



ПОРА ОЗДОРАВЛИВАТЬ АРКТИКУ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОЛОГИИ СЕВЕРА
ПОЛЯРНО-АЛЬПИЙСКИЙ БОТАНИЧЕСКИЙ САД-ИНСТИТУТ ИМ. Н.А. АВРОРИНА

**В. А. Мязин, Л. А. Иванова, А. А. Чапоргина,
Н. В. Фокина, М. В. Корнейкова, Г. А. Евдокимова**

**ПОРА ОЗДОРАВЛИВАТЬ АРКТИКУ.
БИОЛОГИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ
ОЧИСТКИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ
НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ**

Апатиты
Издательство ФИЦ КНЦ РАН
2023

УДК 502.37
ББК 20.19
П59

Печатается по решению Редакционного совета по книжным изданиям ФИЦ КНЦ РАН

Коллектив авторов:

Мязин В. А., Иванова Л. А., Чапоргина А. А., Фокина Н. В., Корнейкова М. В.,
Евдокимова Г. А.

Ответственный редактор — кандидат биологических наук Е. А. Боровичев

Пора оздоравливать Арктику. Биологические способы очистки и
восстановления нефтезагрязненных территорий / В. А. Мязин, Л. А. Иванова, А. А.
Чапоргина, Н. В. Фокина, М. В. Корнейкова, Г. А. Евдокимова ; отв. ред. канд. биол.
наук Е. А. Боровичев. — Апатиты : Издательство ФИЦ КНЦ РАН, 2023. — 94 с. : ил.
ISBN 978-5-91137-481-5

Обобщен многолетний опыт исследований по разработке и возможности применения биологических способов очистки и восстановления почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами, в Мурманской области. Биотехнологии способны стать альтернативным способом очистки загрязненных территорий в экстремальных условиях Евро-Арктического региона. Предлагаемые методы биоремедиации могут найти свое применение как при доочистке почвы после ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов, так и при устранении старых загрязнений в рамках сокращения площади территорий с накопленным экологическим ущербом. Рекомендуемые биотехнологии позволяют с минимальными негативными последствиями и побочными эффектами очищать загрязненные участки и восстанавливать нарушенные территории Арктики и Субарктики. Природные механизмы, лежащие в основе методов биостимуляции, биоаугментации и сорбционно-биологической очистки, способствуют восстановлению экосистем и поддержанию биоразнообразия.

Представленные материалы могут быть полезны экологическим службам промышленных предприятий, организациям, занимающимся ликвидацией разливов нефтепродуктов, а также компаниям, осуществляющим добычу, транспортировку, переработку нефти и другие операции с нефтепродуктами.

УДК 502.37
ББК 20.19

Научное издание
Редактор Е. Н. Еремеева
Технический редактор В. Ю. Жиганов
Подписано в печать 14.03.2023. Формат бумаги 60×84 1/16.
Усл. печ. л. 5.46. Заказ № 13. Тираж 500 экз.



Электронная версия: <https://inep.ksc.ru>

Методические рекомендации изданы при финансовой поддержке
экспертного центра «Проектный офис развития Арктики (ПОРА)»

ISBN 978-5-91137-481-5
doi: 10.37614/978.5.91137.481.5

© Коллектив авторов, 2023
© ФИЦ КНЦ РАН, 2023
© ИППЭС КНЦ РАН, 2023
© ПАБСИ КНЦ РАН, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
НЕФТЬ И НЕФТЕПРОДУКТЫ: СОСТАВ, СВОЙСТВА, ВЛИЯНИЕ НА ПРИРОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ.....	8
Источники и причины загрязнения почвы нефтью и нефтепродуктами.....	9
Распределение углеводов по почвенному профилю.....	10
Изменение физических и химических свойств почв после загрязнения.....	12
Влияние углеводов на биологическую активность почвы.....	13
Изменение состояния почвенного микробоценоза.....	13
Изменение ферментативной активности загрязненной почвы	15
Влияние углеводов на растения.....	16
ТРАНСФОРМАЦИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПОЧВЕ.....	17
Механизмы трансформации углеводов.....	17
Основные этапы трансформации углеводов.....	18
Скорость очищения почвы от углеводов.....	19
НОРМИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ УГЛЕВОДОРОДАМИ.....	20
МЕТОДЫ ОЧИСТКИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ.....	23
Механическая очистка.....	23
Сорбенты.....	24
Биологическая очистка и восстановление.....	24
Биоаугментация.....	24
Биостимуляция.....	26
Фиторемедиация.....	27

ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОЧВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ НЕФТЕПРОДУКТАМИ, В ЕВРО-АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ.....	29
Биологическая очистка и восстановление почв и грунтов, загрязненных нефтепродуктами (свежее загрязнение), методом биостимуляции и биоаугментации.....	29
Биологическая очистка и восстановление почв и грунтов, загрязненных нефтепродуктами (старое загрязнение), методом биостимуляции и биоаугментации.....	31
Сорбционно-биологическая очистка и восстановление почв и грунтов, загрязненных нефтепродуктами (старое загрязнение)	40
Сорбционно-биологическая очистка и восстановление нефтезагрязненных прибрежных почв и грунтов арктических морей (свежее загрязнение).....	46
Оценка возможности вторичного загрязнения после биоремедиации.....	52
ТЕХНОЛОГИЯ ФИТОРЕМЕДИАЦИИ КАК ЭТАП БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОЧВ ПОСЛЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТАМИ.....	56
КОМПЛЕКСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ С ПРИМЕНЕНИЕМ БИОПРЕПАРАТОВ — ДЕСТРУКТОРОВ УГЛЕВОДОРОДОВ И УСКОРЕННОГО ФОРМИРОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА.....	61
ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ С ПРИМЕНЕНИЕМ УСКОРЕННОГО ФОРМИРОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА.....	71
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	75
ЛИТЕРАТУРА.....	77
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	91

ВВЕДЕНИЕ

Арктика — это богатые природные ресурсы и колоссальный экономический потенциал. Но при всей экономической важности региона необходимо понимать, что это еще и «сокровищница» уникальной природы, регион, от которого во многом зависит климат нашей планеты. Безответственная гонка за ресурсами может стать причиной необратимых экологических катастроф. Поэтому задачи промышленного освоения Севера нельзя рассматривать в отрыве от вопросов сохранения биоразнообразия хрупких арктических экосистем.

Большое внимание при реализации программ в области охраны окружающей среды и сохранения биоразнообразия Арктики уделяется постоянно увеличивающемуся риску возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с нефтяными разливами. А для окружающей среды Арктики разливы нефти — одна из самых больших угроз.

Мурманская область — один из наиболее освоенных и экономически развитых регионов Европейского севера России. На протяжении 100 лет здесь идет интенсивный рост промышленности и освоение запасов полезных ископаемых, что сопровождается негативным влиянием на окружающую среду и нарушением естественных экосистем. В последнее время отмечается повышенное внимание к потенциалу Северного морского пути — увеличение объема перевозок по этой морской трассе, развитие портовой инфраструктуры и Мурманской области в целом как ключевого объекта для активного освоения Арктики. Одновременно с увеличением объемов перевозимых грузов морским, железнодорожным и автотранспортом растет и вероятность возникновения аварийных и нештатных ситуаций, в том числе связанных с разливами нефти на суше и в море. В связи с этим обостряются проблемы обеспечения экологической безопасности региона и возникает необходимость поиска наиболее эффективного и безопасного для окружающей среды технологического подхода к восстановлению загрязненных территорий.

Углеводороды являются одним из опаснейших, быстро распространяющихся и медленно деградирующих в естественных условиях загрязнителей [Гайнутдинов, 1979]. Естественное восстановление загрязненных нефтью и нефтепродуктами почв

представляет собой сложный и продолжительный процесс, зависящий от природных условий региона (влажности, температуры, активности почвенного биоценоза и др.). Особые природно-климатические условия Заполярья (почвы, бедные питательными веществами, большое количество осадков, низкие температуры, значительная высота и устойчивость снежного покрова), а также низкая биологическая активность почв не способствуют естественным процессам самоочищения. Поэтому выяснение путей ускорения данного процесса в условиях Арктики является важным направлением сохранения окружающей среды.

Одним из перспективных, но редко используемых на практике в северных регионах России способов очистки и восстановления почв от загрязнения нефтепродуктами является биоремедиация, то есть очищение почв от нефтезагрязнения за счет деятельности активных микроорганизмов — деструкторов нефти, интенсивно потребляющих углеводородные компоненты [Мукашева, 2001; Плешакова и др., 2008; Schacht, Ajibo, 2002; Киреева и др., 2003]. Интенсификация процессов биоремедиации может быть достигнута путем выращивания на загрязненных участках устойчивых к нефтезагрязнению видов растений [Маганов и др., 2006; Надеин, 2001; Плешакова и др., 2005]. Ремедиационное действие трав определяется способностью создания и накопления подземной и надземной биомассы. Создавая корневую систему, растения улучшают структурность горизонта загрязнения, воздушный и водный режимы, увеличивают накопление различных элементов, тем самым обеспечивают максимальную активность микробиоценоза в разрушении углеводородов [Баландина, Еремченко, 2016; Хабибуллина и др., 2002].

Успешное применение методов биоремедиации в Арктике предполагает, во-первых, разработку технологий использования потенциала микроорганизмов нефтеокисляющего действия для данной климатической зоны с целью их адаптации к условиям среды обитания, а во-вторых, использование эффективных способов ускоренного создания устойчивых к нефтезагрязнению растительных сообществ. Последнее обусловлено проблемами естественного формирования растительных сообществ в сложных климатических условиях Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ).

На протяжении более чем десяти лет сотрудниками Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра Российской академии наук (ИППЭС КНЦ РАН) проводятся работы по оценке эффективности очистки и восстановления почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами, в условиях Мурманской области, относящейся к АЗРФ. Настоящая брошюра является логическим продолжением методических рекомендаций «Пора озеленять Арктику. Инновационные газонные технологии для создания травяного покрова различного назначения в условиях Заполярья» [2020] и «Пора очищать Арктику. Создание фитоочистной системы для доочистки сточных вод горнорудных предприятий от минеральных соединений азота» [2021]. Здесь мы обобщили многолетний опыт исследований по разработке и оценке эффективности биологических способов очистки и восстановления почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами, в Мурманской области.

Любые научные исследования в определенном смысле основываются на результатах коллективного творчества, поскольку они наследуют предшествующий опыт, обобщают и анализируют современные изыскания. Авторы выражают искреннюю признательность всем, кто участвовал в проведении данных исследований — сотрудникам лаборатории экологии микроорганизмов ИППЭС КНЦ РАН, Федерального бюджетного учреждения «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Мурманской области», Полярной опытной станции — филиала Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Николая Ивановича Вавилова, Государственного природного заповедника «Пасвик», испытательного полигона ООО «ЭкоЦентр», ООО «ОРКО-ИНВЕСТ» и «САБРУС».

Основные результаты, которые легли в основу настоящих методических указаний, получены в рамках выполнения государственных заданий ИППЭС КНЦ РАН, а также в рамках международного проекта Коларктик КО1001 «Биоремедиация арктического побережья». Издание подготовлено и опубликовано при финансовой поддержке экспертного центра «Проектный офис развития Арктики (ПОРА)».

НЕФТЬ И НЕФТЕПРОДУКТЫ: СОСТАВ, СВОЙСТВА, ВЛИЯНИЕ НА ПРИРОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ

Нефть — это горючая, маслянистая жидкость, являющаяся важнейшим полезным ископаемым. Она представляет собой сложную смесь алканов, цикланов и аренов, а также соединений, содержащих кислород, серу и азот. В составе нефти более тысячи индивидуальных органических веществ, состоящих из углерода (83–87 %), водорода (12–14 %), серы (0,5–6,0 %), азота (0,02–1,7 %), кислорода (0,005–3,6 %) и минеральных соединений. По плотности различают легкую (0,65–0,87 г/см³), среднюю (0,87–0,91 г/см³) и тяжелую (0,91–1,05 г/см³) нефть (рис. 1).



Рис. 1. Различия в вязкости между легкой и тяжелой нефтью

В основном в нефти представлены парафиновые (обычно 30–35 %, реже 40–50 % по объёму) и нафтеновые (25–75 %) соединения. В меньшей степени — соединения ароматического ряда (10–20 %, реже 35 %) и смешанного или гибридного строения (например, парафинонафтеновые, нафтеноароматические). Ароматические углеводороды — наиболее токсичные компоненты нефти — являются хроническими токсикантами. В частности, к ним относятся низкокипящие арены — бензол, ксилол, толуол и др., которые характеризуются мутагенностью и канцерогенностью. Наиболее опасна группа полиароматических углеводородов.

