствовать использование новейших достижений геномной и клеточной инженерии, интеллектуальных материалов, возможностей адресной доставки микроорганизмов-деструкторов и интеллектуального мониторинга.

Ключевые слова: почвы, бактерии, биоремедиация, биodeградация, микроорганизмы-биодеструкторы, агенты биоремедиации, ксенобиотики

Соблюдение этических норм. Исследования проводили без использования животных и без привлечения людей в качестве испытуемых.

✉ Для корреспонденции. Лаборатория биомониторинга Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук и Вятского государственного университета.

ORCID и e-mail адреса: Сырчина Надежда Викторовна: <https://orcid.org/0000-0001-9695-7146>, nvms1956@mail.ru; Пилип Лариса Валентиновна: <https://orcid.org/0000-0001-8049-6760>, pilip_larisa@mail.ru; Ашихмина Тамара Яковлевна: <https://orcid.org/0000-0003-4919-0047>, ecolab2@gmail.com.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Сырчина Н. В., Пилип Л. В., Ашихмина Т. Я. Бактерии в технологиях биоремедиации загрязненных почв // Поволжский экологический журнал. 2026. № 1. С. 64 – 86. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2026-1-64-86>

ВВЕДЕНИЕ

Быстрое увеличение численности населения, сопровождающееся интенсивной эксплуатацией природных ресурсов и наращиванием объемов производства, приводит к резкому возрастанию экологической нагрузки на окружающую среду (ОС). Особую тревогу вызывает стремительная деградация почв, являющихся уникальным природным ресурсом, обеспечивающим сельскохозяйственное производство, сохранение биологического разнообразия, адаптацию биосферы к климатическим изменениям, обезвреживание широкого спектра загрязняющих веществ (ЗВ). Деградиционные процессы приводят к утрате основного функционального свойства данного природного объекта – почвенного плодородия. Одним из основных типов деградации почвенного покрова является загрязнение (Syrchina et al., 2022; Pilip et al., 2023). В процессе хозяйственной деятельности в почве накапливаются соединения тяжелых металлов (ТМ), нефтяные углеводороды, пестициды, микропластик, фармацевтические препараты, радиоактивные отходы и другие ксенобиотики. Многие ЗВ отличаются высокой химической устойчивостью, способностью передаваться по пищевым цепям и накапливаться в растительных и животных тканях (Arihilam, Arihilam, 2019; Pilip et al., 2022; Syrchina et al., 2024). Стремительно прогрессирующие масштабы загрязнения резко обострили проблему ремедиации (санации, рекультивации) земель и возвращения их в хозяйственный оборот. Для удаления ЗВ из почвы или перевода их в менее опасные формы используют физические, химические и биологические методы. Выбор метода определяется комплексом факторов, включая специфику и степень загрязнения, особенности почвенного покрова, гидрогеологические и климатические условия местности, целевое назначение территорий, уровень затрат на реализацию метода, возможные экологические выгоды и риски, а также действующее законодательство и нормативные требования к качеству рекультивированных земель (Jacob et al., 2025; Rasul et al., 2025). Биологические методы очистки, по сравнению с физическими и химическими, считаются более экологичными, эффективными и экономичными, однако имеют ряд существенных недостатков, включая низкую скорость биодеградации ЗВ и ограниченные адаптационные возможности живых организмов к неблагоприятным условиям. Несмотря на указанные недостатки, технологии биорекультивации (биоремедиации) привлекают все большее внимание ученых и специалистов в области экологии, биотехнологии и сельского хозяйства.

Для биологической очистки земель используют устойчивые к ЗВ микроорганизмы (бактерии, грибы, водоросли, археи), растения, а также некоторых животных (червей, насекомых и др.). Преимуществом микроорганизмов (МО), как агентов биоремедиации (АБМ), является быстрый рост, значительный адаптационный

потенциал, высокая метаболическая активность, способность разрушать широкий спектр ЗВ и принимать непосредственное участие в почвообразовательных процессах (Ayilaga, Babalola, 2023; Kondakova et al., 2025). В настоящее время проблема ремедиации загрязненных почв с помощью МО оценивается как «горячая область исследований» в сфере защиты ОС и устранения экологических угроз (Abatenh et al., 2017). Ежегодно публикуются сотни работ, в которых рассматриваются те или иные аспекты применения различных групп МО для очистки почв. Настоящая статья посвящена обзору публикаций о перспективах использования в качестве агентов биоремедиации самой большой группы МО – бактерий.

Цель работы – систематизировать и обобщить результаты научных исследований, посвященных достижениям мировой науки и практики в области использования бактерий для биодegradации ЗВ и биоремедиации загрязненных почв.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Статья представляет собой обзор актуальных научных публикаций, посвященных вопросам биодegradации ЗВ и биоремедиации загрязненных почв с помощью естественных и генномодифицированных штаммов бактерий. Понятия «биодegradация» и «биоремедиация» в контексте настоящей статьи в основном используется применительно к процессам с участием МО, в частности бактерий. В обзор включены опубликованные в период с 2010 по 2025 гг. рецензируемые статьи, рассчитанные на профессиональную аудиторию. При отборе источников учитывали используемую авторами методологию исследований и практическую значимость полученных данных. Особое внимание уделено работам, содержащим результаты экспериментальных исследований и оригинальные научные факты. Для поиска релевантной информации применяли сервисы Академия Google, Google Scholar, Scopus, Web of Science, eLIBRARY, Кибер Ленинка, «Scholar.ru». Алгоритм поиска в поисковых системах задавали с помощью ключевых слов: биоремедиация, биодegradация, биодеструкция, а также сочетания ключевых слов на основе их тематической и смысловой связи: агенты биоремедиации, микроорганизмы-биодеструкторы, биоремедиация загрязненных почв, биодеструкция ксенобиотиков в почве. Для расширения поискового поля использовали ключевые слова и словосочетания, приводимые в научных статьях схожей тематики. Ключевые слова вводили в поисковые системы на русском и английском языках. Основное внимание в настоящем обзоре уделено эффективным штаммам различных групп бактерий, принимающим участие в дegradации ксенобиотиков, а также проблемам, возникающим при внедрении технологий биоремедиации в практику.

Биодegradация загрязняющих веществ и биоремедиация загрязненных почв

Термин «биодegradация» («биотическая дegradация») в научных публикациях широко используют для обозначения практически любых изменений субстрата, обусловленных жизнедеятельностью живых организмов. Ключевую роль в процессах биодegradации играют МО, способные удалять или переводить ЗВ в менее токсичные формы за счет деструкции, трансформации или иммобилизации (Sales

da Silva et al., 2020; Fouad et al., 2023). Биодegradация ЗВ является важнейшим условием биоремедиации загрязненных почв, т. е. восстановления их экологических и хозяйственных функций безопасными биологическими методами. Следует отметить, что микробиологическая очистка почв от ЗВ с той или иной скоростью протекает в природе и без участия человека (термины: биоаттенуация, естественная биоремедиация, естественная биодegradация, угасание, затухание), однако разработка и внедрение специальных приемов и методов, основанных на достижениях молекулярной биологии, биотехнологии и экологии, позволяют значительно ускорить и оптимизировать соответствующий процесс (Kensa, 2011; Mathew et al., 2017). Повышению интереса к биоремедиации деградированных земель способствуют новейшие достижения в области геномного, метагеномного и биоинформационного анализа экологически значимых МО, благодаря которым удается сформировать более детальную картину биодegradационных механизмов и метаболических путей, реализуемых в микробных клетках (Mbachu et al., 2020; Koh, Khor, 2023). Исследования последних лет показали, что понимание и управление процессом биодegradации ЗВ невозможно без точной идентификации МО, принимающих в нем непосредственное или опосредованное участие, а также без выявления связей и отношений между участниками биодegradационных процессов и их реакций на условия ОС. Соответствующие знания необходимы для подбора штаммов, пригодных для устранения тех или иных загрязнений; формирования эффективных саморегулирующихся консорциумов МО, активно разлагающих не только ЗВ, но и промежуточные продукты деструкции; создания оптимальных условий, позволяющих раскрыть потенциал МО максимально полно; минимизации возможных негативных экологических последствий биоаугментации (Khalid, Elsherif, 2022; Zhang, Zhang, 2022).

Перспективные для восстановления почв МО могут быть выделены из природных источников и использованы в биотехнологических процессах. Применение традиционных (селекция, скрининг) и новейших (клеточная и генная инженерия) методов позволяет повысить и расширить метаболическую активность штаммов и адаптировать их к конкретным условиям и субстратам. Увеличению возможностей биоремедиации способствуют нанотехнологии, позволяющие оптимизировать метаболические функции МО и «включить» их в переработку субстратов, содержащих устойчивые и опасные ЗВ (Firincă et al., 2025; Syarifuddin et al., 2025).

В настоящее время наиболее широкое практическое применение для биологической очистки почв от ЗВ находят методы компостирования (складирование загрязненной почвы в биокучи – *biopiles*, или специальные емкости – баки, компостеры, биореакторы, в которых обеспечиваются оптимальные условия для жизнедеятельности населяющих почву МО-деструкторов) и биостимуляции (обогащение почвы компонентами, способствующими активации метаболизма и увеличению численности микробной популяции). Весьма перспективными, но технически более сложными и затратными считаются технологии биоаугментации (внесение в почву МО, инактивирующихся и разрушающих ЗВ); биовентиляции (закачивание в подземную среду кислорода для активации аэробной биодеструкции органических ЗВ), биопленочные технологии (формирование консорциумов МО в виде стабиль-

ных биопленок на поверхности твердых частиц почвы); применение биосурфактантов (введение в очищаемый субстрат поверхностно-активных веществ, повышающих биодоступность ЗВ для микробиоты); а также комбинированные методики рекультивации почв с использованием МО и вспомогательных веществ (например, наноразмерных и/или умных материалов) (Tyagi et al., 2011; Gong et al., 2018; Mishra et al., 2021). Согласно имеющимся оценкам, расходы на биоремедиацию загрязненных углеводородами городских почв методами биоаугментации и биостимуляции варьировали от 50.7 до 310.4 долларов США за м³ загрязненной почвы (Orellana et al., 2022).

