

Современные подходы к микробной ремедиации нефтезагрязнённых почв

Туркин К. А.

*Институт фундаментальной биологии и биотехнологии Сибирского федерального университета
Красноярск, Красноярский край, Россия
kirill.je.je@yandex.ru*

Микробиологическая ремедиация – эффективный метод реабилитации почв, загрязненных нефтепродуктами. В данной статье представлен обзор литературы по использованию микроорганизмов для ликвидации загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами. Приведены результаты анализа современных подходов и технологий микробной ремедиации, выявлены наиболее эффективные штаммы микроорганизмов и условия, необходимые для максимального ускорения процесса деградации нефти в почвах. В анализе использованы данные научных статей и обзоров по различным аспектам микробной ремедиации. Особое внимание уделено результатам экспериментов по использованию автохтонных и аллохтонных микроорганизмов, а также биостимуляции и биоаугментации как методов повышения эффективности очистки. Исследования показывают, что успешная микробная ремедиация требует комплексного подхода, включающего выявление бактерий и микромицетов, наиболее активных в деградации нефти, корректировку условий окружающей среды для их роста и активности (подбор питательных веществ, регулирование pH, температуры и аэрации) и, при необходимости, добавление конкретных питательных веществ или поверхностно-активных веществ. Микробная ремедиация является перспективной технологией для очистки нефтезагрязнённых почв, способной обеспечить высокий уровень деградации нефти с минимальным воздействием на окружающую среду. Будущие исследования должны быть сосредоточены на оптимизации условий микробной деградации и разработке комплексных подходов, сочетающих различные методы биоремедиации для повышения их эффективности.

Ключевые слова: микробная ремедиация, микроорганизмы, окружающая среда, нефть, почва, нефтепродукты.

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение почв нефтью и нефтепродуктами является одной из наиболее актуальных проблем современной экологии. Разливы нефти приводят к деградации почв, деградации растений и микробов, а также оказывают негативное воздействие на здоровье человека через биоаккумуляцию токсикантов. В этом контексте поиск и разработка эффективных методов очистки почв от разливов нефти представляется чрезвычайно важной задачей (Тусупова, Мелдекул, 2022). Одной из наиболее многообещающих областей в этой сфере является микробная ремедиация – процесс, который использует естественную способность микроорганизмов расщеплять загрязняющие вещества на менее вредные соединения. Благодаря своей экологичности, эффективности и экономическим преимуществам по сравнению с традиционными методами очистки этот метод получил широкое распространение.

Возрастающий интерес к проблеме загрязнения почв нефтью обусловлен активным производством и транспортировкой нефтепродуктов, а также участвовавшими случаями техногенных катастроф, приводящих к аварийным выходам. Существующие физико-химические методы либо малоэффективны, либо требуют больших материальных затрат и могут привести к дополнительному загрязнению почвы. В этом контексте микробная реабилитация представляет собой альтернативный подход, который использует природный потенциал микроорганизмов для восстановления окружающей среды. Однако, несмотря на значительный прогресс в этой области, до сих пор остается ряд нерешенных вопросов, связанных с эффективностью использования микроорганизмов в различных условиях окружающей среды, что делает тему актуальной для дальнейших исследований (Никонов, Потапова, 2018; Пашкевич, Быкова, 2022; Созина, Данилов, 2023).

Актуальность исследования также подтверждается и тем, что Россия, как один из крупнейших производителей и экспортеров нефти и газа в мире, сталкивается с серьезной проблемой загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами. Проблема усугубляется возрастом и износом нефтепроводов, а также частыми прорывами и авариями. Например, в 2020 году Норильская топливная катастрофа, в результате которой более 20 тысяч тонн дизельного топлива вылилось в грунт и водные ресурсы, вызвала большое международное внимание и стала одной из крупнейших экологических катастроф в Арктике.

