



Обзорная статья

Микробиологическая ремедиация нефтезагрязненных почв

И.Д.СОЗИНА^{1,2}✉, А.С.ДАНИЛОВ²¹ АО «Новая Авиация», Санкт-Петербург, Россия² Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: 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

Аннотация. Микробиологическая ремедиация – перспективная технология ликвидации загрязнения окружающей среды нефтью и нефтепродуктами, основанная на использовании метаболического потенциала микроорганизмов. Проблема загрязнения окружающей среды сырой нефтью и продуктами ее переработки актуальна в Российской Федерации, поскольку нефтяная промышленность – одна из ведущих отраслей страны. Для очистки нефтезагрязненных почв широко применяются механические и физико-химические методы рекультивации. Однако у методов, относящихся к этим группам, есть ряд значительных недостатков, что актуализирует разработку новых методов (преимущественно биологических), поскольку они более экологически чистые, экономически выгодные, менее трудозатратные и не требуют использования технических мощностей. Разработаны различные биопрепараты на основе штаммов и консорциумов микроорганизмов, имеющие доказанную эффективность. В их состав входят представители родов бактерий, микроскопических грибов и микроводорослей, вещества или материалы, выступающие в качестве сорбентов биологических агентов и предназначенные для удержания их в почве и повышения эффективности биоремедиации, а также некоторые питательные вещества. Представлены статистические данные, наиболее эффективные методы и технологии, а также примеры опыта применения микроорганизмов для восстановления нефтезагрязненных почв в различных климатических условиях.

Ключевые слова: биоремедиация; нефтезагрязненные почвы; нефть; загрязнение окружающей среды; рекультивация; биопрепарат; углеводородокисляющие микроорганизмы

Поступила: 12.05.2022

Принята: 17.11.2022

Онлайн: 14.02.2023

Опубликована: 25.04.2023

Введение. Нефтедобывающую и нефтеперерабатывающую отрасли можно отнести к одним из ведущих отраслей промышленности по количеству образующихся отходов [1]. По данным Росстата¹, в 2020 г. в России количество отходов при добыче сырой нефти и природного газа, а также при производстве кокса и нефтепродуктов составило 8127,1 и 928,6 тыс. т соответственно. Большая часть образующихся отходов приходится на нефтедобывающие компании (более 1 млн т нефтешламов и нефтезагрязненных грунтов), нефтеперерабатывающие заводы (0,7 млн т), нефтебазы (0,3 млн т), железные дороги, аэропорты и морские порты (0,5 млн т) [2].

Нефть является ценным энергоресурсом, обеспечивающим по разным оценкам 30–35 % мирового потребления энергии [3, 4].

Согласно Федеральному классификационному каталогу отходов, нефтесодержащие отходы относятся к третьему (умеренно опасные отходы, содержание нефтепродуктов 15 % или более) или четвертому классу опасности (малоопасные вещества, содержание нефтепродуктов менее 15 %). Нефть в чистом виде, в зависимости от фракционного состава и примесей, относят ко второму или третьему классу опасности в соответствии с действующей нормативной документацией (ГОСТ Р 51858-2020). Присутствие в составе нефти летучих ароматических углеводородов, нафталина, а иногда соединений серы и других примесей, обуславливает ее высокую экологическую опасность как отхода деятельности человека.

¹ Основные показатели охраны окружающей среды. Статистический бюллетень. М.: Федеральная служба государственной статистики, 2021. С. 41.



Загрязнение окружающей среды происходит при строительстве и эксплуатации нефтедобывающих скважин, транспортировке и переработке углеводородного сырья и других процессов, связанных с увеличением добычи и транспорта нефти [5]. По некоторым данным, более трети от общего числа нефтяных загрязнений связано с транспортными перевозками [6]. Из-за низкой растворимости, неполярной и гидрофобной природы компонентов нефти физическое и химическое удаление загрязнителей затруднено [7]. Растворимость в воде углеводородов, входящих в состав нефти, зависит от их строения, молекулярной массы и температуры окружающей среды. При температуре 25 °С и атмосферном давлении (0,1 МПа) наибольшей растворимостью обладают низшие углеводороды (табл.1). Растворимость среди углеводородов с одинаковым числом атомов углерода падает в ряду: арены, нафтены, алканы [8].

Таблица 1

**Растворимость нефтяных углеводородов в воде при 25 °С
и атмосферном давлении 0,1 МПа**

Соединение	Растворимость, мг/мл	Соединение	Растворимость, мг/мл
Алканы			
Метан	24,4	2-Метилпентан	13,8
Этан	60,4	2,2-Диметилпентан	18,4
Пропан	62,4	2,4-Диметилпентан	4,06
<i>n</i> -Бутан	61,4	<i>n</i> -Гептан	2,93
Изобутан	48,9	<i>n</i> -Октан	0,66
<i>n</i> -Пентан	38,5	<i>n</i> -Нонан	0,122
Изопентан	47,8	<i>n</i> -Декал	0,022
<i>n</i> -Гексан	9,5		
Циклические соединения			
Циклопентан	156,0	Метилциклопентан	42,0
Циклогексан	55,0	Метилциклогексан	14,0
Ароматические соединения			
Бензол	1780,0	Этилбензол	152,0
Толуол	515,0	1,2,4-Триметилбензол	57,0
<i>o</i> -Ксилол	175,0	Изопропилбензол	50,0
Полициклические ароматические соединения			
Индан	109,1	Фенантрен	1,29
Нафталин	31,7	Пирен	0,135 (2,4)
Дифенил	7,0	Антрацен	0,073 (3,2)
Флуорен	1,98	Хризен	0,002

В результате загрязнения происходят необратимые изменения: нарушение естественных биоценозов, изменение их видового разнообразия; снижение дыхательной и продуктивной способности организмов; изменение ферментативной активности почв; ухудшение качества жизни и здоровья людей [9]. В мировой истории произошло множество аварийных разливов нефтепродуктов, многие из которых стали причиной экологических катастроф. Так, при крушении мальтийского танкера *Erika* в 1999 г. в Бискайском заливе (около 20 тыс. т мазута) водонефтяной смесью оказалось залито около 400 км побережья. На побережье собрано 65 тыс. загрязненных нефтью морских птиц, из которых 50 тыс. уже погибли. Пострадали важные прибрежные морские промыслы, участки марикультуры, туристические зоны в провинциях Бретань и Вандея [10].

20 апреля 2010 г. в 80 км от побережья штата Луизиана (США) в Мексиканском заливе произошел взрыв на нефтяной платформе *Deepwater Horizon*. Главной причиной экологического бедствия стал именно разлив нефти – было загрязнено почти 1800 км побережий, погибли десятки тысяч морских животных и птиц [10].

28 ноября 2015 г. на о-ве Сахалин в районе порта Невельск произошло крушение нефтеналивного танкера «Надежда». В результате повреждения корпуса нефтепродукты попали в акваторию Татарского пролива. Площадь загрязнения акватории составила более 20 тыс. м², протяженность загрязненной береговой полосы – около 7 км, массово погибли птицы и рыбы.



Существуют различные методы ликвидации нефтяных загрязнений: механические, физико-химические и биологические [11]. Наиболее широко применяются механические методы, однако их воздействие зачастую наносит не меньший ущерб окружающей среде, чем нефтяное загрязнение [12, 13]. Также используются некоторые физико-химические методы, в частности сорбционный [14], недостатком которого является необходимость утилизации отработанных сорбентов. Физико-химический метод – внесение мелиорантов [15, 16], например, на основе осадков сточных вод [17] – не всегда применим и достаточно эффективен, а также требует дополнительного исследования каждого конкретного осадка и условий рекультивируемых территорий.

Неорганические сорбенты, представленные диатомитовыми породами, различными видами глин, песком, пемзой, цеолитами и др., среди которых наиболее широко используются диатомиты и глина из-за низкой стоимости и возможности производить их в больших объемах, а также песок (используют для засыпки небольших участков разливов нефти и нефтепродуктов), обладают низкой сорбционной емкостью (70-150 % по нефти) и не удерживают бензин, дизельное топливо, керосин. При ликвидации последствий разливов нефтепродуктов в водной среде неорганические сорбенты тонут вместе с нефтью, чем вносят свой вклад в загрязнение водоемов. Чаще всего сорбенты утилизируют путем выжигания (при этом происходит выброс парниковых газов), промывки водой с определенной концентрацией поверхностно-активных веществ или экстрагентов (что может привести к эвтрофикации водоемов, куда сбрасываются сточные воды) либо путем складирования отработанных сорбентов в отвалы (источник целого комплекса экологических проблем).

Синтетические сорбенты имеют самую низкую себестоимость и могут производиться из отходов промышленного производства. Они отличаются объемностью, легким весом, плавучестью после поглощения нефти, высокой скоростью сорбции, возможностью регенерации и повторного использования. Широко используют формованный полиэтилен с полимерными наполнителями, полиуретан в гранулированном или губчатом виде и другие виды пластиков, прессованные базальтовые или полипропиленовые волокна (показатели поглощения нефти: 6,1-7,2 г/г для базальтовых волокон; 3,8-4,5 г/г – для полипропиленовых). Использование углеткани для сорбции нефти удорожает фильтрующие элементы, но показывает высокий эффект очистки – 10,2-10,6 г/г. Синтетические сорбенты не подвергаются биологическому распаду, при утилизации требуют сжигания, что влечет значительные экологические проблемы, связанные с выбросом парниковых газов и токсичных продуктов сгорания синтетических материалов, дополнительными затратами топлива и электроэнергии.