Биоремедиацию можно проводить непосредственно на загрязненной территории (*in situ*) или удалять загрязненный слой почвы на требуемую глубину и транспортировать его на специальные полигоны для биодеструкции ЗВ в контролируемых условиях (*ex situ*). Второй способ является более затратным и его чаще всего применяют для обработки сильно загрязненных участков (например, аварийных разливов нефти) или в случае загрязнения почв высокоопасными веществами (Koul, Taak, 2018; Butnariu, Butu, 2020).

Бактерии – агенты биодеградации загрязняющих веществ

Бактерии входят в число МО, играющих важнейшую роль в процессах детоксикации поллютантов, включая смертельно опасные для многих организмов пестициды и антибиотики. Устойчивость к ЗВ у бактерий в основном формируется за счет высокой пластичности генетического аппарата. Активный мутационный процесс в условиях загрязнения приводит к возникновению новых генов, способствующих формированию ряда адаптационных признаков, включая способность инактивировать или метаболизировать техногенные ксенобиотики (Rangasamy et al., 2018). При отборе бактерий, пригодных для использования в качестве АБМ, ориентируются на такие характеристики, как устойчивость штамма к ЗВ, высокий адаптационный потенциал, способность активно метаболизировать поллютанты, отсутствие патогенных признаков, дружественное отношение к растениям и полезной микробиоте, пригодность для культивирования в искусственных условиях. Значительное число перспективных для биоремедиации штаммов было выявлено среди обитающих в почвах Firmicutes, Proteobacteria, Actinobacteria и Cyanobacteria. Существенный практический интерес могут также представлять устойчивые к радиации бактерии, относящиеся к типу Deinococcus – Thermus или метаболизирующие хлорорганические соединения бактерии из типа Chloroflexota.

Firmicutes. Тип бактерий, многие из которых обитают в почве и принимают непосредственное участие в разложении органических субстратов.

Bacillus. Род спорообразующих палочковидных грамположительных бактерий, принимающих активное участие в разложении органических веществ и продуцировании биологически активных метаболитов. Непатогенные штаммы являются весьма перспективными агентами биодеградации опасных ксенобиотиков, в том числе пестицидов (включая фторорганические), отходов взрывчатых веществ, красителей и полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) (Sarwan, 2022). Согласно опубликованным данным, штамм *Bacillus* sp. DG-02, выделенный

из сточных вод производства пестицидов группы пиретроидов, способен разрушать бифентрин, перметрин, дельтаметрин, λ -цигалотрин, β -цифлутрин, β -циперметрин и др. Биоаугментация загрязненной почвы штаммом DG-02 приводит к резкому сокращению периода полураспада пиретроидного инсектицида фенпропатрина (Chen et al., 2014). Биосурфактанты, выделяемые бактериями рода *Bacillus*, повышают растворимость и скорость биodeградации ПАУ (Singh, Singh, 2016; Mehete et al., 2019). *B. cereus* активно метаболизирует входящие в состав взрывчатых веществ нитроэферы (Mercimek et al., 2013). Многие штаммы *Bacillus thuringiensis* эффективны в удалении ТМ и органических ЗВ (нефтяных углеводородов, ПАУ, пестицидов, красителей, фармацевтических препаратов, включая антибиотики) (Wen et al., 2023; Wu et al., 2023). Бактерия *B. megaterium* (*Priestia megaterium*) содержит набор генов, обуславливающих ее устойчивость к Hg, As, Cu, Co, Cd, Zn, Al. Толерантность к ТМ в основном обусловлена процессами биосорбции и продуцированием сидерофоров, связывающих катионы ТМ в устойчивые комплексы (Guzmán-Moreno et al., 2022).

Высоким потенциалом для биосорбции и биodeградации ЗВ обладают безопасные для человека и полезные для здоровья экосистем бактерии *B. subtilis*. Благодаря образованию эндоспор *B. subtilis* успешно адаптируется к неблагоприятным условиям. Участие данных бактерий в биорекультивации нарушенных земель включает биodeградацию, биосорбцию и биотрансформацию ЗВ, а также «биострудиничество» с растениями и полезной почвенной микробиотой. Согласно результатам экспериментальных исследований, *B. subtilis* активно сорбирует ТМ, продуцирует биосурфактанты и широкий спектр ферментов, вызывающих разрушение нефтяных углеводородов, ПАУ, пестицидов и других синтетических поллютантов (Bai et al., 2014; Wang Z. et al., 2025).

Большой интерес в качестве АБМ вызывает группа бактерий, включающая *B. amyloliquefaciens*, *B. siamensis*, *B. velezensis* и *B. nakamurai*. Соответствующие МО способны фиксировать азот, солюбилизировать фосфаты, вырабатывать сидерофору и стимуляторы роста растений, подавлять почвенные фитопатогены. Результаты геномного анализа показали, что бактерии этой группы могут найти применение для удаления из почвы фосфорорганических пестицидов (Ngalimat et al., 2021).

Clostridium. Обширный род спорообразующих, преимущественно грамположительных, облигатно анаэробных бактерий, включающий непатогенные и патогенные штаммы. Благодаря метаболическому разнообразию непатогенные клостридии могут представлять значительный интерес для экологической биотехнологии в качестве агентов анаэробной биodeградации и инактивации органических поллютантов (взрывчатых веществ, хлорированных углеводородов, азокрасителей, нефтяных углеводородов и др.), ТМ и радиоактивных элементов (U, Pu) (Guerrero-Varajas, 2012; Primadani et al., 2021).

Несмотря на потенциальную возможность применения анаэробных бактерий в технологиях биоремедиации, научных публикаций, посвященных данному вопросу, в настоящее время немного. В основном соответствующие публикации касаются микробных сообществ аноксических почв мангровых лесов (Shahimin et al., 2025).

Proteobacteria. Большая и чрезвычайно разнообразная по морфологическим признакам, физиологическим особенностям и метаболическим свойствам группа грамотрицательных бактерий. Более 40% всех валидно опубликованных родов прокариот относится к данному типу. Большинство являются факультативными или облигатными анаэробами. Некоторые представители являются важными участниками биогеохимических циклов углерода, азота и серы (Artiomov, 2023).

Pseudomonas. Аэробные, подвижные, палочковидные бактерии. Широко распространены в различных средах. Обладают высокой метаболической активностью. В настоящее время вызывают большой интерес в связи с активным продуцированием экзополисахаридов и биосурфактантов, играющих важную роль в формировании биопленок и иммобилизации ТМ. Имеют большой и пластичный геном, позволяющий достаточно быстро приобретать и экспрессировать гены, участвующие в деградации широкого спектра ЗВ, включая нефть и ПАУ (Varjani et al., 2020; Balíková et al., 2022). Некоторые представители *Pseudomonas* способны использовать опасные для других организмов ТМ в качестве микроэлементов. Согласно опубликованным данным, выделенный из загрязненных почв штамм *Pseudomonas* sp. B7 за счет внеклеточной иммобилизации и внутриклеточной секвестрации связывал 100% содержащегося в субстрате Cd(II). Авторы публикации высказали предположение, что данные бактерии включают Cd в состав фермента карбоангидразы (Wu et al., 2022). Биосурфактанты, синтезируемые выделенным из нефтяного месторождения штаммом *Pseudomonas* sp. CQ2, могут эффективно удалять из почвы Cd, Cu, Cr, Pb (Nagashetti et al., 2013; Sun et al., 2021). Экспериментально установлено, что продуцируемые *P. fluorescens* сидерофоры способствуют мобилизации и переводу в биодоступную форму Fe, Co и Ni из отходов урановой руды. Повышение подвижности ТМ под влиянием МО может представлять определенную экологическую опасность, что следует учитывать при разработке технологий биоремедиации загрязненных территорий (Edberg et al., 2010). Опубликованы результаты экспериментальных исследований штамма *Pseudomonas* sp. DC-B1, способного очищать почву от соединений Hg(II) за счет перевода данного элемента в летучую форму и испарения (Chen et al., 2018). Генетически модифицированные штаммы *Pseudomonas* продемонстрировали способность разлагать смесь пестицидов, включая фосфорорганические и пиретроидные (Zuo et al., 2015; Sivasamy et al., 2025). Синтезируемые штаммами *P. fluorescens* DSM 8341, *P. oleovorans*, *P. putida* G7 ферменты приводят к биodeградации чрезвычайно устойчивых фторорганических соединений (Wackett, 2022). Рекомбинантные штаммы *P. putida* успешно метаболизируют линейные и циклические олигомеры нейлона, полученные в результате химического гидролиза полиамида, что имеет важное значение для утилизации полиамидных материалов после окончания срока их службы (de Witt et al., 2025).

Klebsiella. Род факультативно анаэробных, палочковидных бактерий, встречающихся в почве, водной среде, на поверхности растений, в организме человека и животных. Многие штаммы являются условно-патогенными. Большой интерес в качестве АБМ представляют штаммы хемоорганогетеротрофного вида *K. pneumoniae*. Согласно результатам исследований, в геноме этого вида присутствуют гены,

обуславливающие устойчивость к ТМ, способность метаболизировать ПАУ, солубилизовать фосфаты, синтезировать индолилуксусную кислоту (ИУК) и сидерофоры (Rajkumari et al., 2018; Bilen Ozyurek, Avcioglu, 2022). Выделенный из почвы штамм *K. pneumoniae* Mk-1 продуцирует лакказоподобную мультимедную оксидазу, участвующую в деградации полиэтилена (Zhang X. et al., 2023). Толерантные к Cd и As виды *K. pneumoniae* и *K. oxytoca* способны очищать почву от Cr, Cd, Cu, Ni (Aransiola et al., 2017). *K. oxytoca* способна использовать пирен как единственный источник углерода, что представляет большой интерес для удаления из почвы ПАУ (Alfaify et al., 2022). Несмотря на высокие биоремедиационные возможности, практическое применение *Klebsiella* ограничено их потенциальной патогенностью. Даже непатогенные штаммы, благодаря высокой изменчивости вирулентных свойств, могут представлять эвентуальную опасность для ОС и здоровья человека.