Что касается мировой статистики, то во всем мире регулярно происходят разливы нефти, возникающие в результате серьезных аварий на нефтепроводах, на морских нефтяных платформах и при транспортировке нефти танкерами. Например, катастрофа в Мексиканском заливе в 2010 году (катастрофа Deepwater Horizon), в результате которой в океан было выброшено около 4,9 миллиона баррелей нефти, является одним из крупнейших и наиболее известных примеров (Ахмадиев, 2014; Лим и др., 2016). Эти и другие инциденты привели к серьезному загрязнению морских и прибрежных экосистем и почв, что подчеркивает глобальную значимость проблемы (Borowik et al., 2017; Chaudhary et al., 2017; Tumanyan et al., 2017; Baoune et al., 2019; Chen et al., 2019; Vasilyeva et al., 2020).

Цель настоящего исследования – на основе анализа современных подходов к микробной реабилитации нефтезагрязненных почв выявить наиболее эффективные методы и технологии, позволяющие максимально ускорить процесс биodeградации нефтяных загрязнителей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данной статье представлен актуальный обзор публикаций, посвященных современным подходам к микробной ремедиации нефтезагрязненных почв. Поиск литературы проводился в Mendeley, Киберленинка, Web of Science, eLIBRARY.RU по следующим ключевым словам: «микробная ремедиация», «микроорганизмы», «окружающая среда», «нефть», «почва», «нефтепродукты».

Анализ включал систематические обзоры, ретроспективные исследования и поиск литературы, опубликованных с 2009 по 2023 год. Включались публикации, содержащие данные по изоляции микроорганизмов, их идентификации и характеристике, методам применения и оценки эффективности. Работа выполнена в рамках реализации программы развития «Приоритет-2030».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования по микробной реабилитации нефтезагрязненных почв показывают разные подходы к ликвидации разливов нефти. В данной работе мы рассмотрим их более подробно.

Развитие методов микробной ремедиации. Каждая из этих работ представляет собой важный вклад в развитие методов микробной очистки и позволяет лучше понять, как можно использовать микроорганизмы для очистки почв, загрязненных нефтепродуктами. Ниже приведен более подробный обзор каждой из этих работ.

Одной из важнейших работ, которая считается классической в той области, является работа исследователей Ж. Б. Тусупова и Д. Э. Мельдекул (2022), изучавших эффективность очистки нефтезагрязненных почв с помощью микроорганизмов. В данной работе исследуется влияние определенных видов микроорганизмов на распад углеводов в нефтезагрязненных почвах. Авторы сосредоточились на выявлении наиболее эффективных штаммов микроорганизмов, которые можно использовать для ускорения процесса биоремедиации. В работе выявлены ключевые механизмы микробной деградации и предложены методы повышения эффективности рекультивации почв.

Другие известные авторы – И. Д. Созина и А. С. Данилов (2023), в своих исследованиях обратили внимание на микробиологическую ремедиацию нефтезагрязненных почв. Исследование посвящено анализу методов микробиологической рекультивации, которые можно использовать для очистки нефтезагрязненных почв. Авторы обсуждают различные

подходы к отбору микроорганизмов, адаптированных к добыче углеводородов, и рассматривают условия, обеспечивающие максимальную эффективность рекультивации. Результаты исследования включают оценку различных микробных консорциумов и их влияние на скорость восстановления почвы.

Следующая работа М. В. Ахмадиева (2014) продемонстрировала использование аборигенных штаммов углеводородокисляющих микроорганизмов при биоремедиации нефтезагрязнённых почв и грунтов. Данная работа посвящена использованию аборигенных (естественно встречающихся в загрязнённой почве) штаммов микроорганизмов для биоремедиации. Автор подробно описывает методику отбора углеводородокисляющих микроорганизмов, способных эффективно разлагать нефтепродукты в различных типах почв. Исследование способствует пониманию того, как можно активировать местную микрофлору для очистки экосистем.