К неуглеводородным компонентам нефти относятся смолы и асфальтены (от 1–2 до 6–40 %), играющие очень важную роль в химической активности нефти. С этими группами соединений связана основная часть микроэлементов нефти: ванадий, никель, ртуть, мышьяк и хлор.

Источники и причины загрязнения почвы нефтью и нефтепродуктами

Основными источниками возможного загрязнения территории углеводородами являются нефтеперерабатывающие предприятия, терминалы перегрузки и хранения нефти (нефтебазы), трубопроводный, железнодорожный и автомобильный транспорт, автозаправочные станции, в том числе на территории крупных предприятий.

Наиболее выгодным способом транспортировки нефти считается перекачка нефти и нефтепродуктов по трубопроводу. В то же время до 70 % всех светлых нефтепродуктов, часть сырой нефти и мазута перевозится железнодорожным транспортом. На короткие расстояния в пределах региона нефтепродукты перевозят преимущественно автомобильным транспортом. При этом перевозка нефтепродуктов сопряжена с опасностью возникновения аварийных ситуаций в результате нарушения целостности транспортировочных емкостей с последующим разливом углеводородов.

Загрязнение углеводородами происходит и в результате деятельности предприятий, осуществляющих хранение, переработку и реализацию нефтепродуктов (нефтебаз, автомобильных заправочных станций, складов горюче-смазочных материалов и др.) (рис. 2). Считается, что практически под любым подобным объектом рано или поздно образуется зона загрязнения грунтов и подземных вод различными нефтепродуктами [Воробьев и др., 2005].

Основными причинами возникновения аварийных ситуаций на потенциально опасных объектах являются внешние воздействия на трубопроводы, приводящие к их повреждению, коррозионные процессы, несвоевременная замена или ремонт изношенного оборудования, нарушение норм и правил при изготовлении и ремонте труб и оборудования, неэффективная работа систем сбора и очистки ливневых и аварийных стоков, а также действия обслуживающего персонала. Кроме вышеуказанных причин к значительному ущербу могут приводить и природные факторы, например, паводки и половодья, оползни и обвалы, просадки и провалы грунта.



Рис. 2. Локальное загрязнение нефтепродуктами в результате хозяйственной деятельности на территории Мурманской области (фото В. Мязина)

На территории Мурманской области отсутствуют нефтедобывающие и перерабатывающие предприятия, а также крупные нефтепроводы, поэтому основными потенциальными источниками загрязнения становятся объекты, на которых осуществляется хранение, перегрузка и реализация нефтепродуктов, а также автомобильный и железнодорожный транспорт, осуществляющий их транспортировку. Кроме этого, в Мурманской области в частности и в Арктике в целом находится большое количество объектов, в том числе используемых ранее Министерством обороны, на территории которых в результате прошлой хозяйственной деятельности образовались участки различной площади, загрязненные нефтепродуктами. Зачастую очистка и рекультивация этих территорий не проводилась, и сейчас они представляют определенную угрозу как объекты с накопленным экологическим ущербом.

Распределение углеводородов по почвенному профилю

Нефть или нефтепродукты, попав на поверхность почвы, начинают растекаться по ее поверхности и проникать вглубь почвенного профиля. Характер распределения углеводородов в почве определяется свойствами самой почвы (площадью поверхности почвенных частиц, сорбционной емкостью, величиной порово-капиллярных сил и др.), типом нефтепродуктов (соотношением высокомолекулярных и низкомолекулярных компонентов),

характером поступления поллютанта (поверхностно или внутрипочвенно) и временем с момента загрязнения [Солнцева, 1998].

Углеводороды при внутрипочвенной миграции распределяются определенным образом: более вязкие компоненты нефти и нефтепродуктов (смолы и асфальтены) сорбируются в верхних слоях почвы, менее вязкие поступают в нижележащие слои. Поэтому содержание смолистых компонентов в верхних горизонтах почвы в несколько раз превосходит их содержание в нижних горизонтах [Солнцева, 1998; Шумилова и др., 1999; Елин, 2002].

Накопление тех или иных компонентов нефти связано с нефтеемкостью почвы, а также с наличием определенных геохимических барьеров [Солнцева, 1998; Устинов и др., 2000]. Барьерами-аккумуляторами являются органогенный и иллювиальный горизонты почвы, где задерживается основная масса нефтепродуктов [Габбасова и др., 2003; Андреева, 2005 ; Фарахова, 2009]. Глеевые и мерзлотные горизонты почв являются барьерами, которые практически не пропускают органические загрязнители за счет наличия минимальных по размеру пор и капилляров. Барьером на пути движения нефти станет и наличие грунтовых вод под поверхностью. В то же время влажность почвы оказывает непосредственное влияние на распределение нефти: чем выше влажность почвы, тем слабее нефть закрепляется в ней и активнее перемещается [Солнцева, 1998].

Не менее важным является и горизонтальное распределение углеводородов в почве. Непосредственно после загрязнения максимальная концентрация углеводородов наблюдается в месте их поступления в почву. В центре загрязнения остается и основная масса высокомолекулярных смолистых компонентов. Постепенно происходит перестройка ореола загрязнения: концентрация в эпицентре загрязнения снижается на фоне ее увеличения по краям. Одновременно с этим концентрация углеводородов в верхних почвенных горизонтах снижается, в нижних — увеличивается. Такое перераспределение может привести к выходу углеводородов за пределы первоначального загрязнения.

Количество углеводородов, способных накапливаться в почве, зависит от географического положения территории (увеличивается с юга на север) и типа почвы (увеличивается от песчаных к суглинистым и глинистым) [Шумилова и др., 1999]. Болотные почвы способны к

биоаккумуляции и адсорбции многих химических соединений, в том числе и углеводов, и являются глобальным буфером нефтепродуктов [Устинов и др., 2000; Алябина и др., 2008]. Песчаные и супесчаные почвы в меньшей мере задерживают углеводороды, что определяет высокую степень их миграции. Так, при концентрации 50 л/м² следы нефти обнаруживаются на глубине более 1 м, при дозах 10–20 л / м² — на глубине 10–30 см, а большинство ее задерживается органометным горизонтом почвы [Чижов и др., 2007].

Изменение физических и химических свойств почв после загрязнения

Загрязнение нефтью и нефтепродуктами в большей или меньшей степени приводит к изменению всех характеристик почвы. В первую очередь можно отметить визуальные изменения: более темное окрашивание верхних почвенных горизонтов, ослабление типичной дифференциации профиля, увеличение железистых и органоминеральных новообразований [Солнцева, 1988; Андреева, 2005]. Например, при загрязнении нефтью чернозема отмечается потемнение загрязненных горизонтов и «склеивание» почвенных агрегатов, что затрудняет поступление питательных веществ в почвенный раствор и увлажнение почвенного профиля [Габбасова и др., 2003; Салангина, 2003]. Просачивание углеводов вглубь почвы приводит к ее цементации, а в дальнейшем — к заболачиванию [Безносиков и др., 2004].

Образование на поверхности и в профиле почвы «битумных корок», пленки на поверхности почвенных частиц изменяет водно-воздушный режим: почвы теряют способность впитывать и удерживать влагу, что приводит к снижению гигроскопической влажности, водопроницаемости и влагоемкости. При этом возможно увеличение влажности нижних почвенных горизонтов и развитие анаэробных процессов [Габбасова и др., 2003; Пермитина, Димеева, 2003; Басюл, 2007; Рогозина, Шиманский, 2007; Леднев, 2008].

Загрязнение нефтью и нефтепродуктами затрагивает и химические свойства почв: изменяется содержание органического углерода, состав гумуса, количество и соотношение макро- и микроэлементов [Алехин и др., 1998; Солнцева, 1998; Киреева, Ямалетдинова, 2001; Деградация..., 2002; Елин, 2002; Безносиков и др., 2004; Сухова и др., 2004; Андреева, 2005; Рогозина, Шиманский, 2007; Басюл, 2008; Леднев, 2008; Новоселова, 2008; Сулейманов и др., 2008].

Сразу после загрязнения значительно увеличивается общее содержание органического углерода в верхних почвенных горизонтах [Солнцева, 1998]. Постепенно содержание углеводов в верхних горизонтах снижается, а биологическая продуктивность восстанавливается. Для почв легкого гранулометрического состава, в том числе и пахотных, наоборот, наблюдается быстрое просачивание углеводов вглубь, что приводит к повышению содержания органического углерода по всему профилю почвы. В результате увеличения содержания органического углерода происходит изменение соотношения углерода к азоту, снижается содержание подвижных форм калия и фосфора [Андреева, 2005; Рогозина, Шиманский, 2007; Сулейманов и др., 2008; Фарахова, 2009; Назаров и др., 2010].

Таким образом, загрязнение нефтепродуктами оказывает негативное влияние на все характеристики почвы — от морфологического строения почвенного профиля до химического состава. Общими изменениями для большинства типов почв является увеличение содержания органического углерода, расширение отношения C : N, уменьшение содержания подвижного калия, фосфора и азота. В загрязненных почвах ухудшается агрохимическое и агрофизическое состояние, а почвы перестают выполнять свои функции.

Влияние углеводов на биологическую активность почвы

Биологическая активность почвы определяется, прежде всего, состоянием сообществ почвенных микроорганизмов (бактерий, микроскопических грибов и водорослей) и беспозвоночных животных. Поэтому загрязнение почвы приводит к различным ответным реакциям в первую очередь среди этих групп живых организмов.

Изменение состояния почвенного микробиоценоза

Для характеристики изменений, происходящих в микробиоценозе почвы под влиянием загрязняющих веществ, было предложено использовать модель четырех адаптивных зон в зависимости от уровня техногенной нагрузки [Гузев, Левин, 2001]. При низком уровне нагрузки (зона гомеостаза) биомасса микроорганизмов может возрастать, а состав и количественное соотношение видов в сообществе остаются неизменными. При среднем уровне нагрузки (зона стресса) происходит перестройка популяции, изменяются виды-доминанты, но состав

микробного сообщества остается практически неизменным. В условиях высокого уровня техногенной нагрузки (зона резистентности) резко снижается видовое разнообразие и изменяется состав почвенных микроорганизмов. Дальнейшее увеличение техногенной нагрузки (зона репрессии) приводит к подавлению роста почвенных микроорганизмов.

Состояние сообщества почвенных микроорганизмов изменяется и в зависимости от времени, прошедшего с момента загрязнения. Этот процесс включает пять стадий, сменяющих друг друга с увеличением времени после загрязнения: отмирание, адаптацию, линейный и экспоненциальный рост, стабилизацию. При низких исходных концентрациях загрязнителя стадия отмирания может отсутствовать [Киреева, Водопьянов, 2007]. Также выделяют три этапа сукцессии почвенного микробценоза на основе изменения численности доминантов. Так, на первом этапе активизируется группа углеводородокисляющих микроорганизмов, на втором этапе увеличивается численность микроорганизмов, чувствительных к загрязнению, жизнедеятельность которых ранее была подавлена. На третьем этапе микробное сообщество возвращается к исходному или близкому к нему состоянию [Маркарова, 2000; Устинов и др., 2000]. Подобные закономерности в изменении численности и видового состава микробценоза нашли подтверждения в исследованиях различных научных коллективов, в том числе и сотрудников лаборатории микробиологии ИППЭС КНЦ РАН [Евдокимова, 2007; Евдокимова и др., 2009; Корнейкова и др., 2011].

Таким образом, в результате загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами происходит изменение численности и структуры почвенной микробиоты. При высокой степени загрязнения снижается численность всех групп микроорганизмов, а при более низких дозах перестраивается структура сообщества почвенных микроорганизмов. Нефтяное загрязнение, с одной стороны, приводит к снижению численности бактерий, использующих минеральные формы азота, и целлюлозоразрушающих микроорганизмов, а с другой стороны, вызывает рост численности углеводородокисляющих бактерий и микромитетов. С увеличением срока загрязнения сообщества почвенных микроорганизмов постепенно восстанавливаются до исходного состояния или близкого к нему. В любом случае загрязнение почвы приводит к полному или частичному изменению структуры

почвенной микробиоты, вплоть до полной ее гибели, что негативно сказывается на функциях почвы.

Изменение ферментативной активности загрязненной почвы

Воздействуя на почвенную микробиоту, нефтепродукты влияют ещё на два важных показателя биологической активности почвы — ферментативную активность и интенсивность эмиссии углекислого газа.