В качестве органических сорбентов чаще применяются торф, макулатура, опилки, шерсть, высушенные злаковые культуры и др. Такие сорбенты обладают малой сорбционной емкостью (не более 15 кг/кг) и низкой скоростью адсорбции, поэтому их используют при толщине нефтяной пленки не более 0,1 мм [18]. По этой причине существует потребность в разработке новых экологически чистых, недорогих, простых, устойчивых и эффективных методов удаления нефтепродуктов из загрязненных почв [19]. Биологические (биоремедиационные и фиторемедиационные) методы показали многообещающие результаты для восстановления почв, загрязненных сырой нефтью [20] и продуктами ее переработки [21].

Микробиологическая ремедиация – метод, основанный на способности микроорганизмов к деградации органических загрязнителей посредством включения таких веществ в свой метаболический цикл – один из наиболее эффективных методов ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на этапе доочистки загрязненных участков [22, 23].

Представлен обзор существующих статистических данных, российских и зарубежных разработок и направлений исследований, посвященных микробиологической биоремедиации нефтезагрязненных почв.

Обсуждение. *Основные сведения о нефтяных загрязнениях.* Сырая нефть – основной ресурс для производства нефтяных фракций, топлив, масел и различных материалов. Содержит в основном нефтяные углеводороды, классифицированные на алифатические, ароматические соединения, смолы и асфальтены [24].

По данным Росстата за 2019 г. в России площадь нарушенных и отработанных земель вследствие аварий при транспортировке нефти, газа и продуктов переработки составила 3120 га, а площадь рекультивированных земель из этой категории за тот же период – 806 га (табл.2).



Таблица 2

Площадь нарушенных вследствие загрязнения нефтепродуктами отработанных и рекультивированных земель в России в 2015-2019 гг.²

Причина деградации земель	Год				
	2015	2016	2017	2018	2019
Нарушено, га:					
Всего	136232	444503	25642	119481	194225
Вследствие утечки при транзите нефти, газа, продуктов переработки нефти	821	514	995	131	3120
Отработано, га:					
Вследствие утечки при транзите нефти, газа, продуктов переработки нефти	382	463	709	188	2892
Рекультивировано, га:					
Всего	86552	92052	98673	59397	102225
Вследствие утечки при транзите нефти, газа, продуктов переработки нефти	492	547	639	178	806

Площадь нарушенных и отработанных земель в России остается значительной, а растущие темпы рекультивации не способны в полной мере компенсировать ущерб, наносимый окружающей среде вследствие разливов нефтепродуктов. Основные источники нефтяных загрязнений почвы: утечки при аварии на транспорте и трубопроводах, при бурении скважин и нефтедобыче; места складирования отходов нефтепереработки; природные катастрофы; бытовые отходы и др. [25]. За 2021 г. в России произошло около 32 аварий с разливом нефти или нефтепродуктов, и ежегодно происходит до 10 тыс. разгерметизаций промысловых трубопроводов. Самой крупной аварией в 2021 г. стал разлив нефти на морском терминале Каспийского трубопроводного консорциума под Новороссийском. Причиненный ущерб окружающей среде оценивается более чем в 4 млрд руб.

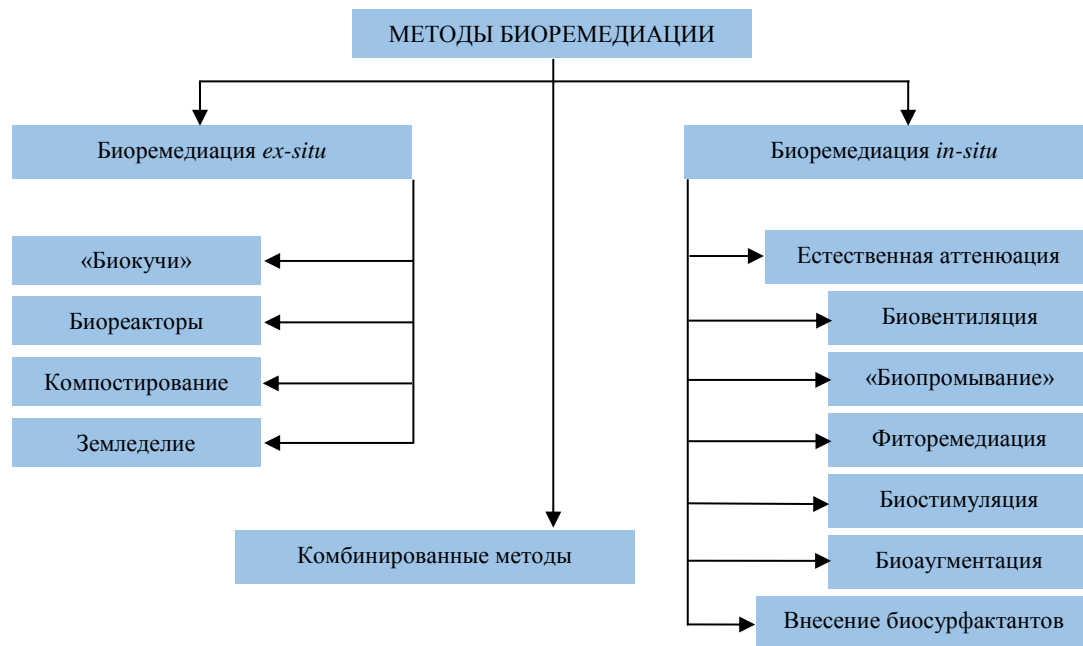
Микробиологическая ремедиация. Развитие биоремедиационных технологий для восстановления загрязненных почв началось в 1970-е годы именно для очистки земель, прилегающих к районам нефтедобычи. Биоремедиация в основном применяется к матрицам, таким как почва или некоторые типы сточных вод, и может осуществляться *in-situ* (на месте) или *ex-situ* (в биореакторах) [26]. Почвы являются вторым по изученности объектом биоремедиации после воды, на который приходится 46 % статей и 36 % патентов от общего объема по всему миру. Это свидетельствует о том, что данная проблема остается актуальной [27].

К достоинствам микробиологической биоремедиации можно отнести относительную экономичность технологии, простоту применения, доступность материалов и экологичность метода. Достоинства обоснованы работой ферментативных систем микроорганизмов. Их метаболизм позволяет расщеплять нефть и использовать нефтяные фракции в качестве источника углерода и энергии [28]. Биоремедиационные технологии разнообразны, однако можно выделить ряд основных методов (см. рисунок).

Биоремедиация *in-situ* и основные методы, относящиеся к этой группе, являются наиболее привлекательными, поскольку восстановление происходит без изъятия и транспортировки загрязняющих веществ. Однако восстановление *in-situ* больше подходит для ликвидации поверхностных загрязнений и не всегда эффективно при проникновении загрязнителя в глубокие слои почвы [29, 30]. Метод биоремедиации *ex-situ* заключается в удалении или извлечении и восстановлении загрязненной почвы [31].

Существуют также комбинированные методы, суть которых заключается в одновременном или последовательном применении комбинации методов. Например, в микробиологической ремедиации комбинированный метод может заключаться в изъятии аборигенных микроорганизмов из загрязненных почв с последующим внесением в загрязненный участок после культивирования микроорганизмов в реакторе. Суть методов, используемых для микробиологической биоремедиации, их главные достоинства и недостатки представлены в табл.3.

² Охрана окружающей среды в России. М.: Росстат, 2020. 113 с.



Основные методы биоремедиации

Таблица 3

Основные методы биоремедиации, их достоинства и недостатки [29, 32]

Название	Суть метода	Достоинства	Недостатки
Биоремедиация ex-situ			
«Биокучи»	Загрязненная почва складировается над землей в зоне обработки, оборудованной устройствами для аэрации, контроля температуры и влажности, внесения питательных веществ [32, 33]	Предотвращает распространение загрязняющих веществ; требует относительно небольших площадей; экономически менее затратный	Способствует высыханию почвы и улетучиванию, а не деградации углеводов; требует непрерывной подачи электроэнергии
Биореакторы	Технология биоремедиации с использованием реактора, который позволяет регулировать параметры среды протекания процесса [34]	Высокая эффективность как в аэробных, так и анаэробных условиях; возможность контролировать все параметры биопроцесса; можно использовать генетически модифицированные микроорганизмы	Высокая стоимость; трудоемкий метод; в зависимости от загрязнителя могут потребоваться различные конструкции биореакторов
Компостирование	Превращение органических веществ в гумус под действием микробной катаболической активности при повышенной температуре окружающей среды [35]	Высокая биологическая эффективность; зрелый компост может использоваться для нужд сельского хозяйства; в процессе повышается температура	Требует больших площадей и частого перемешивания; вероятность выщелачивания токсичных промежуточных продуктов в случае неудачной операции
Земледелие	Загрязненная почва равномерно распределяется по поверхности для повышения биодоступности загрязняющих компонентов [36]	Простой метод, менее трудоемкий, недорогой; задействует минимальное количество оборудования и технологий	Требует больших площадей; снижение микробной активности (не подходит для токсичных летучих загрязнителей); трудоемкий метод; вероятность вымывания загрязнений
Биоремедиация in-situ			
Биовентиляция	Стратегия биоремедиации, в которой используется контролируемый поток воздуха для стимуляции деструкторной деятельности местных микроорганизмов в отношении загрязнителя [32, 37]	Экономически выгодный; усиливает микробную активность	Процесс может быть долгим; требует регуляции скорости воздушного потока