Также стоит упомянуть исследования А. А. Юферева и М. С. Дремовой (2022), работа которых представляет собой анализ микробной ремедиации как метода борьбы с загрязнением почв нефтепродуктами. В работе подчеркивается важность использования микроорганизмов для стимулирования процессов самоочищения в почве и предлагаются стратегии оптимизации биоремедиации. Авторы рассматривают различные методы повышения жизнеспособности и активности микроорганизмов в загрязнённых средах, а также обсуждают возможные применения биотехнологий.

Метод адсорбционной ремедиации нефтезагрязнённых почв с высокой концентрацией поллютанта был исследован Г. К. Васильевой с соавторами (2020). Авторы исследуют использование адсорбентов в сочетании с микробиологическими процессами для повышения эффективности удаления нефтяных загрязнений и подчеркивают важность синергизма между физическими и биологическими методами.

Исследования различных ученых в области микробной реабилитации нефтезагрязнённых почв подчеркивают потенциал использования микроорганизмов в процессах реабилитации окружающей среды. Работы М. В. Ахмадиева (2014), Ж. Б. Тусупова и Д. Е. Мельдекула (2022), И. Д. Созиной и А. С. Данилова (2023) и других авторов иллюстрируют успехи в подборе эффективных штаммов углеводородокисляющих микроорганизмов, изучении механизмов их деградации нефтепродуктов, разработке комплексных подходов биоремедиации.

Особое внимание уделено не только адаптации микроорганизмов к конкретным условиям загрязнённых почв, но и синергическому взаимодействию используемых штаммов и технологических решений для улучшения процессов самоочищения. Достижения в этой области открывают путь для разработки инновационных и экологически безопасных методов реабилитации, включая сочетание биологических вмешательств и физико-химических методов, в то время как исследования микробного разнообразия остаются ключевым аспектом эффективной реабилитации загрязнённых территорий.

При рассмотрении различных подходов микробной ремедиации нефтезагрязнённых почв нельзя не отметить важность учёта природных особенностей загрязнённых территорий, особенно в уязвимых регионах с низкими температурами. Например, в недавнем исследовании С. С. Попова с соавторами (2024) была проведена комплексная оценка загрязнённости нефтепродуктами почв ряда островов архипелага Земля Франца-Иосифа. Авторы отметили, что содержание нефтяных углеводородов в некоторых пробах превышает фоновый уровень в несколько раз, при этом способность природных сообществ к самоочищению крайне ограничена низкими температурами и отсутствием доступных питательных субстратов. По мнению исследователей, при таких условиях требуются специально адаптированные консорциумы микроорганизмов, а также стимуляция их активности с помощью внесения азота- и фосфорсодержащих соединений или биоактивных добавок.

Это подтверждает тезис о том, что для успешной микробной ремедиации в различных климатических условиях необходим тщательный отбор адаптированных к местной среде штаммов. К примеру, микроорганизмы, выделенные из почв при низких температурах,

нередко обладают способностью синтезировать собственные биоПАВ (сурфактин, рамнолипид), которые снижают поверхностное натяжение углеводов и способствуют их эмульгированию, делая загрязняющие вещества более доступными для микробной деградации (Baoune et al., 2019; Vasilyeva et al., 2020).

Каждая из этих работ демонстрирует различные подходы и методы в области микробной ремедиации и даёт важные научные данные для разработки более эффективных технологий очистки почв от нефтяных загрязнений. Для наглядного представления информации о рассмотренных в обзоре работах различных авторов, использованных методах микробной ремедиации, решаемых проблемах и полученных результатах в таблице 1 обобщены ключевые характеристики проведённых исследований.