Ферменты поступают в почву в результате жизнедеятельности растений, микроорганизмов, почвенных животных и после их смерти. Ферменты в почве сохраняют свою активность в результате иммобилизации в илистой и пылевой фракциях почвы, образуя характерный для разных типов почв ферментный пул [Новоселова, 2008]. Различные классы ферментов выполняют свои специфические функции. Так, ферменты из класса оксидоредуктаз определяют окислительно-восстановительные условия в почве, а гидролазы отвечают за интенсивность процесса минерализации органических веществ.

В условиях нефтяного загрязнения происходит трансформация ферментного пула и изменение характера ферментативных реакций. Активность многих ферментов возрастает при низких дозах углеводородов в почве, а в условиях сильного загрязнения — снижается [Киреева, Ямалетдинова, 2001; Сулейманов и др., 2008; Щемелинина, 2008; Ибрагимова, 2009]. Снижение активности ферментов при увеличении дозы загрязнителя объясняется как прямым ингибированием каталитической активности, так и подавлением роста микроорганизмов. С увеличением возраста загрязнения, уменьшением токсичности остаточных нефтепродуктов и изменением численности микроорганизмов ферментативная активность почвы повышается.

На ферментативную активность оказывает влияние и тип нефтепродуктов, попавших в почву. Парафиновые и циклопарафиновые углеводороды активизируют, а ароматические углеводороды ингибируют активность уреазы, амилазы, инвертазы, ксиланазы, целлюлазы, фосфатазы, каталазы и дегидрогеназы [Новоселова, 2008]. Бензин, состоящий из сильнотоксичных легколетучих углеводородов, вызывает угнетение микробного сообщества, а значит, и активность большинства ферментов. Дизельное топливо содержит меньше легких углеводородов и способно увеличивать микробную биомассу, а следовательно, и активность ферментов [Завгородняя, Дроздова, 2011].

Исходя из вышеописанных закономерностей, активность ферментов можно использовать в качестве диагностического признака, позволяющего определить, когда и в какой степени произошло загрязнение.

Выделение углекислого газа в почве осуществляется в результате деятельности почвенных микроорганизмов, беспозвоночных животных и корневой части растений. Эмиссия CO₂ также может служить характеристикой интенсивности протекающих биологических процессов в почве и индикатором состояния почвенной биоты. В результате загрязнения почвы нефтью и нефтепродуктами за счет увеличения содержания доступного для микробоценоза органического углерода может наблюдаться увеличение эмиссии углекислого газа. Более высокое содержания углеводов в почве, наоборот, может привести к снижению эмиссии [Гафарова, Зарипова, 2005; Ибрагимова, 2009; Денисова и др., 2011].

Влияние углеводов на растения

Углеводы оказывают влияние на растения как непосредственно в результате прямого воздействия, вызывая ожоги в месте контакта или токсические реакции, так и косвенно, в результате увеличения гидрофобности и анаэробности почвы [Полонский, Полонская, 2013]. Гибель растений может быть следствием развития микромицетов-токсикообразователей в ризосфере [Назаров, Иларионов, 2005]. Помимо непосредственного токсического эффекта углеводороды нефти могут оказывать тератогенный и мутагенный эффекты на растения [Петухова, 2007; Аниськина и др., 2004].

За последнее время проведено множество исследований как на территориях нефтяных разливов, так и в условиях лаборатории с использованием различных тест-растений. Показано как положительное, так и отрицательное, но разное по силе влияние нефти и нефтепродуктов на растения, зависящее от концентрации и типа нефтепродуктов, продолжительности и условий воздействия, вида растений, почвенно-климатических условий и др. На основании проведенных исследований были установлены пороговые значения концентрации углеводов в почве, при которых проявляется острая (10,4 %) и хроническая (3,5–6,8 %) фитотоксичность [Зейферт, Гамерова, 2012].

ТРАНСФОРМАЦИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПОЧВЕ

В процессе деструкции углеводороды в почве подвергаются влиянию различных факторов, среди которых можно выделить физические (испарение, вымывание), химические (фотолиз, биохимическое разрушение) и биологические (микробное разрушение).

Испарение, вымывание и фотоокисление под действием ультрафиолета наиболее эффективны на поверхности и в верхних горизонтах почвы, а подвергаются этим воздействиям в основном легкие фракции. В толще почвы окисление углеводородов преимущественно осуществляется за счет действия микроорганизмов и ферментов (биохимическое разрушение).

Исследования, направленные на определение эффективности испарения различных нефтепродуктов из почвы, показали, что нефтешлам, мазут и смазочные масла испаряются во много раз медленнее, чем бензин и дизельное топливо. Максимальное испарение наблюдается в течение первых четырех суток, особенно в первые 30–90 мин после загрязнения, а вклад испарения в самоочищение почвы составляет от 2 до 25 % [Водопьянов, 2008; Кокорина, 2010].

Для микробиологического разложения наиболее доступны легкие фракции (алканы и циклоалканы), которые практически полностью подвергаются биодеструкции (степень биодеградации — 45–100 %), а наименее доступны углеводороды со сложной молекулярной структурой: смолы, асфальтены, арены, полициклические арены и нафтеноарены, тяжелые ароматические фракции (степень биодеградации — 0–45 %) [Холоденко и др., 2001; Айткельдиева, Файзулина, 2007].

Механизмы трансформации углеводородов

Основной механизм окисления углеводородов разных классов в аэробной среде — это внедрение кислорода в молекулу и замена связей с малой энергией разрыва (C–C, C–H) связями с большей энергией. В процессе трансформации углеводороды подвергаются химическим превращениям — гидратации, восстановлению, гидролизу, окислению, замещению, присоединению и конденсации. В результате этих реакций образуются неустойчивые подвижные соединения (окиси, спирты, альдегиды, кетоны, кислоты), которые часто являются экологически

более опасными, чем исходные углеводороды, что в дальнейшем может привести к негативным последствиям [Пиковский, 1988].

Основные этапы трансформации углеводородов

Процесс деструкции нефтепродуктов можно разделить на три этапа, для каждого из которых характерны определенные изменения в составе углеводородов. Первый этап (свежее загрязнение) продолжительностью от 12 до 24 месяцев характеризуется преобладанием процессов испарения, вымывания, фотохимического и ферментативного окисления, за счет чего снижается содержание наиболее легких углеводородов. Углеводородоокисляющая микробиота на этом этапе не оказывает существенного влияния на процессы деструкции. На втором этапе (зрелое загрязнение) происходит биodeградация алканов, циклоалканов и в меньшей степени ароматических углеводородов в результате деятельности углеводородоокисляющих микроорганизмов, при этом увеличивается относительное содержание смолисто-асфальтеновых фракций. Третий этап (старое загрязнение) начинается через 48–52 мес. и характеризуется наличием большого количества смолисто-асфальтеновых фракций и меньшим содержанием алканов, циклоалканов и ароматических соединений. В процессе трансформации элементный состав нефти изменяется в сторону снижения доли углерода и увеличения доли кислорода, серы и галогенов с образованием различных соединений неуглеводородной структуры. Конечными продуктами метаболизма нефти в почве являются углекислый газ, который может связываться в карбонаты или выделяться в атмосферу, вода, кислородные соединения (спирты, кислоты, альдегиды, кетоны), включающиеся в почвенное органическое вещество или растворяющиеся в воде, и твердые нерастворимые продукты метаболизма [Одинцова, 2010]. Изменение состава углеводородов в процессе деградации нефтепродуктов и появление химических маркеров, характерных для определенного этапа деградации, позволяют установить давность загрязнения. Свежим считается загрязнение сроком до четырех лет, старым — более четырех [Казанцева и др., 2001].

Скорость очищения почвы от углеводородов

На скорость очищения почвы от углеводородов влияет исходная концентрация и тип нефтепродуктов, а также почвенно-климатические условия региона. Наиболее быстрое снижение концентрации наблюдается в первые несколько месяцев с момента загрязнения, что обусловлено процессами испарения легких фракций, распределением загрязнения и фотохимическим окислением [Фокина и др., 2010; Евдокимова, Маслобоев, 2011]. В дальнейшем скорость самоочищения замедляется и зависит в большей степени от активности почвенной микробиоты. Например, самоочищение слоя почвы 0–60 см от нефти до концентрации 500 мг/кг может быть достигнуто через 6 лет после слабого загрязнения, через 11 лет после среднего и через 16 лет после сильного загрязнения [Фарахова, 2009].

НОРМИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ УГЛЕВОДОРОДАМИ

Принято считать, что почва является загрязненной, когда концентрация нефтепродуктов в ней достигает величины, при которой начинают происходить негативные изменения: угнетение или деградация растительного покрова, угнетение или гибель почвенной биоты, изменение морфологии и физико-химических свойств почв, снижение продуктивности почвы и нарушение равновесия в экосистеме [Пиковский и др., 2003].

Безопасным уровнем концентрации [Пиковский, 1993] или допустимым уровнем концентрации [Другов, Родин, 2007] считается уровень содержания нефтяных углеводородов в почве, при котором не отмечается ухудшения качества природной среды. Для определения допустимой нагрузки на почву используют понятие предела потенциального самоочищения — максимального уровня содержания углеводородов, выше которого процессы самоочищения почвы замедляются. Опираясь на эти понятия, можно рассчитать ориентировочно допустимую концентрацию (ОДК) углеводородов в почве, то есть уровень загрязнения, при котором почва в течение одного года восстановит свою продуктивность, а негативные последствия для почвенного биоценоза будут самопроизвольно ликвидированы [Пиковский и др., 2003] (рис. 3). Этот уровень будет зависеть от типа почвы и климатических условий региона, от вида и количества нефтепродуктов, попавших в почву, что делает невозможным применение единого показателя для всего многообразия условий.

В настоящее время в России нормативная база ПДК (ОДК) нефти и нефтепродуктов в почве как на федеральном, так и на региональном уровнях разработана слабо. Внедрение данных нормативов, учитывая региональные особенности (тип почвы, особенности рельефа, гидрологические и климатические условия, вид и исходное количество загрязнителя и другие факторы), требует проведения трудоемких и долгосрочных исследований.

Условно можно сказать, что загрязненной считается почва с содержанием нефтепродуктов более 1000 мг/кг [О порядке..., 1994; Методические..., 1995; Санитарно-эпидемиологические..., 2003]. На региональном уровне нормативная база по содержанию нефти в почвах наиболее разработана в Татарстане, Республике Коми и Ханты-мансийском автономном округе, где загрязненными считаются почвы, содержащие более 1000–1500 мг/кг нефтепродуктов. В случае

отсутствия установленного норматива уровень загрязнения оценивается по превышению содержания углеводов над фоновым значением в конкретном регионе, однако фоновое содержание веществ, определяемых как «нефтепродукты», в различных регионах и типах почвы находится в широких пределах — от 10 до 2500 мг/кг. Почвы, содержащие большое количество органических соединений, будут характеризоваться и высокими концентрациями «нефтепродуктов», так как в состав почвенного органического вещества входят соединения естественного, неантропогенного происхождения, схожие с углеводородами и аналитически определяемые как «нефтепродукты».

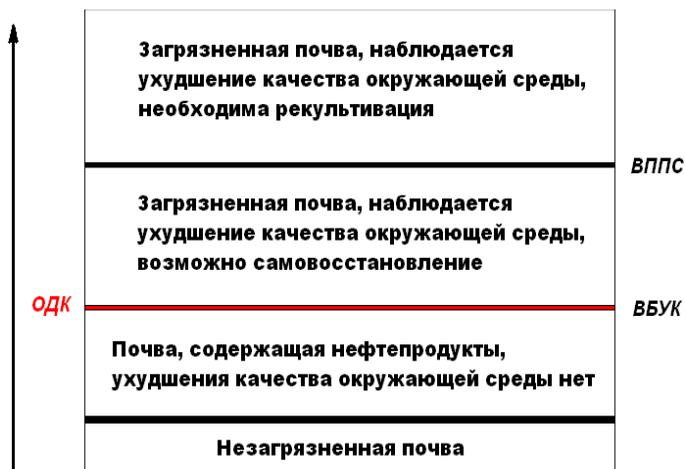


Рис. 3. Принцип определения ОДК нефти и нефтепродуктов в почве [Мязин, 2014]:

ВППС — верхний предел потенциального самоочищения; ВБУК — верхний безопасный уровень концентрации; ОДК — ориентировочно допустимая концентрация; стрелкой указано направление увеличения концентрации нефтепродуктов в почве

Невозможность установить единый норматив ОДК или ПДК нефти и нефтепродуктов для всей территории России является причиной существования различных классификаций почв по степени загрязнения (табл. 1), что приводит к определенным трудностям при оценке степени загрязнения территории даже в пределах одного региона.