Burkholderia. Аэробные хемоорганогетеротрофные, палочковидные, подвижные бактерии, обитающие в разных средах. Род включает непатогенные, патогенные и условно-патогенные виды. Привлекает большое внимание в связи с выраженной способностью разлагать ароматические соединения (Morya et al., 2020). Многие ризосферные виды оказывают положительное влияние на рост растений, в связи с чем их относят к группе PGPR (ризобактерии, стимулирующие рост растений). Согласно опубликованным данным, выделенный из сельскохозяйственных почв штамм *B. zhejiangensis* CEIB S4-3 мог использовать хлорорганический пестицид метафос в качестве единственного источника углерода и полностью разлагать п-нитрофенол (Pороса-Ursino et al., 2017). Штамм *Burkholderia* sp. ХТВ-5 активно разлагал фенол, солубилизовал фосфаты, продуцировал 1-аминоциклопропан-1-карбоксилат (АЦК) дезаминазу и сидерофоры, стимулировал рост растений в тепличных и полевых условиях (Chen et al., 2017). Продуцирующий биосурфактанты штамм *Burkholderia* sp. Z-90 способствовал удалению из загрязненной почвы Zn, Pb, Mn, Cd, Cu, As (Yang et al., 2016).

Thiobacillus. Широко распространенный род неспорообразующих, палочковидных, хемолитоавтотрофных бактерий, способных к существованию в экстремальных условиях, включая засушливые и засоленные почвы, а также среды с низким уровнем pH и высоким содержанием ТМ. Получает энергию за счет окисления серы, сульфидов, тиосульфатов, полиитионатов, тиоцианатов. Опубликованы результаты исследований, свидетельствующие о возможности использования смешанной культуры *Thiobacillus* sp. и *Clostridium* sp. для детоксикации почв, загрязненных Cu^{2+} (Vernans et al., 2019).

Achromobacter. Подвижные бактерии, обычно встречающиеся во влажных средах. Многие штаммы являются возбудителями опасных инфекционных заболеваний. Благодаря способности стимулировать рост растений и разлагать ЗВ, некоторые представители *Achromobacter* считаются перспективными для использования в качестве биодеструкторов арсенидов, дифенила, галогенароматических кислот, ПАУ (Marzec-Grządziel, Gałazka, 2023). Согласно экспериментальным данным, выделенные из почвы штаммы *Achromobacter* sp. проявляли высокую деградационную активность по отношению к имидаклоприду (неоникотиноидный пестицид), достигавшую 100% к 20-му дню инкубации (Gao et al., 2021). У выделен-

ных из почвы углекислотного объекта штаммов *A. xylosoxidans* выявлена высокая способность к биодеградации фенантрена и бенз[а]пирена (Zhang B. et al., 2023). Лабораторные исследования показали, что бактерии *A. xylosoxidans* и *A. insolitus* проявляют выраженную способность к биосорбции ТМ. Через 28 дней инкубации *A. xylosoxidans* аккумулировал из загрязненной среды 96.51 Ni, 92.0 Pb, 90.1 Cu и 84.82% Cd. Эффективность биоаккумуляции ТМ у *A. insolitus* составила: 94.67 Ni, 90.25 Pb, 90.04 Cu и 89.21% Cd (Nyoyoko, 2022). Эндемичные для загрязненных отходами электронной промышленности почв штаммы *Achromobacter* sp. разрушали отработанные печатные платы, наибольшая скорость деградации соответствующих отходов наблюдалась при pH 11 (Bougaoui et al., 2024).

Citrobacter. Факультативно анаэробные, не образующие спор бактерии. Представители данного рода, в частности штаммы *Citrobacter farmeri*, продуцируют стимуляторы роста растений, способствуют растворению фосфатов и биоиммобилизации Pb, Cd и других ТМ в загрязненных почвах (Li et al., 2022; Wang et al., 2025).

Actinobacteria. Один из крупнейших в домене Bacteria типов, включающий аэробные, грамположительные, спорообразующие бактерии. Способны существовать в экстремальных почвенно-климатических условиях, включая дефицит питательных веществ, неблагоприятный температурный фон, низкую влажность. Актинобактерии (актиномицеты) обладают механизмами секвестрации ТМ, продуцируют катаболические ферменты, сидерофоры, экзополисахариды, антибиотики и другие метаболиты, играющие важную роль в деградации опасных ксенобиотиков. (Chaturvedi, Khurana, 2019).

Arthrobacter. Широко распространенные в почве плеоморфные облигатно аэробные бактерии, которые часто выделяют из почв, загрязненных радиоактивными соединениями и промышленными химикатами (Wang et al., 2019). Представители этого рода принимают активное участие в биодеградации фосфорорганических пестицидов и фенольных соединений (включая нитрофенол), фталатов, производных хлорбензойной кислоты, полихлорированных бифенилов (ПХБ), алкалоидов. Опубликованы данные о том, что выделенный из загрязненной радионуклидами почвы штамм *Arthrobacter* sp. SRS-W-1-2016 способствует иммобилизации U (Chauhan et al., 2018). Штамм *A. globiformis* 151B способен поглощать и аккумулировать Cs⁺ и Cr(VI), что представляет большой интерес для биоремедиации территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению (Rcheulishvili et al., 2022).

Штаммы *Arthrobacter* sp., выделенные из почв Антарктиды, метаболизируют дизельное топливо в среде с высоким содержанием ТМ. Соответствующие штаммы могут найти применение в технологиях ремедиации почв холодных регионов (Abdulrasheed et al., 2020).

Rhodococcus. Род неподвижных, неспорообразующих, хемоорганотрофных аэробных бактерий, способных выживать в экстремальных условиях. Широко распространен в природных и техногенно загрязненных средах. Геном *Rhodococcus* содержит множество катаболических генов, позволяющих осуществлять различные метаболические пути расщепления сложных органических соединений, включая нефтяные углеводороды, ПАУ, фенолы, полихлорированные бифенилы, нитрилы и другие стойкие ЗВ, а также инактивировать ТМ и смертельные для многих

живых организмов цианиды. В настоящее время ведутся активные исследования, направленные на выделение эффективных штаммов данных МО для биодеструкции экологически опасных ЗВ, включая пластик, взрывчатые вещества, фармацевтические препараты, отходы целлюлозно-бумажного производства (Wen et al., 2020; Nazari et al., 2022).

Nocardioidea. Неподвижные, аэробные бактерии, эволюционно близкие к роду *Rhodococcus*. Формируют разветвленные нитевидные структуры, морфологически напоминающие грибы. Некоторые виды образуют споры. Широко распространены в почвах, водной среде, гниющих органических отходах. Способны разлагать углеводороды, галогеналканы, ароматические соединения, азотсодержащие гетероциклы, полиэферы, переводить Cr(VI) в менее токсичные формы. Характерной особенностью является более высокая скорость биodeградации поллютантов по сравнению с другими МО. Благодаря выраженной катаболической активности имеют значительный коммерческий и прикладной потенциал для использования в качестве АБМ (Ma et al., 2023; Huang et al., 2025). Штамм *N. zeae* EA12 синтезирует ферменты, участвующие в деградации биоразлагаемых полимеров, включая полилактид (Mistry et al., 2022). В геноме *N. alcanivorans* NGK65T, выделенного из загрязненной пластиком почвы, выявлены гены, которые считаются необходимыми для биodeградации полиэтилена (Bartholomäus et al., 2022). Консорциумы, включающие *Nocardioidea* sp., *Rhodococcus* sp. и *Comamonadaceae* sp., способны метаболизировать токсичные ароматические нитросоединения, входящие в состав современных нечувствительных к детонации боеприпасов (Menezes et al., 2022).

Streptomyces. Нитевидные, аэробные, спорообразующие бактерии, принимающие активное участие в круговороте питательных веществ и продуцировании вторичных биологически активных метаболитов. К преимуществам стрептомицетов можно отнести физиологическую универсальность и метаболическое разнообразие, высокую скорость роста, возможность колонизировать различные субстраты, пригодность для генетической модификации, способность к спорообразованию, обеспечивающую высокую устойчивость к воздействию неблагоприятных факторов. Благодаря продуцированию внеклеточных литических ферментов разлагают целлюлозу, лигноцеллюлозу, ксиланы, лигнин, хитин. Природные консорциумы *Streptomyces* способны метаболизировать чрезвычайно опасные и устойчивые хлорорганические пестициды (линдан, метоксифлор, хлордан), фосфорорганические соединения, а также использовать синтетический пиретроидный инсектицид λ -цигалотрин в качестве единственного источника углерода и азота. Скорость и глубина деградации пестицидов значительно возрастают при добавлении в субстрат дополнительных источников питательных веществ (Fuentes et al., 2017; Briceño et al., 2018; Bensouici et al., 2025). Особую роль в деградации ЗВ играют продуцируемые стрептомицетами биосурфактанты, сидерофоры и внеклеточные полисахариды, образующие защитный слой на поверхности клеток и связывающие ТМ (Patel et al., 2025). Наличие механизмов устойчивости к ТМ обеспечивает стрептомицетам конкурентные преимущества в почвах, загрязненных соответствующими ксенобиотиками. Согласно результатам экспериментальных исследований, выделенные из почвы штаммы стрептомицетов способны активно сорбиро-

вать Mn, Co, Ni, Cu, Sr, U. Штамм *Streptomyces* CG252 обеспечивает восстановление весьма токсичного Cr(VI) до менее токсичного Cr(III) (Schütze, Kothe, 2011).