Перспективы развития. Перспективные направления включают разработку универсальных протоколов для оценки потенциала существующей микрофлоры почвы и интеграцию физико-химических методов в микробную ремедиацию для повышения эффективности. Также актуальным является изучение взаимодействия между различными

Таблица 1

Основные работы по микробной ремедиации нефтезагрязнённых почв: проблемы, методы, результаты

Авторы	Проблема	Метод	Ключевой результат
1	2	3	4
Созина И. Д., Данилов А. С., 2023	Микробиологическая рекультивация почв	Анализ подходов к отбору адаптированных штаммов и условия их применения	Оценены различные микробные консорциумы и условия, обеспечивающие максимальную эффективность рекультивации
Тусупова Ж. Б., Мелдекул Д. Е., 2022	Очистка нефтезагрязнённых почв	Изучение влияния различных микроорганизмов на разложение углеводородов	Выявлены наиболее эффективные штаммы и ключевые механизмы микробной деградации нефти
Юфереев А. А., Дремова М. С., 2022	Микробная ремедиация как метод очистки почв	Анализ стратегий повышения жизнеспособности микроорганизмов	Предложены стратегии оптимизации микробной ремедиации и стимулирования процессов самоочищения почв
Васильева Г. К. и др., 2020	Адсорбционная ремедиация нефтезагрязнённых почв	Совместное применение сорбентов и биоремедиации	Показано, что сочетание адсорбентов с микробиологическими методами существенно повышает эффективность удаления нефтяных загрязнений
Chen Y. et al., 2019	Биоразложение нафталина	Изоляция и характеристика новых штаммов бактерий	Описан <i>Devosia naphthalenivorans</i> – новый вид, специализирующийся на разложении нафталина

Таблица 1 (продолжение)

1	2	3	4
Eddy S. R., 2019	Методы идентификации микробов для биоремедиации	Разработка инструментов поиска гомологий на основе вероятностных методов	Разработаны новые биоинформатические инструменты для идентификации и характеристики микроорганизмов, участвующих в биоремедиации
Chaudhary D. K. et al., 2017	Новый вид бактерий для биоремедиации	Изоляция и описание нового вида из нефтезагрязнённых почв	Открыт новый вид <i>Lysobacter olei</i> , способный участвовать в разложении нефтепродуктов
Germaine C. J. et al., 2015	Фиторемедиация нефтезагрязнённых почв	Метод «Ecopiling»	Разработана инновационная система, демонстрируется синергия фито- и микробных технологий для улучшения очистки
Ахмадиев М. В., 2014	Биоремедиация загрязнённых почв и грунтов	Отбор аборигенных углеводородокисляющих штаммов из загрязнённых почв	Описана методика выбора эффективных местных штаммов, показано, как активировать естественную микрофлору

видами микроорганизмов и разработка экологически чистых методов их внедрения в загрязненные среды.

Разработанный К. Дж. Джемейном с соавторами (Germaine et al., 2015) метод «Ecopiling» объединяет в себе фиторемедиацию и пассивные биоплёнки для реабилитации загрязненных углеводородами почв на разных уровнях. Эта инновационная система показывает, как сочетание различных методов может значительно повысить эффективность ремедиации.

Работа Д. К. Чудрея с соавторами (Chaudhary et al., 2017) представляет собой открытие нового вида бактерий, выделенных из загрязненных нефтью почв, которые могут участвовать в разложении нефтепродуктов. Описание *Lysobacter olei* указывает на потенциальное использование этого вида в технологиях биоремедиации.

Исследование Е. Чен с коллегами (Chen et al., 2019) представляет еще один новый вид бактерий, специализирующийся на разложении нафталина. Открытие *Devosia naphthalenivorans* подчеркивает важность изучения микробного разнообразия для поиска эффективных средств микробиологической реабилитации окружающей среды.

С. Р. Эдди (Eddy, 2019) описывает разработку новых инструментов поиска гомологии, основанных на вероятностных методах, которые важны для идентификации и характеристики микроорганизмов, участвующих в процессах биоремедиации.

Таким образом, каждая из этих работ демонстрирует различные подходы и методы в области микробной ремедиации и дает важные научные данные для разработки более эффективных технологий очистки почв от нефтяных загрязнений.