Окончание табл.3

Название	Суть метода	Достоинства	Недостатки
Естественное ослабление (аттенуация)	Разнообразные физические, химические или биологические процессы, при благоприятных условиях действующие без вмешательства человека, уменьшая массу, токсичность, мобильность, объем или концентрацию загрязняющих веществ в почве [38]	Недорогой и менее трудоемкий	Продолжительный процесс; вероятность вымывания и распространения загрязняющих веществ
«Биопромывание»	Аналогичен методу биовентиляции, однако применяется контролируемый поток жидкости для уравнивания концентрации загрязняющих веществ в среде [32]	Недорогой; меньше эксплуатационных опасностей	Вероятность распространения летучих компонентов в атмосферу; требует контролируемого расхода воды
Фиторемедиация	Комплексный метод, включающий использование растений для извлечения, накопления, деградации, фильтрации, стабилизации и улетучивания загрязняющих веществ из почвенных и водных сред [39]	Менее дорогой; экологически чистый; применяется при крупномасштабных загрязнениях; улучшает плодородные свойства почвы	Продолжительный процесс; вероятность распространения токсичных загрязнителей по пищевой цепи; не подходит для сильно загрязненной почвы
Биостимуляция	Преднамеренная стимуляция местных микроорганизмов добавлением акцепторов электронов и/или доноров, воды или питательных веществ в виде удобрений для ускорения процесса биодegradации [40]	Увеличивает содержание питательных веществ в почве и биодоступность загрязняющих веществ; способствует развитию естественной микрофлоры	Высокое содержание питательных веществ (азот, фосфор) может вызвать цветение водорослей в воде; использование поверхностно-активных веществ может создать токсичный раствор в почве
Биоаугментация	Добавление высококонцентрированных и специализированных популяций конкретных микроорганизмов на загрязненный участок для увеличения скорости биоразложения загрязнителя [30]	Протекают процессы кометаболлизма; высокая эффективность биоремедиации	Параметры окружающей среды влияют на рост микробов; ряд международных соглашений ограничивает применение микроорганизмов-интродуцентов и генетически-модифицированных организмов; возможность взаимного подавления жизнедеятельности микроорганизмов различных видов
Применение биосурфактантов	Стратегия биоаугментации, которая включает инокуляцию продуцентов биосурфактанта или биосурфактанта в загрязненные почвы [29]	Увеличение биодоступности загрязняющих веществ; биосурфактанты экологически чистые, биоразлагаемые, неопасные, стабильные; обладают высокими селективностью и пенообразующей способностью; микробные поверхностно-активные вещества активны в условиях экстремальных температур, pH и солености [41]	Высокая стоимость и низкий выход веществ при синтезе; малое число микроорганизмов являются продуцентами биосурфактантов

Бактерии, осуществляющие биодegradацию нефти в почве, относятся в основном к родам *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Acinetobacter*, *Aeromonas*, *Arthrobacter*, *Rhodococcus* [42, 43]. Также биодеструкторной способностью по отношению к углеводородам нефти обладают грибы родов *Alternaria*, *Aspergillus*, *Candida*, *Cephalosporium*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Geotrichum*, *Gliocladium*, *Mucor*, *Paecilomyces*, *Penicillium*, *Rhizopus*, *Rhodotolura*, *Saccharomyces*, *Talaromyces*, *Torulopsis* и др. [44-46], микроводоросли *Chlorella vulgaris* [47, 48].

Бактерии являются наиболее эффективными микроорганизмами для биоремедиации за счет способности расщеплять практически любые углеводороды вплоть до самых тяжелых парафинов (асфальтовые остатки) [49]. В патентах описано более 70 видов бактерий, способных метаболизировать различные загрязняющие вещества. Наиболее распространены и универсальны *Pseudomonas spp.*, *Rhodococcus spp.* и *Acinetobacter spp.* Большинство патентов принадлежит разработчикам из



Китая, США, Японии, Великобритании, Индии и Кореи [27]. Однако бактерии очень требовательны к условиям внешней среды, поэтому наиболее благоприятными для размножения большинства из них являются: температура 30-40 °С; наличие кислорода (аэробные условия) и питательных веществ (азот, фосфор и железо); нейтральное значение pH. Существуют экспериментально подтвержденные данные о том, что ни один микроорганизм не приводит к полному разложению нефти. Биоремедиация более эффективна, когда осуществляется сложными микробными консорциумами, в частности развивающимися самостоятельно на исторически загрязненных территориях [50, 51].

Микроскопические грибы широко используются для микробиологической биоремедиации почв. Грибы мицелиального строения со множеством ветвящихся гиф имеют большую адсорбционную поверхность [52], благодаря чему способны адсорбировать ксенобиотики (фенол, фенольные соединения, полициклические ароматические углеводороды). В отличие от грибов, бактерии не могут эффективно разлагать полициклические ароматические углеводороды с более чем четырьмя ароматическими кольцами [53, 54]. Из-за наличия гиф грибы могут проникать в твердые частицы и способствуют рыхлению почвы [55]. Немаловажными факторами, определяющими эффективность использования микромицетов в качестве утилизаторов нефти, являются их активная ферментативная система и высокая жизнеспособность в условиях загрязнения среды нефтью [56]. К микромицетам-деструкторам углеводородов нефти относят не менее 100 видов микроскопических грибов [57]. В патентных документах (большинство из Китая, США, Японии и Тайваня [27]) на методы биоремедиации упоминается более 30 видов грибов. Наиболее распространены *Chrysosporium spp.*, *Phanerochaete spp.*, *Aspergillus spp.*, *Acremonium spp.* и *Penicillium spp.*

Общее количество патентов в области микробиологической биоремедиации на водоросли небольшое. Упоминается более 40 видов водорослей, чаще всего *Chlorella spp.*, *Scenedesmus spp.* и *Chlamydomonas spp.* [58]. Почти все поддерживаемые патенты принадлежат патентообладателям из Китая и США [27].

Биопрепараты. Микробиологический состав. При разработке биопрепаратов особое внимание уделяется следующим аспектам: микробиологическому составу (подбираются активные штаммы бактерий, грибов, микроводорослей); подбору сорбента-носителя и вспомогательных питательных веществ. Биопрепараты зачастую разрабатываются для использования в конкретных климатических условиях, поскольку биодеструкторная активность по отношению к углеводородам нефти и другим загрязняющим веществам напрямую зависит от влажностно-температурных характеристик при использовании микробиологической биоремедиации *in-situ*.

«Аборигенные» и интродуцированные микроорганизмы. Ряд современных исследований демонстрирует высокую эффективность нефтедеструкторной способности микроорганизмов, выделенных из почв исторически нефтезагрязненных территорий [59]. В исследованиях основным методом является биостимуляция.

При использовании биопрепаратов для биоремедиации имеет место внесение в почву микроорганизмов-интродуцентов. Биопрепараты могут иметь различный состав – активными агентами могут служить как микроорганизмы одного рода, вида, штамма, так и консорциумы микроорганизмов.

Монокультуры. Биопрепараты на основе монокультур (*Pseudomonas putida* 36; *Acinetronacter sp.* НВ-1³; *Pseudomonas alcaligenes* E7⁴) разрабатывались ранее и значительно уступают по эффективности биопрепаратам на основе консорциумов микроорганизмов.

Недостатком штаммов является то, что они утилизируют нефть при высоких температурах: *Rhodococcus erythropolis* ВКПМ Ас-1668⁵ (штамм используется для очистки воды и почвы от нефтяных загрязнений); *Rhodococcus globerulus* Н-42⁶; *Rhodococcus spp.* [43]; *Micrococcus luteus*

³ Патент № 2077579 РФ. Штамм бактерий *Acinetobacter species*, используемый для очистки воды и почвы от нефти и нефтепродуктов / Н.А.Жиркова, В.С.Кобелев, В.П.Холоденко. Оpubл. 20.04.1997.

⁴ Патент № 2134723 РФ. Штамм бактерий *Pseudomonas alcaligenes* E7, используемый для очистки воды и почвы от нефти и нефтепродуктов / З.М.Ермоленко, В.П.Холоденко, В.А.Чугунов. Оpubл. 20.08.1999.

⁵ Патент № 2257409 РФ. Штамм *Rhodococcus erythropolis* для разложения нефти и нефтепродуктов / С.А.Власов, В.И.Сафарова, А.М.Сафаров, Т.К.Крашенинникова, Н.В.Краснопецева. Оpubл. 27.07.2005. Бюл. № 21.

⁶ Патент № 2300561 РФ. Штамм *Rhodococcus globerulus* Н-42 для разложения нефти и нефтепродуктов / С.А.Власов, Н.В.Краснопецева, Т.К.Крашенинникова, А.Н.Синицын, А.Д.Украинцев. Оpubл. 10.06.2007. Бюл. № 16.



LER-4 [60]; *Bacillus subtilis* [61], способные снижать концентрацию нефти до 0,48 % в течение трех месяцев летнего периода.

Эти штаммы осуществляют деградацию нефти в почве эффективно в условиях модельного эксперимента, способны очищать среду от нефти и утилизировать нефтепродукты (дизельное топливо), в том числе в условиях широкого диапазона температур 8-37 °С.