Microbacterium. Широко распространенный род неспорообразующих, палочковидных актинобактерий. Представители данного рода принимают участие в деструкции широкого спектра ЗВ, включая ПАУ, солибилизируют фосфаты, продуцируют сидерофоры и биологически активные вещества, стимулирующие рост растений. Некоторые микробактерии способны существовать в почвах с высоким содержанием ТМ и As. Гипертолерантные к As штаммы *M. paraoxydans* и *Microbacterium* sp. были выделены из загрязненных этим элементом почв. Данные штаммы демонстрировали устойчивость к комплексу металлов, включая Ni, Co, Cr, Zn, Sn, Se (Kaushik et al., 2012). Адаптированные к наличию в субстрате тех или иных ЗВ штаммы *Microbacterium* могут найти применение для очистки почв от широкого спектра ксенобиотиков, включая Pb, сырую нефть, хлорорганические и фосфорорганические пестициды (Lu et al., 2019; Heidari, Sanaeizade, 2020). Было установлено, что *Microbacterium* sp. способны разлагать бенз(а)пирен в анаэробных условиях, используя в качестве акцепторов электронов нитраты. Соответствующая способность открывает определенные перспективы для устранения ПАУ из глубоких слоев почвенного профиля (Qin et al., 2017).

Gordonia. Аэробные неспорообразующие бактерии. Некоторые штаммы данного рода, в частности *Gordonia alkanivorans* W33, вызывают большой интерес в связи с активным участием в биодеградации нефти (Yang et al., 2023).

Cyanobacteria. Отдел бактерий, способных к оксигенному фотосинтезу и фиксации атмосферного азота. Цианобактерии (ЦБ) выживают в самых сложных почвенно-климатических условиях, принимают непосредственное участие в почвообразовательных процессах, продуцируют широкий спектр биологически активных метаболитов. В настоящее время ведутся активные исследования, направленные на разработку технологий использования ЦБ в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства, в том числе в качестве агентов биоремедиации (Kondakova et al., 2023, 2025).

Благодаря продуцированию экзогенных полисахаридов, такие представители ЦБ, как *Nostoc minutum* и *Anabaena spiroides* способны к биосорбции ТМ и предотвращению их аккумуляции в растениях. Суспензии соответствующих МО рекомендуют применять для улучшения состояния почв с высоким содержанием ТМ (Al-Sherif et al., 2015). *Nostoc linckia* является важным кандидатом для использования в качестве АБМ почв с повышенным уровнем Cr (Cepoi et al., 2021). *Oscillatoria* sp. и *Leptolyngbya* sp. снижают токсичность почв, загрязненных комплексом ТМ (Fe, As, Cr, Cu, Pb, Ni) (Biglari et al., 2020). Основные стратегии, используемые ЦБ для детоксикации ТМ, включают биосорбцию, биоаккумуляцию и биотрансформацию ЗВ в менее токсичные формы. Опубликованы данные о способности *Nostoc muscorum* использовать пестицид малатион в качестве единственного источника фосфора (Ibrahim et al., 2014), а также об участии ЦБ в биодеградации микропластика (Sarkhel et al., 2025). Сведения о перспективах использования ЦБ для разрушения нефтяных углеводородов весьма противоречивы. В ряде работ сообщается о возможности прямого участия ЦБ *Nostoc punctiforme*, *Spirulina*

platensis, *Synechococcus*, *Anabaena variabilis* в биодegradации сырой нефти (El-Sheekh, Hamouda, 2014; Alkhazraji et al., 2025; Paul et al., 2025). В исследованиях с аксеничными (чистыми) культурами выявлено, что ЦБ, обитающие на загрязненных нефтью участках, создают благоприятные условия для формирования специфичных консорциумов МО, способных метаболизировать нефтяные углеводороды, но сами эти соединения не разрушают (Abed, 2019).

Deinococcus – Thermus. Один из самых экстремофильных типов грамположительных бактерий, обладающих уникальными адаптационными возможностями, позволяющими выживать в условиях высыхания, воздействия высоких и низких температур, ультрафиолетового и радиационного излучения. Относящаяся к данному типу *Deinococcus radiodurans*, считается самым радиорезистентным из известных на сегодняшний день организмов. Некоторые виды *Deinococcus – Thermus* потенциально могут быть использованы для биоремедиации мест захоронения радиоактивных отходов (Jin et al., 2019; Ogwu et al., 2019).

Chloroflexota. Представители этого типа отличаются широким метаболическим разнообразием, высоким адаптационным потенциалом, возможностью осуществлять аноксигенный фотосинтез и использовать токсичные соединения (в частности, галогенопроизводные углеводов) в качестве акцепторов электронов (окислителей). Особое значение для ремедиации почв могут иметь хемоорганотрофные представители Chloroflexota, способные в строго анаэробных условиях дегалогенировать хлор- и бромпроизводные углеводов, включая полихлорированные бифенилы. Органогалогенид-дышащие Chloroflexota (organohalide-respiring bacteria) представляют большой интерес для использования в составе смешанных консорциумов в технологиях биодegradации галогеноорганических ЗВ (Krzmarzick et al., 2012; Freches, Fradinho, 2024).

Проблемы внедрения технологий биоремедиации в практику

Идеальный результат практического использования технологий биоремедиации предполагает достаточно быстрое и полное удаление или инактивацию ЗВ с последующей секвестрацией образующихся парниковых газов (Kantor, Sychina, 2023). Следует признать, что на современном этапе развития биотехнологии реализация соответствующего сценария далека от реальности. Выделенные из природных или загрязненных сред штаммы МО, способные эффективно метаболизировать ЗВ в условиях лабораторного эксперимента, чаще всего не справляются или недостаточно справляются с соответствующей задачей в природных средах. Реализуемые на практике технологии биоремедиации обычно включают естественное угасание (ослабление) или биостимуляцию. Оба подхода опираются на биоремедиационный потенциал автохтонных консорциумов МО. Биоаугментация с использованием культивируемых МО пока находит ограниченное практическое применение. Штаммы, выращенные в биореакторах и внесенные в загрязненную почву, редко выдерживают прямую конкуренцию с местными МО, медленно и не всегда успешно адаптируются к новым условиям, изменяют интенсивность и характер метаболизма под влиянием внешних факторов, активно мутируют и утрачивают хозяйственно полезные свойства. В силу этих причин первые попытки

внедрения технологий биоремедиации, основанные на применении естественных штаммов, способных разрушать ЗВ, не привели к ожидаемым прорывным достижениям в области очистки почв от загрязнения. Следующий этап развития технологий биоремедиации базировался на достижениях генной инженерии, позволяющих повысить метаболические и адаптационные возможности МО за счет редактирования их генома. Перенос целевых генов в бактерию позволяет получать новые штаммы, способные за минимальное время устранять те или иные ЗВ (Kumar et al., 2017). Методы генной инженерии открыли большие возможности для создания новых метаболических путей деградации ЗВ и увеличения продукции ценных метаболитов путем сборки катаболических модулей различного происхождения в одной микробной клетке (Sharma, Shukla, 2022). Следует признать, что несмотря на значительные успехи генной инженерии, цель создания экологически безопасных рекомбинантных супермикробов, способных эффективно минерализовать опасные ЗВ в суровых природных условиях, до настоящего времени не достигнута. Несмотря на значительные биодegradационные возможности генетически модифицированных МО (ГММ), эффект от их внесения в почву ограничен теми же факторами, что и эффект от внесения выделенных из природных сред штаммов. Рекомбинантные бактерии, как правило, оказываются весьма уязвимыми в сложных многокомпонентных природных средах, населенных хорошо адаптированными сообществами аборигенных МО. В генной инженерии для повышения эффективности биодegradации широко используется технология введения в бактериальную клетку плазмид, позволяющих обеспечить сверхэкспрессию тех или иных генов. Избыточное количество плазмид, обуславливающих повышенную эффективность биодegradации, увеличивает нагрузку на клетку, замедляя рост, скорость размножения и жизнеспособность штамма. Кроме того, появляются дополнительные прямые и косвенные риски, связанные с интродукцией модифицированных геномов в почву (Perera, Hemamali, 2021). Значительная часть общественности выступает против использования ГММ в природных средах. Для минимизации рисков загрязнения ОС рекомбинантными МО предлагаются различные концептуальные решения. Например, создание «суицидных» ГММ, погибающих после завершения процесса биоремедиации. Несмотря на привлекательность соответствующего подхода, гарантировать полную всей популяции гибель ГММ невозможно. Благодаря высокой пластичности генетического аппарата, некоторая часть ГММ может выжить (Batta et al., 2025).

Процесс биодegradации сложных ксенобиотиков включает множество отдельных этапов, при реализации которых образуются в том числе весьма токсичные, промежуточные продукты. Подавляющее большинство штаммов, включая ГММ, не способно перевести весь спектр образующихся метаболитов в безопасные формы. Для решения соответствующей задачи необходимы консорциумы МО. Создание эффективных консорциумов и безопасных методов их использования можно рассматривать в качестве третьего этапа развития технологий биоремедиации. Синтетический консорциум представляет собой специально организованную симбиотическую саморегулирующуюся систему, включающую множество видов МО, обладающих разнообразными метаболическими путями, позволяющими эф-

эффективно удалять токсичные ЗВ. Консорциум может не только распределять катаболические процессы между отдельными представителями, но и способствовать появлению новых функций, которые невозможно реализовать в клетках отдельных штаммов. Катаболические возможности консорциума часто превышают сумму возможностей отдельных его компонентов. Метаболиты одного микроба делают возможным существование другого. Благодаря многоплановым консортивным связям, синтетические микробные сообщества проявляют более высокую степень адаптации и толерантности к условиям ОС, чем отдельные штаммы (de Lorenzo, 2019; Kaur, Sodhi, 2022).