Перспективы развития микробной ремедиации нефтезагрязнённых почв связаны с углублённой адаптацией микроорганизмов к специфическим условиям загрязнённых территорий. Ключевыми направлениями являются:

1. Формирование консорциумов микроорганизмов с синергетическим эффектом. Разнообразные сообщества, включающие виды с различной метаболической активностью,

обеспечивают более полное разрушение нефтяных углеводов (Ж. Б. Тусупов и Д. Э. Мельдекул, 2022; И. Д. Созина и А. С. Данилов, 2023).

2. Стимулирование синтеза ПАВ в клетках микроорганизмов для увеличения биодоступности загрязнителей. Например, у некоторых родов бактерий при адаптации к хроническому нефтяному загрязнению активируется продукция поверхностно-активных веществ, способствующих эмульгированию углеводов и облегчению их метаболизма (Vasilyeva et al., 2020).

3. Интеграция с физико-химическими методами. Сочетание микробной ремедиации с фиторемедиацией, например, методом «Ecopiling» (Germaine et al., 2015) или с адсорбционными методами позволит повысить эффективность комплексных систем очистки почв.

Кроме того, важно предусматривать мониторинг микробной активности в реальном времени при помощи современных молекулярно-генетических методов, таких как метагеномный анализ или ПЦР с видоспецифическими праймерами, позволяющими оценить изменение структуры микробных сообществ и степень деградации нефтяных углеводов (Eddy, 2019). Это даст возможность оперативной корректировки параметров процесса ремедиации для достижения максимальных показателей очистки.

Внедрение новых технологий очистки почв от нефтезагрязнений (новые достижения). В настоящее время в России активно разрабатываются и внедряются новые технологии очистки почв от разливов нефти с целью повышения эффективности за счет инновационных решений (Лим и др., 2016). Важность этих разработок обусловлена значительным воздействием на окружающую среду добычи и переработки нефти в стране. Ниже приведены некоторые из последних достижений в этой области:

1. Биоремедиация местными микроорганизмами. Исследователи различных научно-исследовательских институтов и университетов (Институт микробиологии им. С. Н. Виноградского РАН; Институт проблем нефти и газа РАН, Тюменский государственный университет; Дальневосточный федеральный университет) России активно работают над поиском и использованием специфических штаммов микроорганизмов, способных расщеплять углеводороды нефти (Тусупова, Мелдекул, 2022; Пашкевич, Быкова, 2022; Созина, Данилов 2023). Эти микроорганизмы можно изолировать непосредственно с загрязненных территорий, что обеспечивает их высокую адаптацию к местным условиям.

2. Фиторемедиация адаптированными растениями. Разработка и внедрение методов фиторемедиации с использованием растений, адаптирующихся к высоким концентрациям нефтепродуктов в почве и способных активно поглощать их с участием ризосферных микроорганизмов или расщеплять через корневую систему.

3. Термическая десорбция. Российские инженеры и ученые разрабатывают устройства для термической обработки загрязненных почв, позволяющие получать из них нефтепродукты методом термодесорбции. Этот метод подходит для обработки больших объемов загрязненной почвы и позволяет впоследствии использовать очищенную почву для рекультивации земель (Никонов, Потапова, 2018).

4. Сурфактанты и нанотехнологии. Использование синтетических и биологических ПАВ для повышения эффективности отделения компонентов нефти от почвы. Нанотехнологии открывают новые возможности для производства высокоэффективных ПАВ с контролируемыми свойствами, которые позволяют существенно улучшить процессы извлечения загрязняющих веществ.

5. Комплексные подходы. Разработка комплексных систем очистки, включающих сочетание физических, химических и биологических методов (например, многоступенчатая очистка с механической предварительной очисткой, биоремедиацией и окончательной фильтрацией), позволяет повысить эффективность очистки за счет синергии различных процессов.