Консорциумы. Биопрепараты на основе консорциумов микроорганизмов имеют более высокую доказанную эффективность, поскольку различные виды микроорганизмов обладают биодеструкторной активностью в отношении различных классов органических соединений. Таких биопрепаратов разработано большое количество:

- «Деворойл» – пять видов нефтеокисляющих бактерий и дрожжи.

- «Экойл» – аэробные нефтеокисляющие бактерии *Mycobacterium*, *Rhodococcus* и *Acinetobacter*, сахароза, полиэтиленгликоль, нефть и вода⁷.

- «Бак-Верад» – бактериальный препарат из консорциума штаммов бактерий родов *Bacillus*, *Atherobacter*, *Rhodococcus* и *Pseudomonas*. Результаты исследований показали, что внесение биопрепарата значительно снижает содержание нефтепродуктов в почве и ускоряет естественную деградацию в 3-4 раза [62].

- В исследовании [63] штаммы *P. putida* ТРНК-1, *P. aeruginosa* ТРНК-4, *Acinetobacter sp.* ТРНК-3, *S. maltophilia* ТРНК-2, способные расти на нефтяных углеводородах, выделены с участков, загрязненных нефтью. Введение данных штаммов, разлагающих углеводороды, в образцы загрязненной нефтью почвы приводило к выраженной биоаугментации [64].

- Консорциум микроорганизмов, составленный из штаммов бактерий, которые относятся к родам *Pseudomonas* и *Microbacterium*, а также микроскопических грибов рода *Penicillium*, использован в работе [65] для оценки эффективности очистки нефтезагрязненных почв Кольского Севера. Наиболее эффективной очистки удалось достичь в вариантах эксперимента с использованием консорциума, составленного из бактерий и грибов. Так, за 30 сут снизилось количество нефтепродуктов в почве на 57 % от исходного, за 120 сут – 82 %, 370 сут – 83 %.

Биопрепараты. Сорбенты-носители. Для эффективной биоремедиации загрязненных нефтью почв необходима разработка механизмов внесения микроорганизмов. С этой целью протестированы различные сорбенты и проведена оценка их влияния на очистку почв от нефтепродуктов. Внесение сорбентов в почву при биоремедиации положительно влияет на активацию нефтедеструкторной способности местных или интродуцированных микроорганизмов и на рост растений, высаживаемых на заключительном этапе рекультивации земель. За счет сорбентов может наблюдаться снижение гидрофобности почв, повышение их влагоемкости и пористости [66].

Стоимость биологической ремедиации нефтезагрязненных почв с использованием сорбентов 12-200 тыс. евро/га (на 01.04.2022), в зависимости от типа и количества вносимого сорбента. Стоимость механических методов рекультивации в несколько раз выше [67].

Активированный уголь. В качестве сорбента для внесения биопрепаратов на основе микроорганизмов в почву может служить активированный уголь. Данный вид носителя протестирован в ходе многих современных исследований [21, 68].

Обработка нефтезагрязненной почвы с добавлением 1-3 % гранулированного активированного угля в ходе эксперимента снизила количество углеводородов нефти за четыре месяца на 78-91 %, что значительно превосходит результат биоремедиации в контрольном образце без добавок – 55-65 % [21].

Активированный уголь достаточно дешевый, эффективный, экологически чистый сорбент, препятствующий вымыванию углеводородов, тяжелых металлов и других токсичных, подвижных продуктов в грунтовые воды и поверхностные водные объекты [5].

Сапропель. В работе [69] изучена способность шести штаммов бактерий к деградации ряда нефтепродуктов и нефти на твердой минеральной среде: *Pseudomonas sp.*, *Pseudomonas oryzihabitans*, *Rhodococcus erythropolis*, *Pseudomonas sp.*, *Acinetobacter guillouiae* 1, *Acinetobacter*

⁷ Рогозина Е.А., Андреева О.А., Жаркова С.И. и др. Сравнительная характеристика отечественных биопрепаратов, предлагаемых для очистки почв и грунтов от загрязнения нефтью и нефтепродуктами // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2010. Т. 5. № 3. С.10-28.



guillouiae 2. Для внесения бактериальных культур в почву в качестве сорбента выбраны различные модификации сапропеля. Установлено, что бактерии способны прикрепляться, эффективно удерживаться на сапропелевых подложках и сохраняться при высушивании. По результатам исследований деструкция нефти происходила более эффективно в варианте с добавлением в загрязненную почву измельченного сапропеля – за семь суток содержание нефти в почве снизилось на 65 %, что значительно превосходит показатели очистки при добавлении чистых бактериальных штаммов. Достоинством такого носителя является его органическая природа и экологическая чистота.

Глауконит. Это минерал, представляющий собой водный алюмосиликат железа, кремнезема и оксида калия непостоянного. Ионообменные свойства минерала и слоистая структура определяют его высокую сорбционную активность в отношении нефтепродуктов. Поскольку глауконит при внесении в почву в составе биопрепарата может выполнять роль не только сорбента-носителя, но и минерального удобрения, его извлечение и утилизация не требуются. В качестве глауконит-содержащего носителя могут использоваться как чистый глауконит, так и глауконитовая порода, содержащая 30-80 % глауконита.

На основе глауконита разработан биопрепарат для биodeградации нефтепродуктов [70]. В его состав входит ассоциация бактерий *Bacillus megaterium* ВКМ В-396, *Bacillus subtilis* ВКПМ В-5328, *Pseudomonas putida* ВКМ В-1301, *Pseudomonas putida* ВКПМ В-5624, *Rhodococcus erythropolis* ВКПМ АС-1269, иммобилизованная на глауконитсодержащем носителе в количестве 10^8 - 10^{10} клеток/г.

Цеолиты. Другая группа минералов, которые можно использовать в качестве сорбентов, – цеолиты. Закрепление микроорганизмов внутри кристаллов цеолита позволяет им благополучно переносить воздействие прямых солнечных лучей и резких перепадов температур окружающей среды, а сорбционные и ионообменные свойства минерала обеспечивают микроорганизмы дополнительными источниками питания (углеводородами нефти и элементами минерального питания, сорбируемыми из почвы), необходимыми для метаболизма микробных клеток. Это обеспечивает высокую эффективность и увеличение продолжительности процесса деструкции нефтепродуктов.

Биопрепарат для биоремедиации нефтезагрязненных почв для климатических условий Крайнего Севера [71] в своем составе содержит твердый субстрат-носитель – измельченный цеолитизированный туф фракцией 1-3 мм с содержанием цеолита 60-95 % и иммобилизованный на его поверхности консорциум углеводородокисляющих микроорганизмов, включающий штаммы *Bacillus vallismoris* ВКПМ В-11017, *Exiguobacterium mexicanum* ВКПМ В-11011, *Serratia plymuthica* ВКМ В-2819D, *Rhodococcus sp.* ВКМ АС-2626D. Преимуществом изобретения является высокая степень очистки почв и грунтов от нефти и нефтепродуктов (87-88 %) в условиях холодного климата Крайнего Севера за короткий промежуток времени (60 сут).

Другие виды носителей. В качестве сорбентов-носителей могут использоваться синтетические материалы. Так, пенополиуретан является качественным носителем для иммобилизации клеток благодаря своей химической и физической стойкости и стабильности [72, 73]. Однако необходимо извлечение и утилизация таких сорбентов после окончания биоремедиации.

Запатентованным российским изобретением является композиция⁸, которая содержит пористый носитель – вспененные стеклообразные метафосфаты и штаммы микроорганизмов-деструкторов *Serratia marcescens* PL-1, *Pseudomonas fluorescens biovar* П10-1, *Acidovorax delafieldii* 3-1 в концентрации 10^{12} клеток/г, иммобилизованные в поры носителя.

Чтобы оптимизировать удаление нефти разработан бионоситель для иммобилизации аборигенных углеводородоразрушающих бактерий с использованием порошка из арахисовой скорлупы. Показатели биodeградации после внесения порошка возросли с 26 до 61 % после 12-недельной обработки. Использование порошка из шелухи арахиса ускорило массоперенос воды, кислорода, питательных веществ и углеводов и обеспечивало питание микроорганизмов [74]. Внесение в почву с микроорганизмами-нефтедеструкторами древесной стружки (опилок) значительно

⁸ Патент № 2181701 РФ. Биопрепарат «АВАЛОН» для очистки объектов окружающей среды от нефти и нефтепродуктов, способ его получения / И.Ю.Лимбах, Г.О.Карапетян, К.Г.Карапетян, И.И.Новикова, И.В.Бойкова, И.Н.Писарев, В.А.Леднев. Опубл. 27.04.2002. Бюл. № 12.



снижало концентрацию загрязняющих веществ в почве [75]. Также проводились исследования, где в качестве сорбентов применяли хитин или хитозан, вермикулит и др.

Биопрепараты. Питательные вещества. Существует еще один аспект, который необходимо учесть при использовании методов биоремедиации для достижения наиболее успешного результата [30]. Чтобы стимулировать развитие и поддержание микроорганизмов в почве в концентрациях, достаточных для протекания биоремедиации, необходимо наличие питательных веществ – азота, фосфора, калия и серы. На искусственном внесении этих веществ в естественную среду основан метод биостимуляции, при котором питательные вещества вносят в почву и обеспечивают аэрацию, что позволяет местным микроорганизмам размножаться⁹. Эти вещества микроорганизмы также используют для выработки ферментов, расщепляющих углеводороды нефти и другие загрязнители [76].