Современные тенденции развития микробных технологий в области биоремедиации предполагают переход от метода проб и ошибок к методу рационального проектирования. Нацеленные на перспективу разработки включают создание функциональных микробных сообществ на основе технологий мультиомики, синтетической биологии и цифровых двойников (Digital Twin). Цифровые копии позволяют предсказывать возможные направления развития объектов и процессов в конкретных условиях и принимать более обоснованные решения по внедрению той или иной технологии в практику. Повышение стабильности и эффективности биотехнологий обеспечивается за счет активного использования интеллектуальных материалов, адресной доставки и интеллектуального мониторинга. Соответствующие инструменты позволяют обеспечить новый, более эффективный уровень решения сложных экологических проблем и минимизировать возможные риски для ОС и здоровья населения (Yang et al., 2025).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Защита почвенного покрова от деградации и восстановление его природных функций в условиях интенсивного антропогенного воздействия представляет весьма сложную задачу. Успешное решение этой задачи во многом определяется достигнутым уровнем понимания биологических процессов, протекающих в данном природном объекте, а также наличием эффективных технологий, позволяющих управлять жизнедеятельностью почвенной биоты, не нанося вреда ОС. Традиционные подходы к биоремедиации, основанные на использовании МО, способных разрушать или инактивировать ЗВ, имеют как преимущества перед другими методами, так и существенные ограничения, обусловленные физиологическими возможностями микробных клеток и объективными закономерностями функционирования сложных микробных сообществ. Пока основное внимание науки сосредоточено на выделении естественных или создании рекомбинантных штаммов МО, способных разрушать ЗВ, а также на изучении метаболических путей биодegradации ксенобиотиков. Разработке экономичных и пригодных для внедрения в практику технологий использования перспективных штаммов уделяется меньшее внимание. Важнейшая задача, которую предстоит решить биотехнологам на современном этапе, заключается в разработке методов, позволяющих обеспечить эффективную биодegradацию различных ЗВ в условиях природной среды выращенными в биореакторах хозяйственно ценными штаммами МО. Без успешного решения соответствующей задачи достижение прорывных результатов в сфере биоремедиации значительных территорий остается под вопросом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Abatenh E., Gizaw B., Tsegaye Z., Wassie M. The role of microorganisms in bioremediation – A review. *Open Journal of Environmental Biology*, 2017, vol. 2, no. 1, pp. 038–046. <https://doi.org/10.17352/ojeb.000007>

Abdulrasheed M., Roslee A. F., Zakaria N. N., Zulkharnain A., Lee G. L. Y., Convey P., Napis S., Ahmad S. A. Effects of heavy metals on diesel metabolism of psychrotolerant strains of *Arthrobacter* sp. from Antarctica. *Journal of Environmental Biology*, 2020, vol. 41, iss. 5, pp. 966–972. <http://doi.org/10.22438/jeb/41/5/MRN-1319>

Abed R. M. M. Phototroph-heterotroph oil-degrading partnerships. In: *Microbial Communities Utilizing Hydrocarbons and Lipids: Members, Metagenomics and Ecophysiology*. Cham, Springer, 2019, pp. 38–46. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14785-3_15

Alfaify A. M., Mir M. A., Alrumman S. A. *Klebsiella oxytoca*: An efficient pyrene-degrading bacterial strain isolated from petroleum-contaminated soil. *Archives of Microbiology*, 2022, vol. 204, iss. 5, pp. 248. <http://doi.org/10.1007/s00203-022-02850-9>

Alkhazraji M. S., Al-Rawi A. A. A., Al-Obaidy A. H. M. J. Biological treatment of crude oil by *Synechococcus* sp. *Ibn AL-Haitham Journal for Pure and Applied Sciences*, 2025, vol. 38, no. 2, pp. 10–22. <https://doi.org/10.30526/38.2.3489>

Al-Sherif E. A., Abd El-Hameed M. S., Mahmoud M. A., Ahmed H. S. Use of cyanobacteria and organic fertilizer mixture as soil bioremediation. *American–Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences*, 2015, vol. 15, no. 5, pp. 794–799. <https://doi.org/10.5829/idosi.aejaes.2015.15.5.93245>

Aransiola E. F., Ige O. A., Ehinmitola E. O., Layokun S. K. Heavy metals bioremediation potential of *Klebsiella* species isolated from diesel polluted soil. *African Journal of Biotechnology*, 2017, vol. 16, no. 19, pp. 1098–1105. <https://doi.org/10.5897/AJB2016.15823>

Arihilam N. H., Arihilam E. C. Impact and control of anthropogenic pollution on the ecosystem – A review. *Journal of Bioscience and Biotechnology Discovery*, 2019, vol. 4, iss. 3, pp. 54–59. <https://doi.org/10.31248/JBBD2019.098>

Artimov L. Proteobacteria with biotechnological potential in typical chernosium. In: *Modern Trends in the Agricultural Higher Education: Book of Abstracts of the International Scientific Symposium*. Chisinau, Technical University of Moldova Publ., 2023, pp. 18.

Ayilara M. S., Babalola O. O. Bioremediation of environmental wastes: the role of microorganisms. *Frontiers in Agronomy*, 2023, vol. 5, article no. 1183691. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1183691>

Bai J., Yang X., Du R., Chen Y., Wang S., Qiu R. Biosorption mechanisms involved in immobilization of soil Pb by *Bacillus subtilis* DBM in a multi-metal-contaminated soil. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, vol. 26, iss. 10, pp. 2056–2064. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.07.015>

Balíková K., Vojtková H., Duborská E., Kim H., Matus P., Urik M. Role of exopolysaccharides of *Pseudomonas* in heavy metal removal and other remediation strategies. *Polymers*, 2022, vol. 14, no. 20, article no. 4253. <https://doi.org/10.3390/polym14204253>

Bartholomäus A., Lipus D., Mitzscherling J., Wagner D. Draft genome sequence of *Nocardioides alcanivorans* NGK65^T, a hexadecane-degrading bacterium. *Microbiology Resource Announcements*, 2022, vol. 11, no. 8, article no. e01213-21. <https://doi.org/10.1128/mra.01213-21>

Batta S., Sharma D., Gupta R. Engineering of plants, microbes and their metabolites for soil remediation. In: *Soil Bioremediation*. Cham, Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 455–480.

Bensouici K., Oulmi L., Boudemagh A., Kitouni M. The capacity of *Actinobacteria* isolated from arid ecosystems in the bioremediation of soils polluted by λ -cyhalothrin-pesticide. *Notulae Scientia Biologicae*, 2025, vol. 17, no. 1, article no. 12035. <https://doi.org/10.55779/nsb17112035>

Biglari Z., Heidari A., Sepehr A., Bahreini M. Bioremediation of heavy metal contaminated soils originated from iron ore mine by bio-augmentation with native cyanobacteria. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 2020, vol. 11, iss. 2, pp. 89–96. <https://doi.org/10.5829/ijee.2020.11.02.01>

Bilen Ozyurek S., Avcioglu N. H. Comparison of the petroleum removal efficiencies and plasmid profiles of clinical and environmental *Klebsiella pneumoniae* strains. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2022, vol. 19, pp. 9791–9800. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03788-z>

Bouraoui H., Bourzama G., Iratni N., Sayad L., Bensefia N., Deutscher J., Milohanic E. Biodegradation of printed circuit boards by *Pseudomonas aeruginosa* and *Achromobacter* sp. Isolated from E-Waste contaminated soil. *Microbiology*, 2024, vol. 93, iss. 6, pp. 939–953. <https://doi.org/10.1134/S0026261724604986>

Briceño G., Vergara K., Schalchli H., Palma G., Tortella G., Fuentes M. S., Diez M. C. Organophosphorus pesticide mixture removal from environmental matrices by a soil *Streptomyces* mixed culture. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, vol. 25, iss. 22, pp. 21296–21307. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9790-y>

Butnariu M., Butu A. Viability of in situ and ex situ bioremediation approaches for degradation of noxious substances in stressed environs. In: Bhat R. A., Hakeem K. R., eds. *Bioremediation and Biotechnology*. Cham, Springer, 2020, vol. 4, pp. 167 – 193. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48690-7_8

Cepoi L., Zinicovscaia I., Valuta A., Codreanu L., Rudi L., Chiriac T., Yushin N., Grozdov D., Peshkova A. Bioremediation capacity of edaphic cyanobacteria *Nostoc linckia* for chromium in association with other heavy–metals–contaminated soils. *Environments*, 2021, vol. 9, iss. 1, article no. 1. <https://doi.org/10.3390/environments9010001>

Chaturvedi S., Khurana S. M. P. Importance of Actinobacteria for Bioremediation. In: Khurana S., Gaur R., eds. *Plant Biotechnology: Progress in Genomic Era*. Singapore, Springer, 2019, pp. 277 – 307. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8499-8_13

Chauhan A., Pathak A., Jaswal R., Edwards B., Chappell D., Ball C., Garcia-Sillas R., Stothard P., Seaman J. Physiological and comparative genomic analysis of *Arthrobacter* sp. SRS-W-12016 provides insights on niche adaptation for survival in uraniferous soils. *Genes*, 2018, vol. 9, no. 1, article no. 31. <https://doi.org/10.3390/genes9010031>

Chen J., Li S., Xu B., Su C., Jiang Q., Zhou C., Jin Q., Zhao Yu, Xiao M. Characterization of *Burkholderia* sp. XTB-5 for phenol degradation and plant growth promotion and its application in bioremediation of contaminated soil. *Land Degradation & Development*, 2017, vol. 28, iss. 3, pp. 1091–1099. <https://doi.org/10.1002/ldr.2646>

Chen J., Dong J., Chang J., Guo T., Yang Q., Jia W., Shen S. Characterization of an Hg (II)-volatilizing *Pseudomonas* sp. strain, DC-B1, and its potential for soil remediation when combined with biochar amendment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, vol. 163, pp. 172–179. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.07.071>