Таблица 1

Классификация земель по степени загрязнения нефтепродуктами в России [Мязин, 2014]

Источник данных, регион исследования, вид нефтепродуктов, тип субстрата	Степень загрязнения, г/кг			
	низкая (слабая)	средняя	высокая (сильная)	очень высокая (критическая)
[О порядке..., 1994], независимо от региона, нефть и нефтепродукты	1–2	2–3	3–5	> 5
[Методические..., 1995], независимо от региона, нефть	1–2	2–3	3–5	> 5
[Пиковский, 1993], независимо от региона, нефтепродукты	0,5–1	1–2	2–5	> 5
[Московченко, 1998], Тюменская область, нефть	0,5–1	1–2	2–5	> 5
[Герасимова и др., 2003], независимо от региона, нефтепродукты	1–5	5–10	> 10	–
[РД 39-00147105-006-97], нефть				
приполярная тундра, лесотундра и северная тайга	< 5	5–10	> 10	–
средняя и южная тайга	–	< 30	> 30	–
лесостепь, степь, сухостепь	–	< 60	> 60	–
[Гилязов, Гайсин, 2003], Республика Татарстан, нефть	< 30	30–60	60–120	> 120
[Леднев, 2008], дерново-подзолистые почвы, нефть	10–30	30–50	50–120	> 120
[Маганов и др., 2006], Республика Коми, нефть				
песчаные почвы	До 10	10–50	50–150	> 150
торфяные почвы	До 30	30–100	100–350	> 350
[Чижев, Долингер, 1998], ХМАО, нефть				
минеральные почвы	< 30	30–200	> 200	–
биогенные почвы	< 150	150–400	> 400	–
[Гашев и др., 1992], Среднее Приобье, нефть	До 100	100–400	> 400	–

Как видно из табл. 1, количество нефтепродуктов, характеризующее одну и ту же степень загрязнения, может отличаться в несколько раз и даже на порядок. Это является следствием климатических, географических и гидрологических условий, типа почвы и ее потенциала самовосстановления.

МЕТОДЫ ОЧИСТКИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ

Все методы очистки почв, загрязненных нефтью или нефтепродуктами, можно разделить на две большие категории — *ex situ* и *in situ*. Технологии *ex situ* включают в себя обязательное удаление почвы с загрязненного участка и последующую транспортировку её на площадку обработки и складирования. Экскавация и последующая обработка почвы на специальных площадках позволяет применять более сложные и эффективные методы очистки, в том числе промывку с использованием сильных химических реагентов, горячей воды или пара. Однако подобные технологии сложно применять при больших площадях загрязнения и в труднодоступных районах. Кроме того, изъятие земель вызывает изменение морфологической структуры участка и может иметь негативные последствия. Технологии *in situ* применяются непосредственно на месте загрязнения, что позволяет избежать ряда проблем, снижает затраты на проведение рекультивации, не нарушает естественного сложения почв и позволяет снизить негативное воздействие на экосистемы. Но недостатком данных технологий является гетерогенная природа субстрата и невозможность создать идеальные условия для максимально быстрой очистки почвы. В данной работе мы будем рассматривать только технологии *in situ* как наиболее перспективные, с нашей точки зрения, для применения в условиях Севера.

Механическая очистка

Основная задача механической очистки — сбор нефтепродуктов и сильно загрязненной почвы для предотвращения распространения загрязнения на близлежащие территории. Для механической уборки нефти с поверхности почвы применяют различные нефтесборные устройства (экскаваторы, скребки и др.) и сорбенты. Механическая очистка в первую очередь служит для удаления нефти и нефтепродуктов с поверхности почвы до момента просачивания углеводородов вглубь.

Сорбенты

В настоящее время разработано более двух сотен различных сорбентов, имеющих органическую и неорганическую природу. В качестве материалов для производства сорбентов используют торф, уголь, природное сырье растительного и животного происхождения и отходы переработки (мох, листву, кору, опилки, шелуху зерновых, хитозан, целлюлозу и др.), синтетические материалы (полипропилен, полиуретан, тефлон, пенопласты), естественные и искусственные минералы (вермикулит, диатомит, цеолит, песок, глину, перлит, керамзит, силикагель и др.), органоминералы (сапрпель, сланцы и др.). Все они в той или иной степени используются для сбора нефтепродуктов с поверхности почвы и воды [Зосин и др., 2001; Месяц, Аверина, 2010; Губкина и др., 2011; Гафарова, Зарипова, 2005; Месяц, Шемякина, 2009; Буланова и др., 2005; Кокорина, 2009; Шумилова и др., 1999; Стрижакова, Васильева, 2006].

Особую группу составляют биосорбенты — сорбенты различной природы с иммобилизованными на них клетками микроорганизмов. Клетки, закрепленные на сорбенте-носителе, меньше реагируют на внешние факторы, при этом увеличиваются их ферментативная активность и способность разлагать углеводороды. Каждая частица сорбента становится активным центром трансформации углеводородов, в то же время улучшается структура загрязненного субстрата (почвы, песка или грунта).

Биологическая очистка и восстановление

Технологии биологической очистки *in situ* довольно разнообразны, однако можно выделить ряд основных методов: биоаугментация, биостимуляция, фиторемедиация, промывание, вентиляция и естественная аттенуация (самовосстановление). Все эти методы могут использоваться как отдельно, так и совместно или последовательно.

Биоаугментация

Биоаугментация — внесение культур нефтеокисляющих микроорганизмов, ранее выделенных из загрязненных почв или созданных в лабораторных условиях с помощью генетических модификаций.

В процессе разработки биопрепаратов нефтеокисляющего действия исследуются различные культуры микроорганизмов. На их основе затем создают комплексы с наиболее выраженными углеводородокисляющими

свойствами. Наиболее часто в составе биопрепаратов нефтеокисляющего действия используют штаммы бактерий, относящиеся к следующим родам: *Acinetobacter*, *Agrobacterium*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Corynebacterium*, *Enterobacter*, *Flavobacterium*, *Microbacterium*, *Micrococcus*, *Mycobacterium*, *Nocardia*, *Nostoc*, *Pseudomonas*, *Rhodococcus*, *Stenotrophomonas* [Xu et al., 2018; Куыкина, Ivshina, 2019]. Деструкторами углеводов могут выступать не только бактерии, но и почвенные микромицеты родов *Phoma*, *Penicillium*, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Candida* [Al-Nasrawi, 2012; Чапоргина и др., 2019; Исакова, Корнейкова, 2021], а также зеленые водоросли *Chlorella* [Патент № 2764305 РФ; Патент № 2703500 РФ].

Различными научными коллективами разработаны многочисленные биопрепараты (как на основе монокультур, так и полибактериальные, в том числе с использованием микроскопических грибов) нефтеокисляющего действия и проведены исследования их эффективности. Результаты многих работ показывают положительный эффект их применения, который заключается в ускорении окисления различных нефтепродуктов.

Однако применение биопрепаратов нефтеокисляющего действия имеет ряд ограничений. Внесение углеводородоокисляющих микроорганизмов в почву нарушает естественные микробные сообщества и может привести в итоге к снижению биологической активности или увеличению доли условно патогенных микроорганизмов в почве. Со временем численность входящих в состав биопрепаратов микроорганизмов снижается, что, в свою очередь, приводит к замедлению процессов деструкции углеводов и требует повторного внесения препаратов. Поэтому целесообразно применение комплексных биопрепаратов, содержащих различные штаммы бактерий и грибов, как аэробные, так и анаэробные формы, выделенные непосредственно из нефтезагрязненных участков, где планируется применение данного препарата. Кроме того, эффективность биопрепарата ограничена уровнем загрязнения и климатическими факторами — температурой и влажностью почвы: сочетание неблагоприятных факторов может свести к минимуму эффект от применения биопрепаратов и увеличить время очистки.

Биостимуляция

Биостимуляция — создание оптимальных условий для местных углеводородокисляющих микроорганизмов путем добавления в почву питательных веществ в виде удобрений, акцепторов или доноров электронов и воды с целью ускорения процесса биodeградации.

Применение минеральных удобрений является необходимым условием для деструкции нефти при проведении рекультивационных работ. Интенсивное потребление развивающимися углеводородокисляющими микроорганизмами элементов питания, а также нарушение азотного режима почвы приводят к снижению содержания основных питательных элементов. От достаточного количества в почве биогенных элементов (азота, фосфора и калия) будет зависеть интенсивность разложения углеводов. Недостаток этих элементов необходимо восполнять путем внесения в почву минеральных удобрений.

Наибольший эффект обеспечивает применение азотных удобрений, несколько уступают им фосфорные удобрения, а использование калийных удобрений для целей рекультивации менее эффективно. При этом наиболее эффективной является нитратная форма азота, которая используется и в качестве источника азота, и в качестве акцептора электронов в процессах денитрификации. Значительное ускорение биodeградации углеводов в загрязнённых почвах обеспечивает известкование, которое предотвращает подкисление почвы (в результате внесения минеральных удобрений и образования кислот в процессе трансформации углеводов) и способствует поддержанию рН почвы в нейтральном диапазоне. Для разных типов почв и исходных уровней загрязнения рекомендуемые дозы внесения удобрений варьируют от 20 до 200 кг/га в пересчете на действующее вещество — азот, фосфор и калий.

Однако единовременное внесение высоких доз минеральных удобрений негативно сказывается на микробоценозе почв и тормозит процессы деструкции углеводов. Повышенные дозы минеральных удобрений могут приводить к солевой фитотоксичности (сильному подкислению почв) и микробному токсикозу почв (доминированию токсинообразующих грибов рода *Penicillium* и, как следствие, ингибированию прорастания семян и развития проростков) [Гузев, Левин, 2001]. По этим причинам целесообразно проводить дробное внесение небольших доз удобрений несколько раз за сезон.

Для ускорения разложения углеводов совместно с внесением минеральных удобрений или биопрепаратов возможно использование органических удобрений, например биокомпоста [Галиулин и др., 2010], вермикомпоста [Иларионов и др., 2005; Баландина, Садовникова, 2007; Смольникова и др., 2009], активного ила [Киреева, Водопьянов, 2007; Киреева и др., 2008; Новоселова, 2008], отходов пивоваренной промышленности [Руденко, 2011], угольного и торфяного гумата [Колбасов, 2010; Завгородняя, Дроздова, 2011]. Применение органических удобрений усиливает восстановление аборигенной микробиоты, повышает ферментативную активность, ускоряет биоразложение углеводов и оптимизирует состав гумуса.

К методам биоаугментации можно отнести и такие специфические технологии, как биоventилиция (использование контролируемого потока воздуха в почвенном слое для стимуляции деструкторной деятельности местных микроорганизмов) и биопромывание (применение контролируемого потока жидкости для уравнивания и снижения концентрации загрязняющих веществ в среде).

Фиторемедиация

Самостоятельным методом очистки или одним из этапов в комплексной очистке и восстановлении почвы является фиторемедиация — посев растений, устойчивых к загрязнению почвы нефтепродуктами. За счёт благоприятных условий, создаваемых в ризосфере, усиливаются процессы биологической деструкции углеводов и сокращается время очистки. Установлено, что в составе корневых экссудатов присутствует сапонин, увеличивающий биодоступность углеводов для микроорганизмов, и оксидоредуктазы, участвующие в разложении углеводов [Новоселова, Киреева, 2009].

Факторами, которые могут ограничивать применение фиторемедиации, являются повышенное содержание углеводов, бедность почв питательными элементами и недостаток влаги. Для повышения устойчивости травяного покрытия рекомендуется использование дикорастущих видов местной флоры, которые в последующем полностью заменят культурные сорта травосмеси [Капелькина, 2010].

В различных регионах для проведения фиторемедиации используются как дикорастущие виды растений, так и различные сорта культурных растений: овсяница красная и луговая, тимофеевка луговая, мятлик луговой, костер безостый, райграсс пастбищный, крестовник скученный, лисохвост луговой, дягиль лекарственный, бархатцы прямостоячие, рожь озимая, овес, овсюг, донник, рапс, сурепица, люцерна, свербига, козлятник, кукуруза, подсолнечник, вика, клевер, суданская трава. На территории Мурманской области устойчивость к загрязнению нефтепродуктами проявляют рожь многолетняя, овсяница луговая, двукисточник тростниковидный, волоснец песчаный [Евдокимова и др., 2007; Евдокимова и др., 2009].