В качестве источника питательных веществ для стимуляции процессов жизнедеятельности микроорганизмов используют комплексы минеральных удобрений: «Азофоска» [21], мочевины¹⁰ и др. Биоремедиация с использованием удобрений для увеличения концентрации питательных веществ – азота и фосфора, необходимых для роста микроорганизмов и разлагающих углеводороды, использовали при очистке береговой линии от нефти после разлива Exxon Valdez [77].

Биопрепараты. Температурный режим. Одним из основных факторов, влияющих на интенсивность биохимических превращений органических веществ под действием процессов жизнедеятельности микроорганизмов, является температура [78]. По этой причине при подборе штаммов для микробиологической биоремедиации почв в определенных климатических условиях стоит учитывать их принадлежность к группе в зависимости от температурного оптимума: психрофилы (*Pseudomonas spp.*, *Microbacterium spp.*, *Rhodococcus spp.*, *Arthrobacter spp.*, *Brevibacterium spp.*, *Bacillus spp.*) применяются наиболее часто, даже в северных широтах ($t_{\text{опт}} = 10-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) [65, 71, 79]; психротрофы (*Acinetobacter spp.*, *Pseudomonas spp.*, *Rhodococcus spp.*, $t_{\text{опт}} = 20-28\text{ }^{\circ}\text{C}$); мезофилы (*Staphylococcus spp.*, *Acinetobacter spp.*) используются в средних широтах с другими микроорганизмами в лабораторных и полевых экспериментах ($t_{\text{опт}} = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$) [59]; термофилы (некоторые представители *Bacillus spp.*, *Methanobacterium spp.*, *Chlamydomonas spp.*) применяются редко, в основном в модельных или лабораторных экспериментах ($t_{\text{опт}} = 42\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Исследование эффективности применения психрофильных микроорганизмов для очистки почв от нефтяных загрязнений в условиях пониженных температур окружающей среды приведены в материалах многих научных исследований и диссертаций [80].

По результатам работы [81] показана способность утилизировать нефть и нефтепродукты смешанной культурой психрофильных и психротолерантных штаммов, активно окисляющих углеводороды нефти (*Rhodococcus sp.* Ac-2626D + *Serratia plymuthica* Ac-2819D + *Bacillus vallismortis* B-11017 + *Exiguobacterium mexicanum* B-1 1011), при пониженных положительных температурах (4-10 °C). Установлено, что указанные штаммы при внесении в мерзлотную почву при -45...-50 °C сохранили жизнеспособность и после оттаивания сохранили УВ-окисляющую активность, что показало возможность их применения для очистки почв от нефтезагрязнений вне периода вегетации. Применение полученного биопрепарата в зимний период до и после формирования снежного покрова обеспечило степень очистки почвы при 1 %-ном уровне нефтезагрязнения – 44-62 %, при 5 %-ном – 34-46 %.

По результатам исследования [80] на основании консорциума бактерий родов *Rhodococcus* и *Pseudomonas* разработан и запатентован биопрепарат «МикроБак» для биоремедиации почв с содержанием нефти до 15 % при пониженных и умеренных температурах 4-32 °C в присутствии до 5 % соли при pH 6-8. Создана микробная ассоциация «ВиО», состоящая из штаммов-деструкторов родов *Rhodococcus*, *Pseudomonas* и *Acinetobacter*. Бактерии консорциума способны к деградации углеводородов нефти при концентрации до 30 % в температурном диапазоне 4-42 °C в присутствии до 5 % соли при pH 4-10. Эффективность опытного образца биопрепарата «ВиО»

⁹ Moorthy K., Lavanya V., Malarvizhi A. et al. Isolation of soil bacteria for bioremediation of hydrocarbon contamination // Biosciences, Biotechnology Research Asia. 2010. Vol. 7 (2). P. 901-906.

¹⁰ Maamar R.M., Mogadami F.S. Bioremediation of Libyan Crude Oil-Contaminated Soil under Mesophilic and Thermophilic Conditions // APCBEE Procedia. 2013. Vol. 5. P. 82-87. DOI: 10.1016/j.apcbee.2013.05.015



в полевых испытаниях по очистке грунта от нефти на территории Пограничного месторождения Ямало-Ненецкого АО составила 80 %.

По результатам исследования [82] доказана высокая эффективность биотехнологических приемов, основанных на применении психротолерантного консорциума ИБ НД 1 для рекультивации загрязненных объектов. В табл.4 приведены основные сведения о результатах ряда исследований нефтедеструкторной способности штаммов и консорциумов микроорганизмов.

Таблица 4

Результаты исследований нефтедеструкторной способности штаммов и консорциумов микроорганизмов

Микробиологический агент	Условия среды, продолжительность эксперимента	Начальная концентрация нефти/нефтепродуктов в почве, г/кг	Концентрация нефти/нефтепродуктов в почве на конец эксперимента
<i>Pseudomonas putida</i> 36 [20]	20-28 °С, 5 сут	–	20 °С: нефть – снижение концентрации на 22,0 %; мазут М-40 – 10,2 %; керосин – 75,0 % 28 °С: нефть – снижение концентрации на 28,0 %; мазут М-40 – 9,0 %; керосин – 93,0 %
<i>Pseudomonas alcaligenes</i> E7 [21]	20-28 °С, 5 сут	–	20 °С: нефть – снижение концентрации на 63,8 %; мазут М-40 – на 34,2 %; керосин – на 81,0 % 28 °С: нефть – снижение концентрации на 69,0 %; мазут М-40 – на 41,0 %; керосин – на 85,0 %
<i>Rhodococcus erythropolis</i> ВКПМ Ас-1668 [22]	28-30 °С, 1 мес. (лабораторный эксперимент) 28-30 °С, 15-30 сут (застарелое нефтяное загрязнение почвы)	18,8 178,2	Через 1 мес. – 6,5 г/кг (степень очистки – 65,4 %) Через 15 сут – 65,9 г/кг (степень очистки – 63,5 %) Через 30 сут – 52,5 г/кг (степень очистки – 70,7 %)
<i>Micrococcus luteus</i> LER-4 [60]	10; 20; 30; 37 °С, 3 сут	Нефть – 0,91 Дизельное топливо – 0,91 Масло моторное – 0,91	10 °С – 0,86 г/кг (5,6 %); 20 °С – 0,402 г/кг (55,8 %); 30 °С – 0,28 г/кг (68,9 %); 37 °С – 0,24 г/кг (73,8 %) 10 °С – 0,866 г/кг (4,78 %); 20 °С – 0,366 г/кг (59,76 %); 30 °С – 0,292 г/кг (67,9 %); 37 °С – 0,277 г/кг (74,98 %) 10 °С – 0,879 г/кг (3,34 %); 20 °С – 0,41 г/кг (54,98 %); 30 °С – 0,275 г/кг (69,76 %); 37 °С – 0,262 г/кг (71,16 %)
<i>Bacillus subtilis</i> Колыма 7/2к [61]	Якутск, полевой эксперимент в течение 3 мес. (летний период)	135,14	0,645 г/кг (остаточное содержание нефти 0,48 %)
Биопрепарат на основе консорциума микроорганизмов «Деворойл» [23]	28-30 °С, 1 мес. (лабораторный эксперимент) 28-30 °С, 15-30 сут (застарелое нефтяное загрязнение почвы)	18,8 178,2	Через 1 мес. – 9,6 г/кг (степень очистки – 51,1 %) Через 15 сут – 131,2 г/кг (степень очистки – 26 %) Через 30 сут – 88,3 г/кг (степень очистки – 53 %)
<i>P. putida</i> ТРНК-1, <i>P. aeruginosa</i> ТРНК-4, <i>Acenitobacter sp.</i> ТРНК-3, <i>S. maltophilia</i> ТРНК-2 [63]	25 °С, 10 сут	0,073-0,365 (1-5 % дизельного топлива)	Начальная концентрация дизельного топлива 1 %: <i>P. putida</i> ТРНК-1 степень разложения – 93 %; <i>P. aeruginosa</i> ТРНК-4 – 90 %; <i>S. maltophilia</i> ТРНК-2 – 78 %; <i>Acenitobacter sp.</i> ТРНК-3 – 73 % Начальная концентрация дизельного топлива 5 %: <i>P. putida</i> ТРНК-1 – 87 %; <i>P. aeruginosa</i> ТРНК-4 – 65 %; <i>S. maltophilia</i> ТРНК-2 или <i>Acenitobacter sp.</i> ТРНК-3 – 40 %
<i>Rhodococcus erythropolis</i> + сапропель [69]	7 сут	–	Почва + <i>Rhodococcus erythropolis</i> – степень разложения нефти – 32 % Почва + <i>Rhodococcus erythropolis</i> + субстрат на основе сапропеля средней крупности – 65 %