Chen S., Chang C., Deng Y., An S., Dong Y. H., Zhou J., Hu M., Zhong G., Zhang L.-H. Fenpropathrin biodegradation pathway in *Bacillus* sp. DG-02 and its potential for bioremediation of pyrethroid-contaminated soils. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, vol. 62, iss. 10, pp. 2147–2157. <https://doi.org/10.1021/jf404908j>

de Lorenzo V. Biodegradation and Bioremediation: An Introduction. In: Steffan R., ed. *Consequences of Microbial Interactions with Hydrocarbons, Oils, and Lipids: Biodegradation and Bioremediation*. Cham, Springer, 2019, pp. 1–20. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50433-9_1

de Witt J., Luthe T., Wiechert J., Jensen K., Polen T., Wirtz A., Thies A., Frunzke J., Wynands B., Wierckx N. Upcycling of polyamides through chemical hydrolysis and engineered *Pseudomonas putida*. *Nature Microbiology*, 2025, vol. 10, no. 3, pp. 667–680. <https://doi.org/10.1038/s41564-025-01929-5>

Edberg F., Kalinowski B., Holmstrom S. J., Holm K. Mobilization of metals from uranium mine waste: The role of pyoverdines produced by *Pseudomonas fluorescens*. *Geobiology*, 2010, vol. 8, iss. 4, pp. 278–292. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4669.2010.00241.x>

El-Sheekh M. M., Hamouda R. A. Biodegradation of crude oil by some cyanobacteria under heterotrophic conditions. *Desalination and Water Treatment*, 2014, vol. 52, iss. 7–9, pp. 1448–1454. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.794008>

Firincă C., Zamfir L. G., Constantin M., Raut L., Jecu M.-L., Doni M., Gurban A.-M., Şesan T. E. Innovative approaches and evolving strategies in heavy metal bioremediation: Current limitations and future opportunities. *Journal of Xenobiotics*, 2025, vol. 15, no. 3, article no. 63. <https://doi.org/10.3390/jox15030063>

Fouad F. A., Youssef D. G., Shahat F. M., Abd El-Ghany M. N. Role of Microorganisms in Biodegradation of Pollutants. In: Ali G. A. M., Makhlof A. S. H., eds. *Handbook of Biodegradable Materials*. Cham, Springer, 2023, pp. 221–260. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09710-2_11

Freches A., Fradinho J. C. The biotechnological potential of the *Chloroflexota* phylum. *Applied and Environmental Microbiology*, 2024, vol. 90, no. 6, article no. e0175623. <https://doi.org/10.1128/aem.01756-23>

Fuentes M. S., Raimondo E. E., Amoroso M. J., Benimeli C. S. Removal of a mixture of pesticides by a *Streptomyces* consortium: Influence of different soil systems. *Chemosphere*, 2017, vol. 173, pp. 359–367. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.044>

Gao Y., Liu M., Zhao X., Zhang X., Zhou F. *Paracoccus* and *Achromobacter* bacteria contribute to rapid biodegradation of imidacloprid in soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, vol. 225, article no. 112785. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112785>

Gong X., Huang D., Liu Y., Peng Z., Zeng G., Xu P., Cheng M., Wang R., Wan J. Remediation of contaminated soils by biotechnology with nanomaterials: Bio-behavior, applications, and perspectives. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2018, vol. 38, iss. 3, pp. 455–468. <https://doi.org/10.1080/07388551.2017.1368446>

Guerrero-Barajas C. Biodegradation of organic pollutants, reduction of metals and energy generation involving *Clostridium* sp. *Clostridia: Biotechnology, Medicinal Applications and Implications (Biotechnology in Agriculture, Industry and Medicine)*. New York, Nova Science Publ., 2012, pp. 1–53.

Guzmán-Moreno J., García-Ortega L. F., Torres-Saucedo L., Rivas-Noriega P., Ramírez-Santoyo R. M., Sánchez-Calderón L., Quiroz-Serrano I. N., Vidales-Rodríguez L. E. *Bacillus megaterium* HgT21: A promising metal multiresistant plant growth – promoting bacteria for soil bioremediation. *Microbiology Spectrum*, 2022, vol. 10, no. 5, article no. e00656-22. <https://doi.org/10.1128/spectrum.00656-22>

Heidari P., Sanaeizade S. Optimization and characterization of lead bioremediation by strains of *Microbacterium oxydans*. *Soil and Sediment Contamination*, 2020, vol. 29, iss. 8, pp. 901–913. <https://doi.org/10.1080/15320383.2020.1783508>

Huang M., Luo X., Shi Y., Liu C., Chen J. Mechanisms involving the facilitation of the remediation of Cr (VI) contaminated soil by bacteria-loaded biochar. *International Journal of Environmental Research*, 2025, vol. 19, iss. 2, article no. 45. <https://doi.org/10.1007/s41742-024-00717-z>

Ibrahim W. M., Karam M. A., El-Shahat R. M., Adway A. A. Biodegradation and utilization of organophosphorus pesticide malathion by cyanobacteria. *BioMed research international*, 2014, vol. 2014, no. 1, article no. 392682. <https://doi.org/10.1155/2014/392682>

Jacob D. E., Jacob I. D., Daniel K. S., Gideon I. K., Akpan U. U. Innovations in soil remediation and land restoration. In: Ogwu M. C., Chibueze Izah S., eds. *Evaluating Environmental Processes and Technologies. Environmental Science and Engineering*. Cham, Springer, 2025, pp. 259–313. https://doi.org/10.1007/978-3-031-85327-2_9

Jin M., Xiao A., Zhu L., Zhang Z-D. The diversity and commonalities of the radiation-resistance mechanisms of *Deinococcus* and its up-to-date applications. *AMB Express*, 2019, vol. 9, iss. 1, article no. 138. <https://doi.org/10.1186/s13568-019-0862-x>

Kantor G. Ya., Syrchina N. V. Alternative assessment of methane's contribution to the greenhouse effect. *Theoretical and Applied Ecology*, 2023, no. 3, pp. 197–207 (in Russian). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2023-3-197-207>

Kaur M., Sodhi H. S. Genetically engineered microorganisms for bioremediation processes. In: Bhat R. A., Butnariu M., Dar G. H., Hakeem K. R., eds. *Microbial Bioremediation*. Cham, Springer, 2022, pp. 91–107. https://doi.org/10.1007/978-3-031-18017-0_5

Kaushik P., Rawat N., Mathur M, Raghuvanshi P., Bhatnagar P., Swarnkar H., Flora S. Arsenic hyper – tolerance in four *Microbacterium* species isolated from soil contaminated with textile effluent. *Toxicology International*, 2012, vol. 19, iss. 2, pp. 188–194. <https://doi.org/10.4103/0971-6580.97221>

Kensa V. M. Bioremediation-an overview. *Journal of Industrial Pollution Control*, 2011, vol. 27, no. 2, pp. 161–168.

Khalid S. A., Elsherif W. M. Types of microorganisms for biodegradation. In: Ali G. A. M., Makhlof A. S. H., eds. *Handbook of Biodegradable Materials*. Springer, Cham, 2022, pp. 195–220. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83783-9_2-1

Koh L. M., Khor S. M. Biodegradation process: Basics, factors affecting, and industrial applications. In: Ali G. A. M., Makhlof A. S. H., eds. *Handbook of Biodegradable Materials*. Springer, Cham, 2023, pp. 19 – 56. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09710-2_66

Kondakova L. V., Syrchina N. V., Ashikhmina T. Ya. Kondakova I. A. Transformation of soil algocyanoflora under the influence of Verkhnekamsk lean rock phosphorites. *Theoretical and Applied Ecology*, 2023, no. 4, pp. 184–190 (in Russian). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2023-4-184-190>

Kondakova L. V., Syrchina N. V., Kondakova I. A. Soil algocyanoflora specificity under anthropogenic pressure. *Theoretical and Applied Ecology*, 2025, no. 1, pp. 202–209 (in Russian). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2024-4-202-209>

Koul B., Taak P. Ex situ soil remediation strategies. In: *Biotechnological Strategies for Effective Remediation of Polluted Soils*. Singapore, Springer, 2018, pp. 39–57. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2420-8_2

Krzmarzick M. J., Cray B. B., Harding J. J., Oyerinde O. O., Leri A. C., Myneni S. C. B., Novak P. J. Natural niche for organohalide-respiring *Chloroflexi*. *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, vol. 78, no. 2, pp. 393–401. <https://doi.org/10.1128/AEM.06510-11>

Kumar N. M., Muthukumaran C., Sharmila G., Gurunathan B. Genetically modified organisms and its impact on the enhancement of bioremediation. In: Varjani S., Agarwal A., Gnansounou E., Gurunathan B., eds. *Bioremediation: Applications for Environmental Protection and Management. Energy, Environment, and Sustainability*. Singapore, Springer, 2017, pp. 53–76. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7485-1_4

Li Y., Guo S., Zheng Y., Yu J., Chi R., Xiao C. Bioimmobilization of lead in phosphate mining wasteland by isolated strain *Citrobacter farmeri* CFI-01. *Environmental Pollution*, 2022, vol. 307, article no. 119485. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119485>

Lu P., Liu H., Liu A. Biodegradation of dicofol by *Microbacterium* sp. D-2 isolated from pesticide-contaminated agricultural soil. *Applied Biological Chemistry*, 2019, vol. 62, iss. 1, article no. 72. <https://doi.org/10.1186/s13765-019-0480-y>

Ma Y., Wang J., Liu Y., Wang X., Zhang W., Chen T., Liu G., Xue L., Cui X. *Nocardioide*s: “Specialists” for hard-to-degrade pollutants in the environment. *Molecules*, 2023, vol. 28, iss. 21, article no. 7433. <https://doi.org/10.3390/molecules28217433>