Эти достижения демонстрируют стремление России разрабатывать и внедрять передовые технологии в области очистки почв от разливов нефти, что особенно важно в контексте

сохранения и восстановления окружающей среды в регионах с активной добычей и переработкой нефти.

На основе исследования можно сделать несколько важных выводов, отражающих современное состояние и перспективы использования микробных технологий для очистки почв от разливов нефти (Коряжкина, 2009; Ахмадиев, 2014; Гекк, Ларькова, 2015; Лим и др., 2016; Аббасян и др., 2016; Коршунова, Логинов, 2019; Baoune et al., 2019; Chen et al., 2019; Eddy, 2019, Soboleva et al., 2020; Vasilyeva et al., 2020; Yuferev, Dremova, 2022):

1. Эффективность местных штаммов микроорганизмов. Исследования показывают, что использование аборигенных микроорганизмов, выделенных непосредственно из загрязнённых территорий, является одним из наиболее эффективных подходов к биоремедиации. Эти штаммы хорошо адаптируются к местным условиям и способны эффективно расщеплять нефтяные углеводороды.

2. Комбинированный подход к очистке. Хотя микробная ремедиация сама по себе является многообещающим методом, наиболее успешные результаты достигаются при комбинированном подходе. Сюда могут входить физические методы, такие как добавление питательных веществ или изменение условий окружающей среды (например, вентиляция) для стимулирования активности и роста микроорганизмов.

3. Биостимуляция и биоаугментация. Биостимуляция, то есть стимулирование роста местных микробных сообществ путем добавления питательных веществ и/или изменения физико-химических условий, и биоаугментация - введение специфических штаммов микроорганизмов оказались эффективными стратегиями, которые можно использовать как по отдельности, так и вместе для повышения эффективности ремедиации.

4. Разработка консорциумов микроорганизмов. Исследования показали, что использование консорциумов микроорганизмов, то есть совместное использование нескольких видов с разными специализированными способностями к расщеплению нефтепродуктов может значительно повысить эффективность очистки по сравнению с использованием одного штамма.

5. Важность мониторинга и контроля. Для достижения наилучших результатов биоремедиации важно не только правильно подобрать методы и штаммы микроорганизмов, но и тщательно контролировать процесс лечения. Сюда входит мониторинг состава почвы, концентрации загрязняющих веществ, климатических условий и других факторов, которые могут повлиять на успех восстановления.

6. Перспективы и проблемы. Несмотря на значительный потенциал микробной реабилитации, существуют технические, экономические и экологические проблемы, связанные с крупномасштабным применением этой технологии. Это включает в себя разработку более эффективных и адаптированных микроорганизмов, совершенствование методов мониторинга и контроля, а также оценку долгосрочного воздействия на экосистемы.

Таким образом, микробная ремедиация является перспективной и экологически чистой технологией очистки нефтегрязевых грунтов, однако ее успешное применение требует комплексного подхода, включающего дальнейшие исследования и совершенствование существующих технологий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования современных подходов к микробной ремедиации нефтешламовых почв выявлены ключевые факторы, способствующие эффективному использованию микроорганизмов в процессах биodeградации нефтяных углеводородов. Установлено, что использование местных штаммов микроорганизмов и формирование консорциумов с учетом

разнообразия деградиционных способностей существенно повышает эффективность процессов очистки. Комбинированный подход, включающий биостимуляцию и биоаугментацию, позволяет создать оптимальные условия для активации процессов биодеградаций и расширения спектра разлагаемых компонентов нефти.

Однако для масштабного внедрения и повышения эффективности микробной ремедиации необходимо уделять повышенное внимание изучению микробных сообществ, особенностей их взаимодействия и адаптации к различным условиям загрязнения. Роль точного мониторинга и адаптивного управления процессами рекультивации имеет решающее значение для достижения целей реабилитации в различных условиях окружающей среды. Однако экономическая и экологическая оценка методов микробной реабилитации, включая анализ их долгосрочного воздействия на почвы и водные экосистемы, остается важным аспектом будущих исследований.