Таким образом, для успешного восстановления загрязненных почв необходим комплексный подход, включающий в себя мероприятия как технического этапа рекультивации (особенно при высокой дозе загрязнения), так и биологического этапа. На первом этапе проводят инженерно-технические и агрохимические мероприятия (удаление нефти, рыхление и увлажнение почвы). На этапе биологической очистки вносят мелиоранты (минеральные или органические удобрения) для активизации углеводородокисляющей микробиоты или биопрепараты нефтеокисляющего действия, если численность аборигенной микробиоты не удается восстановить иными способами. После снижения концентрации углеводородов в почве до приемлемого уровня проводят восстановление растительного покрова методом посева устойчивых к нефтепродуктам трав. Критериями успешного проведения работ по очистке являются восстановление биологической активности почвы и возможность для роста и развития растений.

В зависимости от степени загрязнения и начальных условий восстановления методы очистки могут применяться поэтапно или совместно. Если содержание углеводородов не превышает 5 %, можно применять сочетание агротехнического метода (рыхление, полив, внесение удобрений) и фиторемедиации. Если содержание углеводородов более 5 %, то следует применять все методы в комплексе.

ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОЧВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ НЕФТЕПРОДУКТАМИ, В ЕВРО- АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ

Биологическая очистка и восстановление почв и грунтов, загрязненных нефтепродуктами (свежее загрязнение), методом биостимуляции и биоаугментации

Загрязнение нефтью или нефтепродуктами может произойти в любое время, а источниками этого загрязнения могут стать самые различные промышленные или транспортные объекты. Даже успешные мероприятия по локализации аварийного разлива и сбору нефтепродуктов в дальнейшем предполагают проведение дополнительной очистки и восстановления территории до исходного или близкого к исходному состояниям. Для этого необходимо разработать эффективные методы очистки и технологии восстановления загрязненных почв, а также оценить способность почв на территории Мурманской области к самовосстановлению, когда проведение каких-либо дополнительных мероприятий после ликвидации аварийного разлива не потребуется.

Долгосрочные полевые модельные эксперименты показали, что самоочищение почвы (подзолы Кольского Севера) от нефтяных углеводородов до значений ОДК в течение одного вегетационного периода возможно при загрязнении светлыми нефтепродуктами в количестве до 3 л/м² (содержание углеводородов в слое почвы 10 см не более 15000 мг/кг) или при загрязнении темными нефтепродуктами в количестве до 2,5 л/м² (содержание углеводородов в слое почвы 10 см не более 5000 мг/кг). Загрязнение почвы в большем количестве приводит к увеличению периода самоочищения до двух и более лет. Несмотря на то что светлые нефтепродукты оказывают большее токсическое воздействие на растения и микроорганизмы в начальный период, их деградация в дальнейшем происходит значительно быстрее, в том числе и за счет физико-химических процессов, в то время как темные нефтепродукты оказываются более устойчивыми к разложению. Так, за три летних месяца содержание светлых нефтепродуктов в верхнем слое почвы снижается на 80 % и более (в большей степени в течение первых 10–30 сут). За этот же период концентрация темных нефтепродуктов уменьшается не более чем на 60 %. В дальнейшем с увеличением доли труднодоступных для микробиоты соединений скорость разложения углеводородов падает (рис. 4).

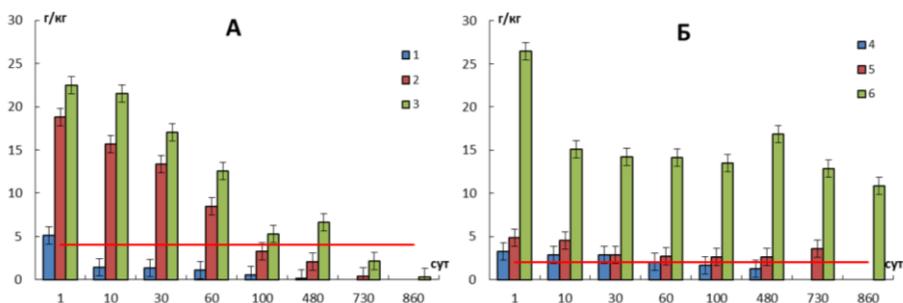


Рис. 4. Динамика содержания углеводородов в почве, загрязненной дизельным топливом (А): 1 — 1,4 л/м²; 2 — 2,8 л/м²; 3 — 14 л/м² и мазутом (Б): 4 — 1,3 л/м²; 5 — 2,6 л/м²; 6 — 7,5 л/м²; линией показаны уровни ОДК (4 г/кг для светлых и 2 г/кг для темных нефтепродуктов)

По результатам исследований была показана эффективность применения биорекультивации для восстановления почв, загрязненных нефтепродуктами (дизельным топливом, мазутом и отработанным машинным маслом), при исходном содержании углеводородов до 60000 мг/кг почвы. Также установлено, что при данном содержании нефтепродуктов происходит увеличение численности и активности углеводородоокисляющей микробиоты [Маслобоев и др., 2014; Мязин, Фокина, 2013].

Внесение минеральных и органических удобрений, а также коммерческих биопрепаратов и препаратов на основе аборигенных углеводородоокисляющих микроорганизмов позволяет ускорить процесс очищения загрязненной почвы на 20–50 %. При этом наиболее эффективным оказался метод биостимуляции, основанный на использовании минеральных и органических удобрений для усиления активности аборигенных углеводородоокисляющих микроорганизмов (рис. 5).

Численность углеводородоокисляющих бактерий в ходе биостимуляции увеличилась в 10–30 раз, возросла ферментативная активность и эмиссия углекислого газа [Мязин, 2013]. Использование данного метода оказало положительное влияние на влажность почвы, значения которой были близки к контрольным.

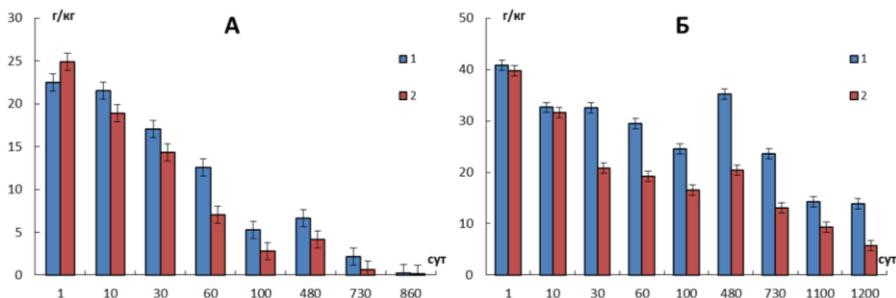


Рис. 5. Динамика содержания углеводов в почве, загрязненной дизельным топливом (А) и отработанным моторным маслом (Б): 1 — без обработки; 2 — после биостимуляции

Результатом проведения серии полевых модельных экспериментов стала разработка рекомендаций по проведению биологической очистки почв после свежего загрязнения в условиях Евро-Арктического региона (приложение I).

Биологическая очистка и восстановление почв и грунтов, загрязненных нефтепродуктами (старое загрязнение), методом биостимуляции и биоаугментации

В Арктической зоне РФ в настоящее время существует проблема ликвидации последствий накопленного экологического ущерба. Имеются участки, загрязненные горюче-смазочными материалами в результате прошлой хозяйственной деятельности, где очистка и рекультивация почв не проводились в течение многих лет. На одном из таких участков в Печенгском районе на северо-западе Мурманской области, на горе Каскама (рис. 6), была исследована эффективность применения методов биостимуляции для очистки и восстановления территории, загрязненной нефтепродуктами в результате прошлой хозяйственной деятельности.

Данная территория расположена в пределах субарктического климатического пояса и, согласно современному ландшафтному делению, относится к бореально-субарктической лесотундровой зоне. Основной тип естественного растительного покрова — сосновые леса со значительным участием березы в древостое. На склонах крупных возвышенностей развита высотная поясность — с отметки 300 м формируются горные тундры,

представленные кустарничково-лишайниковыми растительными сообществами со скальными обнажениями. Встречаются участки с кустарничково-травяными и травяными сообществами.

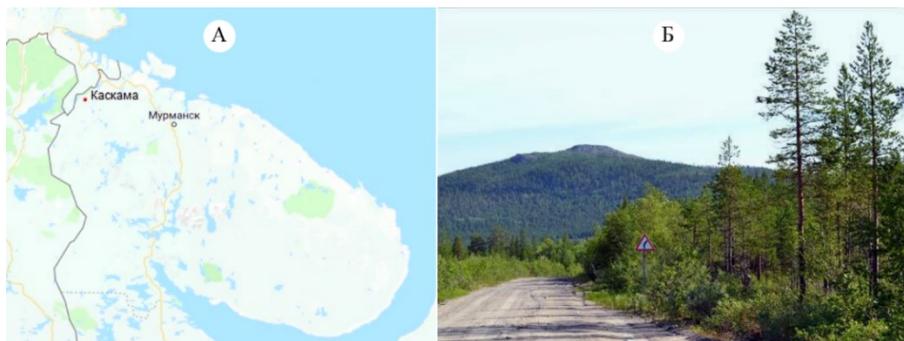


Рис. 6. Географическое положение (А) и общий вид (Б) горы Каскама (фото В. Мязина)

Экосистемы горы Каскама были подвержены загрязнению нефтепродуктами (дизельным топливом) более 20 лет назад. В результате антропогенного воздействия произошло обнажение материнской породы, гибель растительного покрова и разрушение органогенного горизонта почв на вершине и участках различной площади на западном и юго-восточном склонах горы (рис. 7).



Рис. 7. Загрязненные участки на юго-восточном (А) и западном (Б) склонах горы Каскама (фото В. Мязина)

На загрязненных участках юго-восточного и западного склонов горы Каскама (высота 320 м над у. м.) были заложены экспериментальные площадки для исследования возможности восстановления почв и растительности с использованием приемов биоремедиации (рис. 8). Для стимуляции естественной углеводородокисляющей микробиоты использовали минеральное удобрение «Азофоска» (NPK — 16 : 16 : 16), органическое удобрение «Бамил» и биоудобрение «Омуг». Органическое удобрение «Бамил» получают из продуктов аэробной переработки сточных вод свиногокомплексов: активного ила и осадка сточных вод. Биоудобрение «Омуг» получают путем аэробной ферментации подстилочного птичьего помета. Удобрения вносили дважды в год — в начале лета и осенью в течение четырех лет в следующих количествах: «Бамил» — 100 г/м², «Омуг» — 200 г/м², минеральные удобрения — 100 г/м². Через год после начала работ на всех опытных площадках была посеяна овсяница луговая (посевной материал предоставлен ПОСВИР, город Апатиты).



Рис. 8. Опытные площадки на юго-восточном (А) и западном (Б) склонах горы Каскама (фото В. Мязина)

В результате многолетних наблюдений были отмечены положительные изменения в состоянии загрязненных участков. Внесение органического удобрения «Бамил» привело к увеличению содержания органического углерода до 23–28 %. В то время как использование удобрения «Омуг» и минерального удобрения достоверно не повлияло на содержание углерода в почве в период наблюдения. Применение биоудобрений привело

к достоверному увеличению содержания азота в 2,5–3 раза, а отношение C : N после начала очистки составило 41–49.

Внесение минеральных удобрений обусловило увеличение подвижных фосфатов в почве до 14–24 мг/100 г. Органические удобрения, которые также содержали в своем составе соединения фосфора, способствовали увеличению количества фосфатов в почве до 3–3,5 в вариантах с удобрением «Омуг» и до 6,5–11,2 мг/100 г в варианте с удобрением «Бамил». Однако за счет высокой подвижности соединения фосфора легко вымываются из почвы, что выражается в снижении его концентрации на следующий сезон.

Использование органических удобрений вызвало многократный рост численности как сапротрофных, так и углеводородоокисляющих бактерий. Внесение минеральных удобрений также привело к увеличению количества бактерий, но в гораздо меньшей степени. Так, в почве до начала работ по очистке и восстановлению численность сапротрофных бактерий была очень низкой и колебалась от $2 \cdot 10^3$ до $66 \cdot 10^3$ кл/г. Использование удобрений «Бамил» и «Омуг» привело к росту до $5-15 \cdot 10^6$ кл/г, а внесение минеральных удобрений — до $66 \cdot 10^4$ кл/г. В то же время одно только рыхление почвы без удобрений позволило повысить количество сапротрофных бактерий до $120 \cdot 10^4$ тыс. кл/г.

Численность углеводородоокисляющих бактерий в загрязненной почве в начале эксперимента не превышала $37,2 \cdot 10^4$ кл/г, а к концу третьего сезона проведения работ многократно увеличилась до $46-52 \cdot 10^6$ кл/г в варианте с внесением удобрения «Бамил». Максимальный рост числа почвенных бактерий наблюдался при использовании органических удобрений «Бамил» и «Омуг» совместно с минеральным удобрением. При этом количество углеводородоокисляющих бактерий почти в три раза выше, чем сапротрофных бактерий, что способствует более интенсивному окислению углеводородов и очищению почвы. Рыхлением почвы без внесения мелиорантов также удалось добиться значительного роста бактерий, и в большей степени — углеводородоокисляющих, за счет улучшения водно-воздушного режима почвы. Рыхление является одним из основных приемов при восстановлении нефтезагрязненных почв, не требующим больших материальных затрат.