Marzec-Grządziel A., Gałazka A. Sequencing of the whole genome of a bacterium of the genus *Achromobacter* reveals its potential for xenobiotics biodegradation. *Agriculture*, 2023, vol. 13, iss. 8, article no. 1519. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081519>

Mathew B. B., Singh H., Biju V. G., Krishnamurthy N. B. Classification, source, and effect of environmental pollutants and their biodegradation. *Journal of Environmental Pathology, Toxicology and Oncology*, 2017, vol. 36, iss. 1. <https://doi.org/10.1615/JEnvironPatholToxicolOncol.2017015804>

Mbachu A. E., Chukwura E. I., Mbachu N. A. Role of microorganisms in the degradation of organic pollutants: A review. *Energy and Environmental Engineering*, 2020, vol. 7, iss. 1, pp. 1–11. <https://doi.org/10.13189/eee.2020.070101>

Mehetre G. T., Dastager S. G., Dharne M. S. Biodegradation of mixed polycyclic aromatic hydrocarbons by pure and mixed cultures of biosurfactant producing thermophilic and thermo-tolerant bacteria. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 679, pp. 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.376>

Menezes O., Owens C., Rios-Valenciana E. E., Sierra-Alvarez R., Spain J. C. Designing bacterial consortia for the complete biodegradation of insensitive munitions compounds in waste streams. *Biotechnology and Bioengineering*, 2022, vol. 119, iss. 9, pp. 2437–2446. <https://doi.org/10.1002/bit.28160>

Mercimek H. A., Dincer S., Guzeldag G., Ozsavli A., Matyar F. Aerobic biodegradation of 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) by *Bacillus cereus* isolated from contaminated soil. *Microbial Ecology*, 2013, vol. 66, iss. 3, pp. 512–521. <https://doi.org/10.1007/s00248-013-0248-6>

Mishra S., Lin Z., Pang S., Zhang Y., Bhatt P., Chen S. Biosurfactant is a powerful tool for the bioremediation of heavy metals from contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, vol. 418, article no. 126253. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126253>

Mistry A. N., Kachenchart B., Wongthanaroj A., Somwangthanaroj A., Luepromchai E. Rapid biodegradation of high molecular weight semi-crystalline polylactic acid at ambient temperature via enzymatic and alkaline hydrolysis by a defined bacterial consortium. *Polymer Degradation and Stability*, 2022, vol. 202, article no. 110051. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2022.110051>

Morya R., Salvachúa D., Thakur I. S. Burkholderia: An untapped but promising bacterial genus for the conversion of aromatic compounds. *Trends in Biotechnology*, 2020, vol. 38, iss. 9, pp. 963–975. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.02.008>

Nagashetti V., Mahadevaraju G. K., Muralidhar T. S., Javed A., Trivedi D., Bhusal K. P. Biosorption of heavy metals from soil by *Pseudomonas aeruginosa*. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 2013, vol. 2, iss. 6, pp. 22–24.

Nazari M. T., Simon V., Machado B. S., Cresstani L., Marchezi G., Concolato G., Ferrari V., Colla L. M., Piccin J. S. *Rhodococcus*: A promising genus of actinomycetes for the bioremediation of organic and inorganic contaminants. *Journal of Environmental Management*, 2022, vol. 323, article no. 116220. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116220>

Ngalimat M. S., Yahaya R. S. R., Baharudin M. M. A. A., Yaminudin S. M., Karim M., Ahmad S. A., Sabri S. A review on the biotechnological applications of the operational group *Bacillus amyloliquefaciens*. *Microorganisms*, 2021, vol. 9, no. 3, article no. 614. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9030614>

Nyoyoko V. F. Proteobacteria response to heavy metal pollution stress and their bioremediation potential. In: Kathi S., Devipriya S., Thamaraiselvi K., eds. *Cost Effective Technologies for Solid Waste and Wastewater Treatment*. London, Elsevier, 2022, pp. 147–159. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822933-0.00010-3>

Ogwu M. C., Srinivasan S., Dong K., Ramasamy D., Waldman B., Adams J. M. Community ecology of *Deinococcus* in irradiated soil. *Microbial Ecology*, 2019, vol. 78, iss. 4, pp. 855–872. <https://doi.org/10.1007/s00248-019-01343-5>

Orellana R., Cumsille A., Piña-Gangas P., Rojas C., Arancibia A., Donghi S., Stuardo C., Cabrera P., Arancibia G., Cárdenas F. Economic evaluation of bioremediation of hydrocarbon-contaminated urban soils in Chile. *Sustainability*, 2022, vol. 14, iss. 19, article no. 11854. <https://doi.org/10.3390/su141911854>

Patel D., Naik A., Sohaliya N. Streptomyces. In: *Compendium of Phytopathogenic Microbes in Agro-Ecology. Vol. 3: Bacteria, Protozoa, Algae and Nematodes*. Cham, Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 213–229.

Paul S., Thyriang B., Deb S., Adhikari S. Harnessing the ability of cyanobacterium *Anabaena variabilis* for bioremediation of waste generated from oil refineries. In: Joshi S. R., Verma P., Banerjee S., eds. *Mineral Transformation and Bioremediation by Geo-Microbes. Interdisciplinary Biotechnological Advances*. Singapore, Springer, 2025, pp. 525–543. https://doi.org/10.1007/978-981-96-3033-2_21

Perera I. C., Hemamali E. H. Genetically modified organisms for bioremediation: Current research and advancements. In: Suyal D. C., Soni R., eds. *Bioremediation of Environmental Pollutants*. Cham, Springer, 2021, pp. 163–186. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86169-8_7

Pilip L. V., Syrchina N. V., Kozvonin V. A., Kolevatykh E. P., Ashikhmina T. Ya., Sazonov A. V. Biological contamination of arable land with pig waste. *Theoretical and Applied Ecology*, 2022, no 3, pp. 199–205 (in Russian). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-3-199-205>

Pilip L. V., Syrchina N. V., Kuznetsov D. A. Livestock complexes as sources of environmental pollution with heavy metals (Cu, Zn). *Principles of the Ecology*, 2023, no. 1(47), pp. 82–89 (in Russian). <https://doi.org/10.15393/j1.art.2023.13182>

Popoca-Ursino E. C., Martínez-Ocampo F., Dantán-González E., Sánchez-Salinas E., Ortiz-Hernández M. L. Characterization of methyl parathion degradation by a *Burkholderia zhejiangensis* strain, CEIB S4-3, isolated from agricultural soils. *Biodegradation*, 2017, vol. 28, iss. 5, pp. 351–367. <https://doi.org/10.1007/s10532-017-9801-1>

Primadani I. P. P., Ratnaningsih R., Rinanti A. Removal of crude oil by *Thiobacillus* sp. and *Clostridium* sp. at various temperatures and concentration of pollutant in liquid media. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1098, no. 5, article no. 052034. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1098/5/052034>

Qin W., Zhu Y., Fan F., Wang Y., Liu X., Ding A., Dou J. Biodegradation of benzo (a) pyrene by *Microbacterium* sp. strain under denitrification: Degradation pathway and effects of limiting electron acceptors or carbon source. *Biochemical Engineering Journal*, 2017, vol. 121, pp. 131–138. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2017.02.001>

Rajkumari J., Paikhomba Singha L., Pandey P. Genomic insights of aromatic hydrocarbon degrading *Klebsiella pneumoniae* AWD5 with plant growth promoting attributes: A paradigm of soil isolate with elements of biodegradation. *3Biotech*, 2018, vol. 8, iss. 2, article no. 118. <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1134-1>

Rangasamy K., Athiappan M., Devarajan N., Samykannu G., Parraj J. A., Aruljothi K. N., Shameem N., Alqarawi A. A., Hashem A., Abd Allah E. F. Pesticide degrading natural multidrug resistance bacterial flora. *Microbial Pathogenesis*, 2018, vol. 114, pp. 304–310. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2017.12.013>

Rasul H. I., Salih A. M., Raheem S. M., Sirwan K., Hameed K., Yaqub K. Q., Husein H. A., Abdul N. A. Economic, environmental and management perspectives on soil pollution and sustainable remediation strategies. *Asian Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2025, vol. 11, iss. 2, pp. 123–139. <https://doi.org/10.9734/ajsspn/2025/v11i2516>

Rcheulishvili O., Metreveli N., Solomonina R., Tsverava L., Holman H.-Y. Bioremediation potential of hexavalent chromium-resistant *Arthrobacter globiformis* 151B: Study of the uptake of cesium and other alkali ions. *International Microbiology*, 2022, vol. 25, iss. 4, pp. 745–758. <https://doi.org/10.1007/s10123-022-00258-5>

Sales da Silva I. G., Gomes de Almeida F. C., Padilha da Rocha e Silva N. M., Casazza A. A., Converti A., Sarubbo A. L. Soil bioremediation: Overview of technologies and trends. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 18, article no. 4664. <https://doi.org/10.3390/en13184664>

Sarkhel R., Gupta P., Mandal T. Bioremediation of microplastics by Cyanobacteria. In: Mondal S., Das P., Mondal A., Chakraborty P., eds. *Microplastics in the Terrestrial Environment*. Boca Raton, CRC Press, 2025, pp. 316–330. <https://doi.org/10.1201/9781032684574-17>

Sarwan J. Role of isolates of *Bacillus* species for biodegradation of multiple contaminants. *Journal of Sustainability and Environmental Management*, 2022, vol. 1, iss. 2, pp. 292–298. <https://doi.org/10.3126/josem.v1i2.45381>

Schütze E., Kothe E. Heavy metal-resistant *Streptomyces* in soil. In: Kothe E., Varma A., eds. *Bio-Geo Interactions in Metal-Contaminated Soils*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2011, pp. 163–182.