Окончание табл.4

Микробиологический агент	Условия среды, продолжительность эксперимента	Начальная концентрация нефти/нефтепродуктов в почве, г/кг	Концентрация нефти/нефтепродуктов в почве на конец эксперимента
Препарат для биodeградации нефтепродуктов «Бионит» (<i>Bacillus megaterium</i> ВКМ В-396, <i>Bacillus subtilis</i> ВКПМ В-5328, <i>Pseudomonas putida</i> ВКМ В-1301, <i>Pseudomonas putida</i> ВКПМ В-5624, <i>Rhodococcus erythropolis</i> ВКПМ АС-1269, иммобилизованные на глауконитсодержащем носителе) [70]	100 мл дистиллированной воды, рН 4-12, 3 % нефти, 1 г препарата, 18-20 °С, 4 сут	30	Снижение концентрации нефти при различных значениях рН: 3 – 0 %; 4 – 0,49 %; 4,5 – 17,4 %; 5 – 49,3 %; 6 – 79 %; 7 – 80 %; 8 – 79 %; 9 – 79 %; 10 – 66,7 %; 11 – 43,7 %; 12 – 0 %
Консорциум углеводородо-кисляющих микроорганизмов, включающий штаммы <i>Bacillus vallismortis</i> ВКПМ В-11017, <i>Exiguobacterium mexicanum</i> ВКПМ В-11011, <i>Serratia plymuthica</i> ВКМ В-2819D, <i>Rhodococcus sp.</i> ВКМ Ас-2626D, измельченный цеолитизированный туф фракцией 1-3 мм [71]	18-22 °С, 60 сут	Мерзлотная болотистая почва – 108,34 Мерзлотно-таежная почва – 16,26 Мерзлотно-торфяная почва – 13,59	12,3 г/кг – 88,64 % 2,045 мг/кг – 87,42 % 7,39 мг/кг – 88,64 % По результатам исследования обнаружена непригодность препарата для использования при 4-8 °С
Биопрепарат «АВАЛОН» (вспененные стеклообразные метафосфаты и штаммы микроорганизмов-деструкторов <i>Serratia marcescens</i> PL-1, <i>Pseudomonas fluorescens biovar</i> П10-1, <i>Acidovorax delafieldii</i> 3-1 в концентрации 1012 клеток/г) [24]	28 сут, мазут и нефть	–	Степень биодеструкции 86,5-88,2 %
Сорбент для иммобилизации микроорганизмов: порошок из скорлупы арахиса с размером частиц 0,5-1,5 мм, микроорганизмы – аборигенный бактериальный консорциум [74]	Почва, загрязненная сырой нефтью из Ляохэ, провинция Ляонин, Китай, 28 °С, 12 недель	–	После 12 недель биodeградации концентрации нефтепродуктов в почве составили 21800; 21500; 18300; 11400 мг/кг, эффективность удаления – 26; 27; 38; 61 % соответственно (для эксперимента с добавлением порошка арахисовой скорлупы)
<i>Rhodococcus sp.</i> Ас-2626D, <i>Serratia plymuthica</i> Ас-2819D, <i>Bacillus vallismortis</i> В-1101, <i>Exiguobacterium mexicanum</i> В-1 1011 [81]	4-10 °С	10 5	Степень биодеструкции 44-62 и 34-46 %
Биопрепарат «МикроБак» (консорциум бактерий родов <i>Rhodococcus</i> и <i>Pseudomonas</i>) [80]	Июнь-август, нефтезагрязненные почвы на территории Пограничного месторождения Ямало-Ненецкого АО	–	Степень очистки 80 %

Заключение. Загрязнение окружающей среды сырой нефтью и нефтепродуктами является глобальной экологической проблемой. Разработаны различные методы, направленные на восстановление загрязненных сред. Наиболее перспективными являются биологические (биоремедиация), но используются редко и в основном для процессов доочистки.



К основным методам биоремедиации, наиболее часто применяемым, относятся методы *ex-situ* (использование биореакторов, компостирование и др.), *in-situ* (биостимуляция, биоаугментация, биоventляция, фиторемедиация и др.). При работе с микроорганизмами, обладающими нефтедеструкторной активностью (микробиологическая ремедиация), наиболее часто используют комбинации этих методов.

При биоремедиации *in-situ* для внесения штаммов микроорганизмов на загрязненные участки используют различные виды материалов-сорбентов как природных, так и синтетических: древесная стружка (опилки), шелуха, активированный уголь, сапрпель, глауконит, цеолит. Наибольшая эффективность показана в работах с использованием активированного угля. Перспективными являются и природные носители, поскольку, кроме выполнения основной функции (сорбция микроорганизмов), они улучшают физико-механические и физико-химические свойства почвы.

Повышение эффективности микробиологической ремедиации загрязненных почв достигается также за счет внесения в почву питательных веществ (азот, фосфор, сера и кислород) в составе комбинированного биопрепарата или отдельно. Для стимуляции процессов жизнедеятельности аборигенных почвенных микроорганизмов вносят комплексные минеральные удобрения.

Штаммы микроорганизмов, которые используются в микробиологической ремедиации нефтезагрязненных почв, можно разделить на три группы в зависимости от оптимальной для их жизнедеятельности температуры окружающей среды: психрофилы ($t_{\text{опт}} = 10-20\text{ }^{\circ}\text{C}$); психротрофы ($t_{\text{опт}} = 20-28\text{ }^{\circ}\text{C}$); мезофилы ($t_{\text{опт}} = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$); термофилы ($t_{\text{опт}} = 42\text{ }^{\circ}\text{C}$). Данную особенность штаммов необходимо учитывать, поскольку высокоэффективные термофильные микроорганизмы могут быть непригодны для биоремедиации в условиях Крайнего Севера.

Разработан ряд биопрепаратов для восстановления нефтезагрязненных почв, имеющих доказанную эффективность («Путидойл», «Экойл», «Валентис», «АВАЛОН» и др.). В их состав входят консорциумы микроорганизмов-нефтедеструкторов, вспомогательные вещества (азот, фосфор и др.). Штаммы могут быть размещены на сорбирующем материале (подложки, гранулы, стружка). Нефтедеструкторной активностью обладают больше 70 видов бактерий (*Pseudomonas spp.*, *Rhodococcus spp.*, *Acinetobacter spp.*, *Microbacterium spp.* и др.), не менее 100 видов микроскопических грибов (*Chrysosporium spp.*, *Phanerochaete spp.*, *Aspergillus spp.*, *Acremonium spp.*, *Penicillium spp.* и др.) и некоторые виды микроскопических водорослей (*Chlorella spp.*, *Scenedesmus spp.*, *Chlamydomonas spp.* и др.). Современные исследования посвящены изучению перспектив применения отдельных штаммов, родов, видов микроорганизмов в различных условиях с разной концентрацией нефтепродуктов в почве. Также исследуются штаммы, выделенные с исторически загрязненных территорий, и перспективы их применения. Особое внимание уделяется проблеме очистки нефтезагрязненных почв районов Крайнего Севера, где климатические условия ограничивают применение методов биоремедиации. Однако найдены штаммы, способные с достаточной эффективностью выполнять свои функции в данных условиях.

Детальное изучение, совершенствование технологии микробиологической биоремедиации и поиск эффективных природных штаммов или создание с использованием генетических методов новых, отличающихся большей эффективностью и меньшей требовательностью к условиям внешней среды, штаммов углеводородокисляющих микроорганизмов позволит в полной мере реализовать потенциал данной технологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Коршунова Т.Ю., Логинов О.Н. Нефтьшаммы: состояние проблемы в РФ и методы снижения их воздействия на окружающую среду // Экобиотех. 2019. Т. 2. № 1. С. 75-85. DOI: 10.31163/2618-964X-2019-2-1-75-85
3. 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
4. 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
5. Vasilyeva G., Kondrashina V., Ortega-Calvo J.-J. Adsorptive bioremediation of soil highly contaminated with crude oil // Science of The Total Environment. 2020. Vol. 706. № 135739. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135739