Средняя численность микромицетов в загрязненной почве была не более $2-3 \cdot 10^3$ КОЕ/г. В варианте с внесением удобрения «Бамил» произошло достоверное увеличение количества почвенных микромицетов до $16,8-60,1 \cdot 10^3$ КОЕ/г. Наибольший эффект на рост микромицетов оказало органическое удобрение «Бамил», в меньшей степени — «Омуг» и минеральное удобрение.

Хорошим показателем биологической активности почвы является ее ферментативная активность. Для этих целей была определена активность трех гидролитических ферментов (инвертазы, уреазы, фосфатазы) и одного окислительно-восстановительного (дегидрогеназы). Инвертаза гидролизует сахарозу на глюкозу и фруктозу и является одним из ферментов, характеризующих биологическую активность почв. Уреаза катализирует гидролиз мочевины, образующейся в почве в процессе превращения белков и нуклеиновых кислот, до аммиака, который служит источником азотного питания для высших растений. Активность фосфатаз характеризует процессы биохимической мобилизации органического фосфора почвы, способствуя доступности фосфорорганических соединений для растений. Дегидрогеназы катализируют реакцию отщепления водорода от различных углеводов, органических кислот, спиртов и других соединений. В почве, загрязненной нефтепродуктами, этот тип ферментов катализирует дегидрирование углеводов, а его активность характеризует интенсивность биологического разложения поллютанта. Использование методов биостимуляции привело к росту активности всех исследуемых ферментов, за исключением фосфатазы.

Положительное влияние оказал метод биостимуляции и на содержание углеводов в загрязненной почве. Исходное содержание нефтяных углеводов в начале эксперимента составляло 64010–80440 мг/кг. В конце четвертого вегетационного периода содержание углеводов снизилось на 70–79 % при внесении минеральных и органических удобрений.

В качестве растений для посева на загрязненные участки с целью восстановления почвы была выбрана овсяница луговая, так как в исследованиях, проведенных ранее, она проявила хорошую устойчивость к загрязнению почв углеводородами, она также является адаптированным к условиям Севера многолетним растением и образует ползущие корневища [Евдокимова и др., 2007; Евдокимова и др., 2009]. Норму посева увеличили в

2 раза — 44 кг/га, или 4,4 г/м². Посев проводили во все опытные варианты (рис. 9). Растения всошли, но были сильно угнетены, высота проростков не превышала 5 см, цвет бледно-зеленый, желтый. Кроме того, зеленая биомасса привлекала животных, которые объедали молодые всходы (рис. 10–11).

Наблюдения за растениями были продолжены в 2015 г. (рис. 12).

Также было отмечено развитие зеленых мхов и расселение овсяницы за пределы опытного участка (рис. 13).



Рис. 9. Посев овсяницы луговой на площадках на юго-восточном (А) и западном (Б) склонах, 17.06.2014 (фото В. Мязина)



Рис. 10. Общий вид площадок на юго-восточном (А) и западном (Б) склонах с посевами овсяницы луговой, 18.09.2014:

1 — без обработки; 2 — минеральные удобрения; 3 — «Бамил»;
4 — «Омуг» (фото В. Мязина)



Рис. 11. Состояние овсяницы луговой на загрязненных участках (фото В. Мязина)



Рис. 12. Общий вид площадок на юго-восточном (А) и западном (Б) склонах с посевами овсяницы луговой, 29.09.2015:

1 — без обработки; 2 — минеральные удобрения; 3 — «Бамил»;
4 — «Омуз» (фото В. Мязина)

Состояние участков через пять лет после завершения полевого эксперимента показало, что токсичность почвы в результате биологической очистки существенно снизилась. Площадки, где использовали органические и минеральные удобрения, активно зарастают злаками и мхами, в то время как на площадках без внесения мелиорантов растений нет или очень мало (рис. 14).



Рис. 13. Распространение мхов на площадке на юго-восточном склоне (А) и расселение овсяницы луговой за пределы площадки на западном склоне (Б), 29.09.2015 (фото В. Мязина)



Рис. 14. Общий вид площадок на юго-восточном (А) и западном (Б) склонах с посевами овсяницы луговой, 30.06.2021: 1 — без обработки; 2 — минеральные удобрения; 3 — «Бамил»; 4 — «Омуз» (фото В. Мязина)

Для оценки эффективности исследуемых способов биоремедиации применяли интегральный показатель биологического состояния почвы (ИПБС) и интегральный коэффициент биологической активности почвы (ИКБАП).

Для расчета ИПБС значение показателя для незагрязненной почвы принимали за 100 %, а значение показателя в вариантах опыта выражали в процентах от контроля. Для каждого варианта опыта определяли среднее

значение всех показателей и получали величину ИПБС, выраженную в процентах (рис. 15, А).

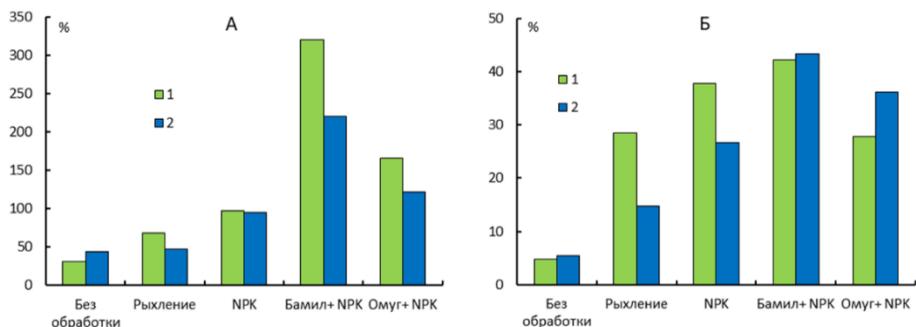


Рис. 15. Значения ИПБС (А) и ИКБАП (Б) для различных способов биоремедиации нефтезагрязненной почвы на площадках на юго-восточном (1) и западном (2) склонах

Интегральный коэффициент БАП учитывает остаточное содержание углеводов в исследуемой почве, что позволяет более объективно провести оценку эффективности биоремедиации в зависимости от степени загрязнения. При расчете коэффициента БАП фоновое значение показателя в незагрязненной почве принимали за 100 % и по отношению к нему в процентах выражали значение этого показателя в других вариантах, после чего определяли среднее значение выбранных показателей для каждого варианта. Полученное значение делили на остаточное содержание нефтепродуктов в почве, выраженное в процентах, получая коэффициент БАП (см. рис. 15, Б).

Результаты оценки эффективности способов биоремедиации показали, что наибольшее положительное влияние на биологическое состояние загрязненных грунтов оказало внесение минеральных удобрений совместно с биоудобрением «Бамил». Полученные результаты подтверждают сделанные ранее выводы об эффективности применения удобрений, в том числе минеральных, для восстановления нефтезагрязненных почв в условиях Севера.

Несмотря на сложные условия (субарктический климат, расположение загрязненных территорий на склонах горы и высокая степень деградации почвы), возможно успешное проведение

восстановительных работ с использованием биостимуляции. За три года содержание углеводов на отдельных участках снизилось на 75–79 %. Внесение минеральных и органических удобрений позволило увеличить содержание органического углерода, азота и подвижных фосфатов, привело к росту численности почвенных бактерий и микромицетов. Именно эти показатели — содержание органического вещества и азота в почве, величина активной микробной биомассы — характеризуют биогенность почвы, ее устойчивость к загрязнению и способность к самовосстановлению. Наибольший рост биологической активности был отмечен при использовании минерального удобрения совместно с биоудобрением «Бамил». Большую роль в процессе восстановления играет рыхление почвы, что улучшает водно-воздушный режим и способствует протеканию процессов окисления органических соединений, в том числе углеводов и продуктов их разложения.

Сорбционно-биологическая очистка и восстановление почв и грунтов, загрязненных нефтепродуктами (старое загрязнение)

Применение метода биоремедиации не всегда дает хорошие результаты, особенно в арктических и субарктических условиях. Основной причиной неэффективности биоремедиации в Арктике и Субарктике является низкая биологическая активность почв, обусловленная неблагоприятными температурно-трофическими условиями. Кроме того, высокомолекулярные углеводороды характеризуются низкой биодоступностью для большинства микроорганизмов. Решением этой проблемы может стать технология сорбционно-биологической обработки почв, основанная на применении различных сорбентов [Чухарева, Шишмина, 2012; Mahtab et al., 2014; Vandura et al., 2017]. Применение сорбентов ускоряет процессы очистки и восстановления загрязненных территорий, тем самым расширяя возможности биологической очистки. Сорбенты служат источником азота и фосфора и местом локализации микроорганизмов-деструкторов, повышают влагоемкость и аэрацию почв [Назарко и др., 2006]. Исследования, проведенные ранее в Центральном регионе России, позволили создать эффективный способ сорбционно-биологической очистки почв, загрязненных органическими загрязнителями [Vasilyeva et al., 2003; Vasilyeva et al., 2006; Яценко и др., 2014; Васильева, Стрижакова, 2008; Васильева и др., 2012]. Использование гранулированного активированного угля (ГАУ) ускоряет процессы биоремедиации почв, загрязненных дизельным топливом,

отработанным моторным маслом и нефтью [Васильева и др., 2013; Semenyuk et al., 2014]. Также в лабораторных условиях была показана эффективность сорбционно-биологической очистки загрязненных почв Мурманской области [Мязин и др., 2020]. Внесение в почву оптимальных доз сорбентов создает благоприятные условия для активизации местных или специально интродуцированных микроорганизмов-деструкторов.

Описываемые полевые исследования проводили в Печенгском районе на северо-западе Мурманской области, в районе горы Каскама, где ранее уже были заложены мониторинговые площадки для оценки эффективности различных приемов биологической очистки и восстановления загрязненных почв. В результате длительного антропогенного воздействия на данной территории образовался загрязненный участок площадью около 0,1 га (рис. 16). Поверхность загрязненного участка лишена органогенного горизонта и представлена песчаной фракцией с большим количеством каменистых включений (рис. 17). Плотность почвы 1300 кг/м³, содержание органического углерода в слое 0–7 см 4,47–5,43 %. Исходное содержание углеводов в загрязненной почве на разных участках составляло от 9 385 до 46 143 мг/кг.



Рис. 16. Загрязненный участок (фото В. Мязина)

В качестве сорбентов использовали ГАУ марки ВСК и нейтрализованный торф. ГАУ с размером гранул 2–3 мм состоит из углерода

на 87–97 %, а остальное представлено кислород- и серосодержащими высокомолекулярными соединениями, металлами и др. Удельная поверхность активированного угля составляет 550–2400 м²/г, сорбционная емкость по углеводородам 200–980 г/кг. Органический сорбент (торф фрезерованный) низкой степени разложения (не более 35 %), массовая доля влаги не более 65 %, рН_{КС1} не менее 5,2, содержание органического вещества не менее 70 %.

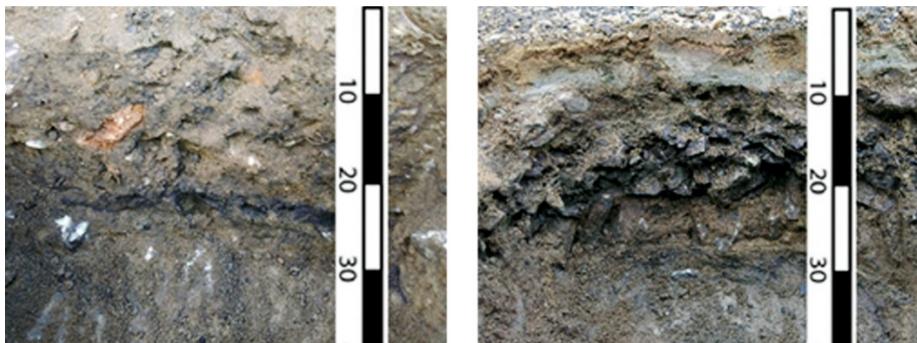


Рис. 17. Почвенный профиль на загрязненном участке (фото В. Мязина)

В полевом опыте использовали ассоциации углеводородоксиляющих микроорганизмов (УОМ), состоящие из углеводородоксиляющих микромицетов и бактерий, ранее выделенных из почв Кольского полуострова. В лабораторном эксперименте была исследована нефтедеградирующая активность 81 штамма грибов из 30 родов и активность бактерий. Наиболее активными штаммами грибов оказались *Penicillium canescens* st. 1, *P. commune*, *P. ochrochloron*, *P. restrict*, *P. simplicissimum* st. 1). Для создания микробиологического препарата использовали активные штаммы грибов (*P. commune*, *P. simplicissimum* st. 1, *Penicillium canescens* st. 1) и углеводородоксиляющие бактерии (*Microbacterium paraoxydans*, *Pseudomonas fluorescens*, *P. baetica*, *P. putida*) [Evdokimova et al., 2012; Kornejkova et al., 2019].