Shahimin M. F. M., Bakri M., Mustafa A. R. Addressing knowledge gaps on the role of anaerobic microbial communities in mangrove ecosystems: Implications for contaminant biodegradation and ecosystem conservation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2025, vol. 1467, no. 1, article no. 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1467/1/012028>

Sharma B., Shukla P. Futuristic avenues of metabolic engineering techniques in bioremediation. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 2022, vol. 69, iss. 1, pp. 51–60. <https://doi.org/10.1002/bab.2080>

Singh B., Singh K. *Bacillus*: As bioremediator agent of major environmental pollutants. In: Islam M., Rahman M., Pandey P., Jha C., Aeron A., eds. *Bacilli and Agrobiotechnology*. Cham, Springer, 2016, pp. 35–5. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44409-3_2

Sivasamy S., Rajangam S., Kanagasabai T., Bisht D., Prabhakaran R., Dhandayuthapani S. Biocatalytic potential of *Pseudomonas* species in the degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Journal of Basic Microbiology*, 2025, vol. 65, iss. 2, article no. e2400448. <https://doi.org/10.1002/jobm.202400448>

Sun W., Zhu B., Yang F., Dai M., Sehar S., Peng C., Ali I., Naz I. Optimization of biosurfactant production from *Pseudomonas* sp. CQ2 and its application for remediation of heavy metal contaminated soil. *Chemosphere*, 2021, vol. 265, article no. 129090. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129090>

Syarifuddin S., Suryani S., Tahir D. Global advances and innovations in bacteria-based biosorption for heavy metal remediation: A bibliometric and analytical perspective. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2025, vol. 21, iss. 3, pp. 507–525. <https://doi.org/10.1093/inteam/vjae050>

Syrchina N. V., Pilip L. V., Ashikhmina T. Ya. Chemical land degradation under the influence of animal husbandry waste. *Theoretical and Applied Ecology*, 2022, no. 3, pp. 219–225 (in Russian). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-3-219-225>

Syrchina N. V., Pilip L. V., Ashikhmina T. Ya. The effect of organic fertilizers on the content of trace elements in the green mass of corn. *Chemistry of Plant Raw Materials*, 2024, no. 1, pp. 372–380. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20240112298>

Tyagi M., da Fonseca M. M. R., de Carvalho C. C. C. R. Bioaugmentation and biostimulation strategies to improve the effectiveness of bioremediation processes. *Biodegradation*, 2011, vol. 22, iss. 2, pp. 231–241. <https://doi.org/10.1007/s10532-010-9394-4>

Varjani S., Upasani V. N., Pandey A. Bioremediation of oily sludge polluted soil employing a novel strain of *Pseudomonas aeruginosa* and phytotoxicity of petroleum hydrocarbons for seed germination. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 737, article no. 139766. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139766>

Vernans B., Iswanto B., Rinanti A. Bioremediation of soil polluted with copper (Cu²⁺) by mixed culture bacteria *Thiobacillus* sp. and *Clostridium* sp. *International Journal of Scientific and Technology Research*, 2019, vol. 8, no. 12, pp. 3915–3919.

- Wackett L. P. Strategies for the biodegradation of polyfluorinated compounds. *Microorganisms*, 2022, vol. 10, no. 8, article no. 1664. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10081664>
- Wang F., Jia X., Zhao Y., Yang X., Feng X. Two strains of cadmium (Cd) – resistant bacteria isolated from soils and their ability to promote oilseed rape (*Brassica juncea* L.) to grow and absorb Cd in soils. *Environmental Pollution*, 2025, vol. 366, article no. 125549. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125549>
- Wang A., Ran C., Wang Y., Zhang Z., Ding Q., Yang Y., Olsen R. E., Ringo E., Bindelle J., Zhou Z. Use of probiotics in aquaculture of China – a review of the past decade. *Fish & Shellfish Immunology*, 2019, vol. 86, pp. 734–755. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2018.12.026>
- Wang Z., Li Z., Gao C., Jiang Z., Huang S., Li X., Yang H. *Bacillus subtilis* as an excellent microbial treatment agent for environmental pollution: A review. *Biotechnology Journal*, 2025, vol. 20, iss. 4, article no. e70026. <https://doi.org/10.1002/biot.70026>
- Wen S., Liu H., Yang R., Wang L., Zhu L., Wang J., Kim Y. M., Wang J. Immobilization of *Bacillus thuringiensis* and applicability in removal of sulfamethazine from soil. *Environmental Pollution*, 2023, vol. 333, article no. 122080. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122080>
- Wen Y., Li C., Song X., Yang Y. Biodegradation of phenol by *Rhodococcus* sp. strain SKC: Characterization and kinetics study. *Molecules*, 2020, vol. 25, no. 16, article no. 3665. <https://doi.org/10.3390/molecules25163665>
- Wu S., Zhou Z., Zhu L., Zhong L., Dong Y., Wang G., Shi K. Cd immobilization mechanisms in a *Pseudomonas* strain and its application in soil Cd remediation. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, vol. 425, article no. 127919. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127919>
- Wu S., Zhong J., Lei Q., Song H., Chen S.-F., Wahla A. Q., Bhatt K., Chen S. New roles for *Bacillus thuringiensis* in the removal of environmental pollutants. *Environmental Research*, 2023, vol. 236, article no. 116699. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116699>
- Yang Y., Zhang W., Zhang Z., Yang T., Xu Z., Zhang C., Guo B., Lu W. Efficient bioremediation of petroleum-contaminated soil by immobilized bacterial agent of *Gordonia alkanivorans* W33. *Bioengineering*, 2023, vol. 10, no. 5, article no. 561. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10050561>
- Yang X., Liu C., Song Z., Wu Q., Liu D., Yu H., Xu M. Development of microbial technology and industry in environmental engineering. *Strategic Study of Chinese Academy of Engineering*, 2025, vol. 27, iss. 3, pp. 175–191. <https://doi.org/10.15302/J-SSCAE-2025.04.017>
- Yang Z., Zhang Z., Chai L., Wang Y., Liu Y., Xiao R. Bioleaching remediation of heavy metal – contaminated soils using *Burkholderia* sp. Z-90. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, vol. 301, pp. 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.08.047>
- Zhang T., Zhang H. Microbial consortia are needed to degrade soil pollutants. *Microorganisms*, 2022, vol. 10, no. 2, article no. 261. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10020261>
- Zhang B., Xu W., Ma Y., Gao X., Ming H., Jia J. Effects of bioaugmentation by isolated *Achromobacter xylosoxidans* BP1 on PAHs degradation and microbial community in contaminated soil. *Journal of Environmental Management*, 2023, vol. 334, article no. 117491. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117491>
- Zhang X., Feng X., Lin Y., Gou H., Zhang Y., Yang L. Degradation of polyethylene by *Klebsiella pneumoniae* Mk-1 isolated from soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2023, vol. 258, article no. 114965. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114965>
- Zuo Z., Gong T., Che Y., Liu R., Xu P., Jiang H., Qiao C., Song C., Yang C. Engineering *Pseudomonas putida* KT2440 for simultaneous degradation of organophosphates and pyrethroids and its application in bioremediation of soil. *Biodegradation*, 2015, vol. 26, iss. 3, pp. 223–233. <https://doi.org/10.1007/s10532-015-9729-2>

Bacteria in bioremediation technologies of polluted soils

N. V. Syrchina ^{1✉}, L. V. Pilip ², T. Ya. Ashikhmina ^{1,3}

¹ Vyatka State University

36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russia

² Vyatka State Agrotechnological University

133 Oktyabrsky Pr., Kirov 610017, Russia

³ Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of RAS

28 Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Republic of Komi 167982, Russia

Received: August 4, 2025 / revised: September 4, 2025 / accepted: September 4, 2025 / published: March 31, 2026

Abstract. Soil protection from pollution and restoration of their natural functions is the most important task of sustainable development. Currently, scientists from different countries are actively conducting research aimed at finding the best technologies for remediation of contaminated areas. Bioremediation technologies that involve the use of various microorganisms (MO), in particular bacteria, for the destruction or inactivation of pollutants can be very promising in this direction. Bacteria have a very flexible genetic apparatus. Due to the mutation process, new genes appear in the genome of these MO, allowing not only to survive in a polluted environment, but also to use xenobiotics to obtain energy and plastic substances. Bacteria belonging to the types Firmicutes, Proteobacteria, Actinobacteria and Cyanobacteria can be of the greatest interest as bioremediation agents. Effective strains of these bacteria are able to inactivate heavy metals, destroy petroleum hydrocarbons, aromatic compounds, pesticides, pharmaceuticals, dyes, synthetic polymers and other pollutants. Metabolic capabilities of bacteria can be expanded and enhanced by editing their genome and creating artificial self-regulating consortia, including symbiotic MO implementing different metabolic pathways. A serious obstacle to the widespread introduction of bioremediation technologies into practice is the insufficient stability and viability of strains grown in bioreactors in the natural environment. The use of the latest achievements in genetic and cellular engineering, intelligent materials, the possibility of targeted delivery of destructor microorganisms and intelligent monitoring can contribute to increasing the stability and efficiency of microbial technologies.

Keywords: soils, bacteria, bioremediation, biodegradation, biodestructor microorganisms, bioremediation agents, xenobiotics

Ethics approval and consent to participate: This work does not contain any studies involving human and animal subjects.

Competing interests: The authors have declared that no competing interests exist.

For citation: Syrchina N. V., Pilip L. V., Ashikhmina T. Ya. Bacteria in bioremediation technologies of polluted soils. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2026, no. 1, pp. 64–86 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2026-1-64-86>

✉ *Corresponding author:* Laboratory of Biomonitoring of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences and Vyatka State University, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Nadezhda V. Syrchina: <https://orcid.org/0000-0001-9695-7146>, nvms1956@mail.ru; Larisa V. Pilip: <https://orcid.org/0000-0001-8049-6760>, pilip_larisa@mail.ru; Tamara Ya. Ashikhmina: <https://orcid.org/0000-0003-4919-0047>, ecolab2@gmail.com.