6. Ушаков И.Е. Радиолокационный мониторинг загрязнений морской поверхности нефтепродуктами с буровых платформ и транспортных судов // Записки Горного института. 2016. Т. 219. С. 421-427. DOI: 10.18454/PMI.2016.3.421
7. Lianwen Liu, Wei Li, Weiping Song, Mingxin Guo. Remediation techniques for heavy metalcontaminated soils: principles and applicability // Science of The Total Environment. 2018. Vol. 633, p. 206-219. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.161
8. Хаустов А.П., Редина М.М. Трансформации нефтяных загрязнений геологической среды под влиянием живого вещества // Нефть. Газ. Новации. 2013. № 10. С. 22-30.
9. Lamichhane S., Krishna K.C.B., Sarukkalige R. Surfactant-enhanced remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons: a review // Journal of Environ. Manag. 2017. Vol. 199. P. 46-61. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.05.037
10. Саркова О.М., Краснопольский В.Г. Практическое пособие для добровольцев по ликвидации разливов нефти. URL: <https://wwf.ru/resources/publications/booklets/prakticheskoe-posobie-dlya-dobrovol'tsev-po-likvidatsii-razlivov-nefti/> (дата обращения 01.04.2022).
11. Сагитов Р.Ф., Шабанова С.В., Василевская С.П. и др. Классификация методов локализации и ликвидации загрязнений почвы нефтью и нефтепродуктами // Наука и современность. 2016. № 1. С. 202-207. DOI: 10.17117/ns.2016.01.202
12. Шамак Д.Н. Методы ликвидации нефтяных загрязнений // Тезисы докладов IV Международной научно-практической конференции «Экология и защита окружающей среды», 16-17 мая 2018, Минск, Беларусь. Белорусский государственный университет, 2018. С. 226-228.
13. Gaur N., Flora G., Yadav M., Tiwari A. A review with recent advancements on bioremediation-based abolition of heavy metals // Environmental Science: Processes & Impacts. 2014. Vol. 16. Iss. 2. P. 180-193. DOI: 10.1039/C3EM00491K
14. Коган В.Е. Стеклообразные пеноматериалы неорганической и органической природы и перспективы очистки окружающей среды от загрязнений нефтью и нефтепродуктами // Записки Горного института. 2016. Т. 218. С. 331-338.
15. Петрова Т.А., Рудзиси Э. Виды мелиорантов для рекультивации техногенно нарушенных территорий горной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 4. С. 100-112. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_100
16. Petrova T.A., Rudzisha E., Alekseenko A.V. et al. Rehabilitation of Disturbed Lands with Industrial Wastewater Sludge // Minerals. 2022. Vol. 12. Iss. 3. № 376. DOI: 10.3390/min12030376
17. Петрова Т.А., Рудзиси Э. Рекультивация техногенно-нарушенных земель с применением осадков сточных вод в качестве мелиорантов // Записки Горного института. 2021. Т. 251. С. 767-776. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.16
18. Собгайда Н.А. Сорбционные материалы для очистки сточных и природных вод от нефтепродуктов // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2011. № 52. С. 120-124.
19. Lekan Taofeek Popoola, Adeyinka Sikiru Yusuff. Optimization and characterization of crude oil contaminated soil bioremediation using bacteria isolates: Plant growth effect // South African Journal of Chemical Engineering. 2021. Vol. 37. P. 206-213. DOI: 10.1016/j.sajce.2021.06.004
20. Farag S., Soliman N.A., Abdel-Fattah Y.R. Statistical optimization of crude oil biodegradation by a local marine bacterium isolate *Pseudomonas* sp. sp48 // Journal of Genetic Engineering and Biotechnology. 2018. Vol. 16. Iss. 2. P. 409-420. DOI: 10.1016/j.jgeb.2018.01.001
21. Мязин В.А., Исакова Е.А., Васильева Г.К. Влияние гранулированного активированного угля на скорость биоремедиации почв Мурманской области, исторически загрязненных нефтепродуктами // Проблемы региональной экологии. 2020. № 2. С. 20-26. DOI: 10.24411/1728-323X-2020-12020
22. Finley S.D., Broadbelt L.J., Hatzimanikatis V. In silico feasibility of novel biodegradation pathways for 1, 2, 4-trichlorobenzene // BMC Systems Biology. 2010. Vol. 4. № 7. DOI: 10.1186/1752-0509-4-7
23. Kumar R., Kaur A. Oil spill removal by mycoremediation // Microbial Action on Hydrocarbons. 2018. P. 505-526. DOI: 10.1007/978-981-13-1840-5_20
24. Steliga T. Role of fungi in biodegradation of petroleum hydrocarbons in drill waste // Polish Journal of Environmental Studies. 2012. Vol. 2. Iss. 2. P. 471-479.
25. Булатов В.И., Игенбаева Н.О., Нанишвили О.А. Отходы нефтегазового комплекса как технологический индикатор геоэкологического состояния регионов России // Бюллетень науки и практики. 2021. Т. 7. № 8. С. 46-55. DOI: 10.33619/2414-2948/69/05
26. Zhang S., Gedalanga P.B., Mahendra S. Advances in bioremediation of 1,4-dioxane-contaminated waters // Journal of Environmental Management. 2017. Vol. 204. Part 2. P. 765-774. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.05.033
27. Quintella C.M., Mata A.M.T., Lima L.C.P. Overview of bioremediation with technology assessment and emphasis on fungal bioremediation of oil contaminated soils // Journal of Environmental Management. Vol. 241. P. 156-166. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.04.019
28. Taki G., Islam M.N., Park Seong-Jae, Park Jeong-Hun. Optimization of operating parameters to remove and recover crude oil from contaminated soil using subcritical water extraction process // Environmental Engineering Research. 2018. Vol. 23. Iss. 2. P. 175-180. DOI: 10.4491/eer.2017.145
29. Dhiraj Kumar Chaudhary, Jaisoo Kim. New insights into bioremediation strategies for oil-contaminated soil in cold environments // International Biodeterioration & Biodegradation. 2019. Vol. 142. P. 58-72. DOI: 10.1016/j.ibiod.2019.05.001
30. Ajona M., Vasanthi P. Bioremediation of petroleum contaminated soils – A review // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 45. Part 7. P. 7117-7122. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.01.949
31. Sivaraman C., Ganguly A., Nikolausz M., Mutnuri S. Isolation of hydrocarbonoclastic bacteria from bilge oil contaminated water // International Journal of Environmental Science & Technology. 2011. Vol. 8. P. 461-470. DOI: 10.1007/BF03326232
32. Azubuike C.C., Chikere C.B., Okpokwasili G.C. Bioremediation techniques-classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects // International Biodeterioration & Biodegradation. 2016. Vol. 32. P. 58-72. DOI: 10.1007/s11274-016-2137-x
33. Dias R.L., Ruberto L., Calabró A. et al. Hydrocarbon removal and bacterial community structure in on-site biostimulated biopile systems designed for bioremediation of diesel-contaminated Antarctic soil // Polar Biology. 2014. Vol. 38. P. 677-687. DOI: 10.1007/s00300-014-1630-7



34. Firmino P.I.M., Farias R.S., Barros A.N. et al. Understanding the anaerobic BTEX removal in continuous-flow bioreactors for ex situ bioremediation purposes // Chemical Engineering Journal. 2015. Vol. 281. P. 272-280. DOI: 10.1016/j.cej.2015.06.106
35. Saum L., Jiménez M.B., Crowley D. Influence of biochar and compost on phytoremediation of oil-contaminated soil // International Journal of Phytoremediation. 2017. Vol. 20. Iss. 1. P. 54-60. DOI: 10.1080/15226514.2017.1337063
36. Seung-Woo Jeong, Jongshin Jeong, Jaisoo Kim. Simple surface foam application enhances bioremediation of oil-contaminated soil in cold conditions // Journal of Hazardous Materials. 2015. Vol. 286. P. 164-170. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.12.058
37. Höhener P., Ponsin V. In situ vadose zone bioremediation // Current opinion in biotechnology. 2014. Vol. 27. P. 1-7. DOI: 10.1016/j.copbio.2013.08.018
38. Guarino C., Spada V., Sciarrillo R. Assessment of three approaches of bioremediation (Natural Attenuation, Landfarming and Bioaugmentation – Assisted Landfarming) for a petroleum hydrocarbons contaminated soil // Chemosphere. 2017. Vol. 170. P. 10-16. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.11
39. Ikeura H., Kawasaki Y., Kaimi E. et al. Screening of plants for phytoremediation of oil-contaminated soil // International Journal of Phytoremediation. 2015. Vol. 18. Iss. 5. P. 460-466. DOI: 10.1080/15226514.2015.1115957
40. Adams G.O., Tawari-Fufeyin P., Okoro S.E. et al. Bioremediation, biostimulation and bioaugmentation: a review // International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation. 2015. Vol. 3. № 1. P. 28-39. DOI: 10.12691/ijebb-3-1-5
41. Malavenda R., Rizzo C., Michaud L. et al. Biosurfactant production by Arctic and Antarctic bacteria growing on hydrocarbons // Polar Biology. 2015. Vol. 38. P. 1565-1574. DOI: 10.1007/s00300-015-1717-9
42. Xingjian Xu, Wenming Liu, Shuhua Tian et al. Petroleum hydrocarbon-degrading bacteria for the remediation of oil pollution under aerobic conditions: a perspective analysis // Frontiers in microbiology. 2018. Vol. 9. № 2885. DOI: 10.3389/fmicb.2018.02885
43. Кувукина М.С., Ившина И.В. Bioremediation of contaminated environments using *Rhodococcus* // Biology of *Rhodococcus*. Cham: Springer, 2019. P. 231-270. DOI: 10.1007/978-3-030-11461-9_9
44. Al-Nasrawi H. Biodegradation of crude oil by fungi isolated from Gulf of Mexico // Journal of Bioremediation and Biodegradation. 2012. Vol. 3. Iss. 4. № 1000147. DOI: 10.4172/2155-6199.1000147
45. Чапоргина А.А., Корнейкова М.В., Фокина Н.В. Деструкционная активность углеводородокисляющих микроорганизмов, выделенных из почв Кольского полуострова // Микология и фитопатология. 2019. Т. 53. № 1. С. 36-45. DOI: 10.1134/s0026364819010057
46. Исакова Е.А., Корнейкова М.В. Деструкционная активность углеводородокисляющих микроорганизмов, выделенных из субстратов прибрежных территорий Баренцева и Белого морей // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2021. Т. 24. № 2. С. 178-189. DOI: 10.21443/1560-9278-2021-24-2-178-189
47. Патент № 2764305 РФ. Способ очистки почв от нефтяных загрязнений методом гидропосева биосмеси с применением микроводорослей *Chlorella vulgaris globosa* IPPAS С-2024 / Ю.С.Корчагина, Т.Н.Щемелинина. Опубл.17.01.2022. Бюл. № 2.
48. Патент № 2703500 РФ. Нефтеокисляющий биопрепарат, биосорбент на его основе и способ его приготовления / Т.Н.Щемелинина, Е.М.Анчугова. Опубл.17.10.2019. Бюл. № 29.
49. Hwanhwi Lee, Seo Yeong Yun, Seokyeon Jang et al. Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons in creosote-contaminated soil by *Peniophora incarnata* KUC8836 // Bioremediation Journal. 2015. Vol. 19. Iss. 1. P. 1-8. DOI: 10.1080/10889868.2014.939136
50. Hesnawi R.M., Adbeib M.M. Effect of nutrient source on indigenous biodegradation of diesel fuel contaminated soil // APCBEE Procedia. 2013. Vol. 5. P. 557-561. DOI: 10.1016/j.apcbee.2013.05.093
51. Santos H.F., Carmo F.L., Paes J.E.S. et al. Bioremediation of mangroves impacted by petroleum // Water Air Soil Pollut. 2011. Vol. 216. P. 329-350. DOI: 10.1007/s11270-010-0536-4
52. Донерьян Л.Г., Водянова М.А., Тарасова Ж.Е. Микроскопические почвенные грибы – организмы-биоиндикаторы нефтезагрязненных почв // Гигиена и санитария. 2016. Т. 95. № 9. С. 891-894. DOI: 10.1882/0016-9900-2016-9-891-894
53. Leitão A.L. Potential of Penicillium species in the bioremediation field // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2009. Vol. 6. Iss. 4. P. 1393-1417. DOI: 10.3390/ijerph6041393
54. Maamar A., Lucchesi M.-E., Debaets S., Nguyen van Long N. et al. Highlighting the crude oil bioremediation potential of marine fungi isolated from the port of Oran (Algeria) // Diversity. 2020. Vol. 12. Iss. 5. № 196. DOI: 10.3390/d12050196
55. Raghukumar S. Fungi in coastal and oceanic marine ecosystems. Cham: Springer, 2017. 378 p. DOI: 10.1007/978-3-319-54304-8
56. Зволинский В.П., Батовская Е.К., Туманян А.Ф. Влияние нефтяного загрязнения на микробиологическую активность почв // Теоретические и прикладные проблемы агропромышленного комплекса. 2010. № 4. С. 39-44.
57. Шапиро Т.Н., Дольникова Г.А., Немцева Н.В. и др. Идентификация и физиологическая характеристика консорциума углеводородокисляющих бактерий нефти и нефтепродуктов // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. 2018. № 4. С. 107-113. DOI: 10.36233/0372-9311-2018-4-107-113
58. Патент № 2396340 РФ. Штамм *Gordona terrae* VKПМ Ас-1741 для разложения нефти и нефтепродуктов / О.В.Бухарин, О.А.Гоголева, Н.В.Немцева. Опубл. 27.02.2009.
59. Франк Ю.А., Никитчук К.Л., Санага А.А. и др. Повышение эффективности ремедиации нефтезагрязненных почв в природно-климатических условиях севера Томской области и сопредельных регионов с применением аборигенных микроорганизмов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 9. С. 130-139. DOI: 10.18799/24131830/2020/9/2815
60. Патент № 2687131 РФ. Штамм бактерий *Micrococcus luteus* VKM Ас-2627d – деструктор нефти и нефтепродуктов / Л.А.Ерофеевская. Опубл. 07.05.2019. Бюл. № 13.
61. Патент № 2446900 РФ. Способ очистки мерзлотных почв от нефти спорообразующими бактериями *Bacillus subtilis* / М.П.Неустроев, Н.П.Тарабукина, М.М.Неустроев и др. Опубл. 10.04.2012.