Для активации аборигенных, разлагающих нефть микроорганизмов и устранения дефицита питательных веществ на все участки, кроме контрольного, вносили комплексное минеральное удобрение (16 % N, 16 % P₂O₅ и 16 % K₂O) и доломитовую муку (содержание CaCO₃ 80 %). Количество

удобрения рассчитывали на основе содержания углеводов в почве (соотношение С : N не более 100 : 1), а количество доломитовой муки рассчитывали на основе исходного значения рН. После добавления удобрения и доломитовой муки в различные варианты полевого эксперимента добавляли ассоциацию углеводородокисляющих бактерий в количестве 2 л/м², ГАУ в количестве 1 и 3 мас. % и торф в количестве 16 л/м². Верхний слой почвы во всех вариантах рыхлили на глубину 7–10 см. Наблюдения за участками проводили в течение 15 мес.

Полученные результаты показали, что на начальной стадии очистки биологическая система нестабильна. Биохимические процессы в загрязненном субстрате имеют низкую эффективность и разнонаправлены. Кроме того, условия окружающей среды оказывают большое влияние на численность УОМ. Наряду с рН, влажность оказывает сильное влияние на биохимические процессы в загрязненных почвах. Активность микроорганизмов снижается при низкой влажности, несмотря на то что температура близка к оптимальной, что характерно для почв с легким гранулометрическим составом и низким содержанием органики.

В данном исследовании улучшение водного и воздушного режимов (только разрыхление верхнего слоя почвы) в процессе очистки загрязненных участков было достаточно эффективным. Содержание углеводов в почве снизилось на 30 % за период наблюдения. Количество УОМ и активность почвенной дегидрогеназы существенно не изменились, оставаясь на очень низком уровне, что указывает преимущественно на физическую и химическую деградацию углеводов.

Биостимуляция (использование минерального удобрения вместе с доломитовой мукой) увеличила скорость деструкции углеводов: их содержание в почве снизилось в среднем на 47 % за 15 месяцев. Наблюдалось увеличение количества углеводородокисляющих микромицетов в 6–7 раз, бактерий — в 17 раз, а активность почвенной дегидрогеназы увеличилась в 2–6 раз, что свидетельствует о биохимическом окислении углеводов.

Биоаугментация (использование ассоциации УОМ) снизила содержание углеводов в почве на 45 % за 15 мес., что сопоставимо с результатами, полученными при биостимуляции. При этом значительное увеличение количества микроорганизмов происходит только после повторного введения ассоциаций микроорганизмов через один год.

Сорбционно-биологическая очистка загрязненных участков с использованием активированного угля также ускорила биохимическое

окисление углеводов (было отмечено увеличение численности микроорганизмов и активности дегидрогеназы), за счет чего удалось снизить содержание углеводов на 47–53 %. Эффективность этого метода достоверно не превышает эффективность биостимуляции, но увеличивает стоимость очистки. Положительный эффект от внесения сорбентов в сильно загрязненные почвы и грунты обусловлен обратимой сорбцией токсичных углеводов и их метаболитов, что позволяет снизить фитотоксичность.



Рис. 18. Загрязненные участки через два года после начала очистки с внесением торфа (вверху) и гранулированного активированного угля (внизу) (фото В. Мязина)

Лучшие результаты были получены при сорбционно-биологической очистке с использованием торфа. Содержание углеводов на участках уменьшилось в среднем на 65 %, что в 2,5 раза эффективнее, чем в варианте без очистки. В этом же варианте была отмечена максимальная численность УОМ и активность почвенной дегидрогеназы (рис. 18).

Сорбционно-биологический метод оказался более эффективным, чем другие методы, по результатам первого года наблюдения. Несомненным преимуществом этого метода является способность микроорганизмов на сорбенте окислять углеводороды и органические соединения других классов даже в холодный период.

Исследования показали, что в результате биологической очистки разложение углеводов ускоряется в 1,7 и 2,9 раза. Так, при сорбционно-биологической очистке с использованием торфа почти полная очистка почвы произойдет за 5 лет, а без очистки — за 16 лет (табл. 2).

Таблица 2

Время практически полной деградации (T_{99}) и деградации до ОДК (T_{APC} , 700 мг/кг) углеводов нефти в почве

Способ очистки	Константа скорости разложения углеводов	T_{APC} , сут	T_{99} , сут
Рыхление почвы	0,00079	4892	5816
Биостимуляция (внесение минеральных удобрений)	0,00140	2699	3298
Биоаугментация (внесение ассоциации УОМ)	0,00135	2428	3420
Сорбционно-биологическая очистка (ГАУ)	0,00168	2104	2746
Сорбционно-биологическая очистка (торф)	0,00235	1479	1960

Таким образом, как в лабораторных, так и в полевых условиях было показано, что методы биологической очистки (биостимуляция, биоаугментация и сорбционно-биологическая очистка) могут быть использованы для очистки и восстановления загрязненных участков в АЗРФ, несмотря на сложные климатические условия и высокую степень деградации

почв. Общие рекомендации по использованию методов биологической очистки и восстановления почв и грунтов на территориях накопленного экологического ущерба в АЗРФ представлены в приложении II.

Для почв и грунтов легкого гранулометрического состава с низким содержанием органического вещества, но с достаточно высокими значениями температуры сорбционно-биологическая обработка с использованием торфа или ГАУ может быть эффективным методом биологической очистки. При таком подходе сорбент будет не только связывать углеводороды и их токсичные метаболиты, но и служить носителем для УОМ и предотвращать вымывание питательных веществ из почвы. Внесение сорбентов (в основном торфа) увеличивает влагоемкость обработанной почвы, что приводит к повышению активности УОМ и эффективности биологической очистки без необходимости периодического полива участка.

Для очистки и восстановления нефтезагрязненных почв с высоким содержанием органических веществ и благоприятным режимом увлажнения предпочтительным способом биологической очистки будет биостимуляция с внесением минеральных удобрений и извести. В данном случае внесение органических или минеральных сорбентов приведет к удорожанию очистки, но не окажет дополнительного положительного влияния.

Использование ассоциации УОМ, созданной на основе бактерий и микроскопических грибов, которые являются активными деструкторами нефтепродуктов, оказалось менее эффективным в этих условиях и может быть заменено методами биостимуляции, что снизит затраты на очистку территории.

Использование рассмотренных методов биологической очистки и восстановления загрязненных почв и грунтов способствует улучшению экологического состояния загрязненной территории и постепенному восстановлению ее биоразнообразия.

Сорбционно-биологическая очистка и восстановление нефтезагрязненных прибрежных почв и грунтов арктических морей (свежее загрязнение)

Для ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов и очистки прибрежной зоны традиционно используют различные механические,

термические и химические методы. Однако их применение может привести к ещё большему ущербу экосистемам.

Избежать негативных последствий возможно с помощью биологической очистки, основанной на естественных процессах самовосстановления окружающей среды. Применение методов биоремедиации особенно актуально для прибрежной зоны, где толщина нефтяной пленки не позволяет применять механические, термические и химические методы и существует риск необратимого изменения экосистемы.

Биологические методы чаще используются на заключительном этапе, после ликвидации аварийного разлива и сбора нефти, а в отдельных случаях как единственный способ очистки.

Однако биологические методы имеют ряд недостатков, ограничивающих их применение в условиях Арктики: процесс удаления нефти относительно медленный; эффективность очистки зависит от природно-климатических факторов региона, количества разлитой нефти и типа береговой линии.

В течение нескольких лет сотрудники ИППЭС КНЦ РАН изучали возможность применения биологических методов очистки побережья в Арктике и повышение их эффективности в условиях низких температур. В ходе исследований из местных (аборигенных) микроорганизмов были выделены те, которые проявляют наибольшую активность в деструкции углеводов, изучалась возможность использования сорбентов в качестве центров аккумуляции этих микроорганизмов, подбирались местные растения-фитомелиранты, способные создавать благоприятную среду для микроорганизмов и повышать эстетическую привлекательность прибрежных участков после очистки.

Микробиологические процессы арктических территорий, в силу климатических особенностей, отличаются низкой активностью. Поэтому в этих районах эффективное самоочищение прибрежных зон от нефтяных загрязнений без стимулирования процессов биологической деградации невозможно. Для этого из образцов морской воды, грунта и прибрежных почв побережья Баренцева моря выделили и протестировали на углеводородную активность 11 штаммов бактерий и 29 штаммов микроскопических грибов. Из них наибольшей нефтеокисляющей активностью обладали: 2 штамма бактерий (*Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas putida*); 5 штаммов грибов (*Tolypocladium inflatum*, *Meyerozima*

guilliermondii, *Penicillium janthinellum*, *Penicillium simplicissimum*, *Penicillium canescens*).

В лабораторных условиях отобранные бактерии снизили содержание нефтепродуктов в воде за трое суток на 30–46 %, а микроскопические грибы за 14 сут — на 76 % относительно образцов, не содержащих нефтеокисляющие микроорганизмы (рис. 19).

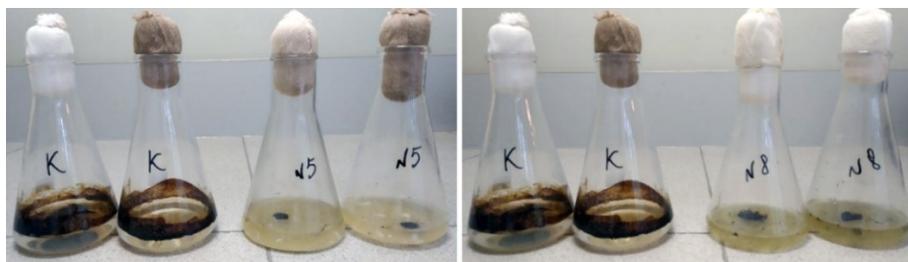


Рис. 19. Результаты лабораторного опыта по деструкции нефти микроскопическими грибами в течение 14 сут:

К — контроль без микромицетов; №№ 5, 8 — с внесением активных штаммов микромицетов (фото В. Мязина)

Наиболее активные бактерии и микроскопические грибы объединили в ассоциации. При этом эффективность окисления нефтепродуктов повысилась до 98 % в жидкой среде при +27 °С за 14 сут.

На основе полученных ассоциаций были созданы две активные ассоциации микроорганизмов: 1) ассоциация микроскопических грибов (*Tolypocladium inflatum* и *Meyerozyma guilliermondii*); 2) ассоциация микроскопических грибов (*Penicillium janthinellum*, *Penicillium simplicissimum*) и бактерий (*Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas putida*).

В качестве сорбентов были использованы: 1) ГАУ марки ГАУ ВСК с размером гранул 2–3 мм; 2) вермикулит термоактивированный — минерал из группы гидрослюд, имеющих слоистую структуру; 3) торф верховой нейтрализованный — органический сорбент, фрезерный торф верхового типа низкой степени разложения (не более 35 %).

Для оценки эффективности сорбционно-биологической очистки загрязненных субстратов был проведен ряд лабораторных экспериментов, каждый длительностью три месяца. В целом лабораторные исследования длились более 1,5 лет. Для проведения лабораторных исследований брали

прибрежную почву и песок литорали на побережье Печенгского залива Баренцева моря. В качестве загрязняющего вещества использовали водонефтяную эмульсию (соотношение нефть : вода = 1 : 10), приготовленную из нефти трех типов: легкой, средней и тяжелой. Перед приготовлением эмульсии из нефти удаляли летучие компоненты путем ее нагрева. После данной обработки нефть по своим характеристикам соответствовала нефти, находящейся на поверхности воды в течение двух месяцев. Для приготовления водонефтяной эмульсии использовали морскую воду с соленостью 22 ‰.

Водонефтяную эмульсию разных типов нефти вносили в почву и песок и перемешивали. Загрязненные субстраты раскладывали в контейнеры в количестве 200 г, после чего добавляли микробный препарат (плотность суспензии 10^7 кл/мл), сорбенты и минеральные удобрения (исходя из соотношения С : N : P : K в грунте — 70 : 1 : 0,5 : 1). Исследования проводили при постоянной температуре +10 °С, а почву и песок в контейнерах периодически увлажняли и перемешивали два раза в месяц.