Таким образом, микробная реабилитация нефтезагрязненных почв является перспективным направлением со значительным потенциалом экологически устойчивой реабилитации загрязненных территорий. Успех его применения зависит от глубокого понимания микробных процессов, подходов к стимуляции микробной активности и разработки инновационных технологий мониторинга. Продолжение исследований в этой области позволит усовершенствовать технологии биоремедиации, сделав их более эффективными, экономически выгодными и экологически безопасными.

Список литературы

- Аббасян Ф., Локингтон Р., Мегарадж М., Найду Р. Изменения биоразнообразия в микробной популяции почв, загрязненных сырой нефтью // Современная микробиология. – 2016. – Т. 72, № 6. – С. 23–28.
- Ахмадиев М. В. Применение нативных штаммов углеводородокисляющих микроорганизмов в биоремедиации нефте-загрязненных почв и грунтов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2014. – № 2 (14). – С. 15–26.
- Гекк А. С., Ларькова А. Н. Использование растений и биоразлагаемых сорбентов для биоремедиации нефтезагрязненных почв // Экология Южной Сибири и сопредельных территорий (сб. научн. конф.). – Абакан, 2015. – Т. 1. – С. 175.
- Коршунова Т. Ю., Логинов О. Н. Нефтьшамы: состояние проблемы в РФ и методы снижения их воздействия на окружающую среду // Экобиотех. – 2019. – Т. 2, № 1. – С. 75–85.
- Коряжкина М. Ф. Полифункциональный комплекс микроорганизмов для повышения эффективности биоремедиации прибрежных нефтезагрязненных территорий // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2009. – № 9. – С. 59–61.
- Лим М. В., Фон Лау Э., По П. Э. Комплексное руководство по технологиям восстановления загрязненных нефтью почв — текущие работы и будущие направления // Бюллетень загрязнения моря. – 2016. – Т. 72, № 6. – С. 663–670.
- Никонов А. Н., Потапова С. О. Нефтяная промышленность как один из серьезных загрязнителей окружающей среды // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2018. – Т. 1, № 9. – С. 666–673.
- Пашкевич М. А., Быкова М. В. Методология термодесорбционной очистки локальных загрязнений почв от нефтепродуктов на объектах минерально-сырьевого комплекса // Записки Горного института. – 2022. – Т. 253. – С. 49–60. DOI: 10.31897/PMI.2022.6.
- Попов С. С., Никитина М. В., Хекимова Н. Б., Наквасина Е. Н. Оценка содержания нефтепродуктов в почвах некоторых островов архипелага Земля Франца-Иосифа // Экосистемы. – 2024. – № 40. – С. 26–31.
- Созина И. Д., Данилов А. С. Микробиологическая ремедиация нефтезагрязненных почв // Записки Горного института. – 2023. – Т. 260. – С. 297–312. DOI: 10.31897/PMI.2023.8.
- Тусупова Ж. Б., Мелдекул Д. Е. Эффективность очистки нефтезагрязненных почв с использованием микроорганизмов // Молодой ученый. – 2022. – № 18 (413). – С. 522–524.
- Baoune H., Aparicio J. D., Acuña A., El Hadj-khelil A. O., Sanchez L., Polti M. A., et al. Effectiveness of the *Zea mays*-*Streptomyces* association for the phytoremediation of petroleum hydrocarbons impacted soils // Ecotoxicology and Environmental Safety – 2019. – Vol. 184. – Article 109591. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.109591.
- Borowik A., Wyszowska J., Oszust K. Functional diversity of fungal communities in soil contaminated with diesel oil // Frontiers in Microbiology – 2017. – Vol. 8. – Article 1862. DOI: 10.3389/fmicb.2017.01862.
- Chaudhary D. K., Lee S. D., Kim J. *Lysobacter olei* sp. nov., isolated from oil-contaminated soil // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology – 2017. – Vol. 67. – P. 4660–4666. DOI: 10.1099/ijsem.0.002348.
- Chen Y., Zhu S., Lin D., Wang X., Yang J., Chen J. *Devosia naphthalenivorans* sp. nov., isolated from East Pacific Ocean sediment // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology – 2019. – Vol. 69. – P. 1974–1979. DOI: 10.1099/ijsem.0.003410.