62. Гамзаева Р.С. Применение биодеструктора Бак-Верд на дерново-подзолистой почве, загрязненной нефтепродуктами // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2019. № 55. С. 38-45. DOI: 10.24411/2078-1318-2019-12038
63. Ramadass K., Megharaj M., Venkateswarlu K., Naidu R. Soil bacterial strains with heavy metal resistance and high potential in degrading diesel oil and n-alkanes // International Journal of Environmental Science and Technology. 2016. Vol. 13. P. 2863-2874. DOI: 10.1007/s13762-016-1113-1
64. Ramadass K., Megharaj M., Venkateswarlu K., Naidu R. Bioavailability of weathered hydrocarbons in engine oil-contaminated soil: Impact of bioaugmentation mediated by *Pseudomonas spp.* on bioremediation // Science of the Total Environment. 2018. Vol. 636. P. 968-974. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.379
65. Чапоргина А.А., Корнейкова М.В. Оценка эффективности консорциумов микроорганизмов для очистки почв, загрязненных нефтепродуктами, в условиях Кольского Севера // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 2. С. 136-142. DOI: 10.25750/1995-4301-2020-2-136-142
66. Зиннатишина Л.В., Стрижакова Е.Р., Данышина А.В., Васильева Г.К. Влияние сорбентов на скорость биоремедиации и свойства почвы, загрязненной смесью нефтепродуктов // Естественные и технические науки. 2018. № 9 (123). С. 24-30.
67. Слюсаревский А.В., Зиннатишина Л.В., Васильева Г.К. Сравнительный эколого-экономический анализ методов рекультивации нефтезагрязненных почв путем биорекультивации *in situ* и механической замены грунта // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 11. С. 40-45. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-11-40-45
68. Igun O.T., Meynet P., Davenport R.J., Werner D. Impacts of activated carbon amendments, added from the start or after five months, on the microbiology and outcomes of crude oil bioremediation in soil // International Biodeterioration & Biodegradation. 2019. Vol. 142. P. 1-10. DOI: 10.1016/j.ibiod.2019.04.008
69. Никулина А.Р. Исследование способности бактерий-нефтедеструкторов восстанавливать загрязненные нефтью почвы // Наука без границ. 2019. № 7 (35). С. 125-128.
70. Патент № 2571219 РФ. Препарат для биодegradации нефтепродуктов «Биоинит» и способ его получения / М.Ю.Волков, А.А.Ильин, А.А.Калилец. Оpubл. 20.12.2015. Бюл. № 35.
71. Патент № 2565549 РФ. Биопрепарат для биоремедиации нефтезагрязненных почв для климатических условий Крайнего Севера / Л.А.Ерофеевская, Ю.С.Глянцева. Оpubл. 20.10.2015. Бюл. № 29.
72. Partovinia A., Rasekh B. Review of the immobilized microbial cell systems for bioremediation of petroleum hydrocarbons polluted environments // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2018. Vol. 48. Iss. 7-9. P. 723-771. DOI: 10.1080/10643389.2018.1439652
73. Majul L., Wirth S., Levin L. High dye removal capacity of *Peniophora laxitexta* immobilized in a combined support based on polyurethane foam and lignocellulosic substrates // Environmental Technology. 2022. Vol. 43. Iss. 5. P. 684-695. DOI: 10.1080/09593330.2020.1801851
74. Yaohui Xu, Mang Lu. Bioremediation of crude oil-contaminated soil: Comparison of different biostimulation and bioaugmentation treatments // Journal of Hazardous Materials. 2010. Vol. 183. Iss. 1-3. P. 395-401. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.07.038
75. Alvim G.M., Pontes P.P. Aeration and sawdust application effects as structural material in the bioremediation of clayey acid soils contaminated with diesel oil // International Soil and Water Conservation Research. 2018. Vol. 6. Iss. 3. P. 253-260. DOI: 10.1016/j.iswcr.2018.04.002
76. Das N., Chandran P. Microbial Degradation of Petroleum Hydrocarbon Contaminants: An Overview // Biotechnology Research International. 2011. Vol. 2011. № 941810. DOI: 10.4061/2011/941810
77. Ivshina I.B., Kuyukina M.S., Krivoruchko A.V. et al. Oil spill problems and sustainable response strategies through new technologies // Environmental Science: Processes & Impacts. 2015. Vol. 17. Iss 7. P. 1201-1219. DOI: 10.1039/c5em00070j
78. Alkorta I., Epelde L., Garbisu C. Environmental parameters altered by climate change affect the activity of soil microorganisms involved in bioremediation // FEMS microbiology letters. 2017. Vol. 364. Iss. 19. DOI: 10.1093/femsle/fnx200
79. Сивцев С.И., Ерофеевская Л.А. Санация и рекультивация нефтезагрязненных земель в почвенно-климатических условиях Республики Саха (Якутия) // Высшая школа: научные исследования. Часть 2. Уфа: Инфинити, 2019. С. 125-131.
80. Филонов А.Е. Микробные биопрепараты для очистки окружающей среды от нефтяных загрязнений в условиях умеренного и холодного климата: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Пушино: Институт биохимии и физиологии микроорганизмов им. Г.К.Скрябина РАН, 2016. 46 с.
81. Ерофеевская Л.А. Разработка способа очистки мерзлотных почв и грунтов от нефтезагрязнений в природно-климатических условиях Якутии: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Якутск: Институт проблем нефти и газа Якутского научного центра Сибирского отделения РАН, 2018. 28 с.
82. Смолова О.С. Биорекультивация загрязненных углеводородами грунтов с использованием психротолерантных микроорганизмов, обладающих микостатической активностью: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Уфа: Всероссийский научно-исследовательский и технологический институт биологической промышленности, 2015. 24 с.

Авторы: И.Д.Созина, инженер-эколог, sozina.id@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5521-862X> (АО «Новая Авиация», Санкт-Петербург, Россия); Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), А.С.Данилов, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-2108-2781> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.