Eddy S. R. A new generation of homology search tools based on probabilistic inference // *Genomics and Informatics*. – 2019. – Vol. 23. – P. 205–211. DOI: 10.1142/9781848165632_0019.

Gauchotte-Lindsa C., Aspray T. J., Knapp C. M., Ijaz U. Z. A systems biology approach to elucidation of contaminant biodegradation in complex samples – integration of high-resolution analytical and molecular tools // *Faraday Discussions*. – 2019. – Vol. 218. – P. 481–504. DOI: 10.1039/c9fd00020h.

Germaine K. J., Byrne J., Liu X., Keohane J., Culhane J., Lally R. D., et al. Ecopiling: a combined phytoremediation and passive biopiling system for remediating hydrocarbon impacted soils at field scale // *Frontiers in Plant Science* – 2015. – Vol. 5. – Article 756. DOI: 10.3389/fpls.2014.00756.

Soboleva O. M., Kolosova M. M., Filipovich L. A. Electromagnetic field of super high frequency as a method for controlling microbial exchange of poultry feed // *Modern Trends in Agricultural Production in the World Economy: XVIII International Scientific and Practical Conference*. – Kemerovo: Kuzbass State Agricultural Academy, 2020. – P. 138–144.

Tumanyan A. F., Tyutyuma N. V., Bondarenko A. N., Shcherbakova N. A. Influence of oil pollution on various types of soil // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. – 2017. – Vol. 53 (3). – P. 369–376. DOI: 10.1007/s10553-017-0813-7.

Vasilyeva G., Kondrashina V., Strijakova E., Ortega-Calvo J.-J. Adsorptive bioremediation of soil highly contaminated with crude oil // *Science of The Total Environment*. – 2020. – Vol. 706. – Article 135739. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135739.

Yuferev A. A., Dremova M. S. Microbiological remediation of oil-contaminated soils // *Современные технологии в сфере сельскохозяйственного производства и образования: Материалы XIII Международной научно-практической конференции на иностранных языках (Кемерово, 27 октября 2022 г.)*. – 2022. – С. 365–367.

Turkin K. A. Modern Approaches to Microbial Remediation of Oil-Contaminated Soils // *Ekosistemy*. 2025. Iss. 43. P. 61–69.

Microbiological remediation is an effective method for the rehabilitation of soils contaminated with petroleum products. This article examines the use of microorganisms for the elimination of soil contamination caused by crude oil and its derivatives. The study aims to analyze current approaches and technologies in microbial remediation, identify the most effective microbial strains, and determine the conditions necessary to maximize the degradation rate of oil in soils. The analysis is based on data from scientific articles and reviews addressing various aspects of microbial remediation. Particular attention is given to experimental results on the use of autochthonous and allochthonous microorganisms, as well as biostimulation and bioaugmentation methods to enhance the efficiency of remediation. The findings indicate that successful microbial remediation requires an integrated approach, including the identification of key oil degrading bacteria and fungi, adjustment of environmental parameters to support their growth and activity (e.g., nutrient selection, pH regulation, temperature control, and aeration), and, if necessary, the addition of specific nutrients or surfactants. Microbial remediation is a promising technology for treatment of oil-contaminated soils, capable of achieving substantial oil degradation with minimal environmental impact. Further research should focus on optimizing conditions for microbial degradation and developing integrated approaches that combine various bioremediation methods to enhance their effectiveness.

Keywords: microbial remediation, microorganisms, environment, oil, soil, petroleum products.

Поступила в редакцию 17.12.24

Принята к печати 26.06.25