Использование сорбентов совместно с ассоциацией нефтеокисляющих микроорганизмов ускорило очистку прибрежного песка, загрязненного эмульсией различных типов нефти, на 38–55 %. Наиболее эффективным стала сорбционно-биологическая очистка песчаных субстратов с использованием ГАУ. Предварительное использование диспергентов достоверно не влияет на эффективность биостимуляции и биоаугментации, но снижает эффективность сорбционно-биологической очистки при загрязнении легкой нефтью (табл. 3).

Использование сорбентов совместно с ассоциацией УОМ ускорило очистку прибрежной почвы на 31–42 %, но только при загрязнении эмульсией легкой нефти. При этом наиболее эффективно осуществляют деструкцию нефти препараты, содержащие бактерии и микромицеты (табл. 4).

Методы биоремедиации позволяют снизить содержание углеводов в морской воде при ее загрязнении легкой нефтью. Компоненты средней и тяжелой нефти не были подвержены микробиологическому окислению. В то же время обработка водонефтяной эмульсии диспергентом позволила более эффективно провести биологическую очистку морской воды при загрязнении всеми типами нефти (табл. 5).

Таблица 3

Эффективность биологических приемов очистки прибрежного песка

Способ очистки	Снижение количества углеводородов в загрязненном песке для различных типов нефти (без диспергентов / с диспергентами), %		
	Легкая	Средняя	Тяжелая
Обычные условия без очистки	9/10	5/19	0/15
Биостимуляция (внесения минеральных удобрений)	13/22	8/21	5/27
Биоаугментация (внесение ассоциации нефтеокисляющих микроорганизмов)	22/32	22/24	28/36
Сорбционно-биологическая очистка (добавление к ассоциации нефтеокисляющих микроорганизмов сорбентов)			
торф	51/28	51/45	45/48
ГАУ	60/33	51/44	55/54
вермикулит	47/27	49/49	44/44

Таблица 4

Эффективность биологических приемов очистки прибрежной почвы

Способ очистки	Снижение количества углеводородов в загрязненной почве для различных типов нефти (без диспергентов / с диспергентами), %		
	Легкая	Средняя	Тяжелая
Обычные условия без очистки	26/30	37/29	38/34
Биостимуляция (внесения минеральных удобрений)	31/39	41/45	37/35
Биоаугментация (внесение ассоциации нефтеокисляющих микроорганизмов)	43/45	36/36	36/38
Сорбционно-биологическая очистка (добавление к ассоциации нефтеокисляющих микроорганизмов сорбентов)			
торф	57/41	38/32	32/24
ГАУ	68/31	34/26	31/27
вермикулит	59/44	37/35	25/29

Таблица 5

Эффективность биологических приемов для очистки морской воды

Способ очистки	Снижение количества углеводородов в загрязненной воде для различных типов нефти (без диспергентов / с диспергентами), %		
	Легкая	Средняя	Тяжелая
Биостимуляция (внесения минеральных удобрений)	34/27	0/22	0/32
Биоаугментация (внесение ассоциации нефтеокисляющих микроорганизмов)			
на основе микромицетов	37/49	0/46	0/43
на основе микромицетов и бактерий	18/60	0/57	0/55

Применение метода сорбционно-биологической ремедиации позволяет сократить время, необходимое для очистки песчаных пляжей, в 2,0–5,5 раз при загрязнении всеми типами нефти, а прибрежных почв — в 3,2 раза при загрязнении легкой нефтью (табл. 6).

Таблица 6

Время практически полной деградации (T_{99}) углеводородов

Вариант	Константа скорости разложения углеводородов	T_{99} для разных типов нефти, сут		
		Легкая	Средняя	Тяжелая
<i>Песок</i>				
Без обработки	0,0015–0,0037	3033	1575	1256
Торф	0,0067–0,0079	581	584	684
ГАУ	0,0079–0,0101	455	579	525
Вермикулит	0,0064–0,0074	660	621	723
<i>Почва</i>				
Без обработки	0,0033–0,0054	1381	909	857
Торф	0,0043–0,0094	490	870	1076
ГАУ	0,0042–0,0126	365	982	1106
Вермикулит	0,0033–0,0098	471	889	1411

В то же время использование сорбционно-биологической очистки прибрежной почвы, загрязненной средней и тяжелой нефтью, не сокращает, а даже увеличивает время очистки. Полученные результаты подтверждают выводы об эффективности сорбционно-биологического метода очистки преимущественно песчаных субстратов, сделанные нами ранее на основе лабораторных [Мязин и др., 2020] и полевых [Myazin et al., 2021] исследований.

Оценка возможности вторичного загрязнения после биоремедиации

Для определения вероятности вторичного загрязнения территории в результате смыва нефти с почвы и песка были проведены лабораторные исследования, в ходе которых загрязненные субстраты после сорбционно-биологической очистки перемешивали с чистой морской водой в течение 30 мин, после чего определяли содержание нефтепродуктов в воде. Ту же процедуру проводили с чистой почвой и песком и с загрязненными субстратами без проведения биоремедиации.

Содержание углеводов в морской воде после перемешивания с чистым песком было ниже ПДК для водоемов рыбохозяйственного (0,050 мг/л) и хозяйственно-бытового (0,3 мг/л) назначения. Из загрязненного песка в воду перешло гораздо больше углеводов — до 0,429 мг. Экстракция углеводов из песка, очищенного сорбционно-биологическим методом, была близка к значениям, полученным для чистого песка (0,010–0,036 мг), за исключением варианта, загрязненного эмульсией тяжелой нефти (0,059–0,084 мг). Однако даже в случае с тяжелой нефтью после сорбционно-биологической очистки количество углеводов, вымываемых в воду, снизилось в несколько раз (рис. 20, А). Из загрязненной почвы в воду выделилось до 0,121 мг углеводов. Как и в случае с песком, экстракция углеводов из загрязненной почвы после проведения сорбционно-биологической очистки снизилась (см. рис. 20, Б). Для вариантов, загрязненных эмульсией легкой и средней нефти, полученные результаты были сопоставимы со значениями для чистой почвы (0,025–0,063 мг/л).

Использование сорбентов позволило избежать вторичного загрязнения благодаря прочному связыванию углеводов, что

характерно для гранулированного угля и термоактивированного вермикулита. В целом после сорбционно-биологической очистки вероятность вторичного загрязнения прибрежных территорий снизилась в несколько раз, что особенно актуально для песчаных субстратов.

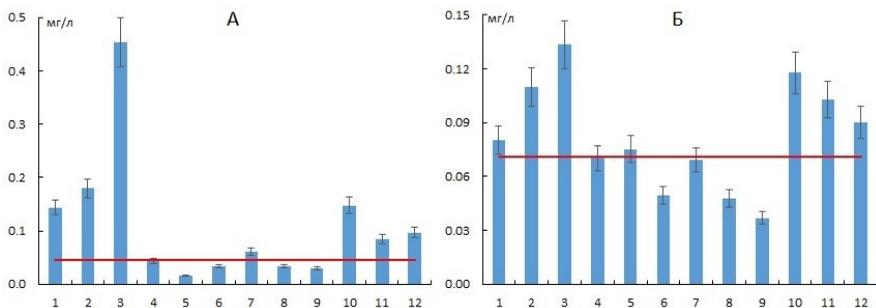


Рис. 20. Содержание углеводов в морской воде после их экстракции из загрязненного песка (А) и почвы (Б):

1 — легкая; 2 — средняя; 3 — тяжелая нефть; 4 — легкая нефть + торф; 5 — легкая нефть + ГАУ; 6 — легкая нефть + вермикулит; 7 — средняя нефть + торф; 8 — средняя нефть + ГАУ; 9 — средняя нефть + вермикулит; 10 — тяжелая нефть + торф; 11 — тяжелая нефть + ГАУ; 12 — тяжелая нефть + вермикулит; линией показано содержание углеводов в морской воде после их экстракции из чистых субстратов

Проведенные исследования показали, что наиболее подходящими растениями для фиторемедиации прибрежных участков арктических морей являются волоснец песчаный, овсяница и бескильница. Кроме того, для разных типов береговых линий можно использовать такие растения, как лебеда головатая, триостренник болотный, осоки, чина алеутская, кипрей узколистый.

Результаты этой работы, а также других лабораторных и полевых исследований позволили разработать Рекомендации по очистке прибрежных территорий в Евро-Арктическом регионе после загрязнения нефтепродуктами (приложение III).

Предлагаемая комплексная биотехнология включает в себя методы биоремедиации, фитомелиорации и сорбционной очистки. Элементы биотехнологии могут применяться как отдельно, так и совместно.

Биоаугментация — использование двух биопрепаратов нефтеокисляющего действия: на основе микромицетов (*Tolypocladium inflatum*, *Meyerozyma guilliermondii*) и на основе микромицетов и бактерий (*Penicillium janthinellum*, *Penicillium simplicissimum*, *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas putida*). Количество вносимого биопрепарата (плотность суспензии 10^7 кл/мл) — 20 л/1 т загрязненного субстрата. Биопрепарат можно использовать в виде суспензии отдельно или совместно с раствором удобрений в нужной концентрации. Необходимость использования биопрепаратов определяется по результатам анализа численности нефтеокисляющих микроорганизмов и активности ферментов. Рекомендуется повторное внесение биопрепарата при снижении численности нефтеокисляющих микроорганизмов и активности ферментов. Выбор биопрепарата (грибной или бактериально-грибной) будет зависеть от свойств субстрата (количества и качества органического вещества, значения pH, структуры сложившегося микробного сообщества).

Биостимуляция — внесение минеральных удобрений из расчета соотношения С : N : P : K в грунте 70 : 1 : 0,5 : 1. Удобрения вносят в виде гранул для постепенного растворения или совместно с биопрепаратом в растворенном виде. Биостимуляция может применяться как самостоятельный метод очистки, если результаты анализа показали достаточно высокую численность нефтеокисляющих микроорганизмов в загрязненном субстрате.

Сорбционно-биологическая очистка — использование минеральных и органических сорбентов как совместно с биопрепаратом, так и отдельно. Сорбенты вносят в следующих количествах (% от массы загрязненного субстрата): торф — 5, ГАУ — 1, термоактивированный вермикулит — 0,5. Внесение сорбентов можно осуществлять ручным способом или с помощью распылителя. Сорбенты являются центрами наибольшей концентрации микроорганизмов, препятствуют распространению углеводородов, улучшают состояние загрязненного субстрата за счет оптимизации водно-воздушного режима. После использования сорбенты не извлекают из грунта. Использование сорбентов (особенно угля) способствует снижению фитотоксичности грунта, которая возникает на начальных этапах очистки.

Биотехнология может применяться как единственный способ очистки на уязвимых участках, где использование традиционных

способов может нанести большой ущерб окружающей среде, а также на заключительном этапе очистки прибрежных территорий (после удаления нефти смыванием или физическим сбором). Предварительное использование диспергентов не влияет на эффективность биостимуляции и биоаугментации, но снижает эффективность сорбционно-биологической очистки при загрязнении легкой нефтью.

Биотехнология может применяться практически на всех типах берегов за исключением скал, искусственных бетонных и стальных сооружений. Использование в биопрепарате аборигенных нефтеокисляющих микроорганизмов, характерных для большинства прибрежных субстратов Евро-Арктического региона, исключает возможность необратимого изменения структуры микробного сообщества на данных участках, а адаптация этих микроорганизмов к экстремальным климатическим условиям позволяет с высокой эффективностью проводить биологическую очистку в Арктике и Субарктике.

Сорбционно-биологический метод биоремедиации позволяет сократить время очистки прибрежных территорий от нефти в 2,0–5,5 раз при загрязнении песка всеми типами нефти и в 3,2 раза при загрязнении почвы легкой нефтью.

Достоинствами предлагаемой биотехнологии являются: естественные механизмы очистки; слабое воздействие на объекты окружающей среды, что позволяет проводить очистку без нанесения ущерба прибрежным экосистемам; относительно низкие затраты и требования к квалификации персонала.

ТЕХНОЛОГИЯ ФИТОРЕМЕДИАЦИИ КАК ЭТАП БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОЧВ ПОСЛЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТАМИ

Фиторемедиация — посев устойчивых к загрязнению растений — является одним из приемов восстановления нефтезагрязненных почв. За счёт благоприятных условий, создаваемых в ризосфере, ускоряется процесс биологической деструкции углеводов.

В ходе исследований была проведена оценка возможности использования растений для проведения этапа фиторемедиации после биологической очистки [Мязин, Редькина, 2016]. Среди них наиболее устойчивыми оказались двукисточник тростниковидный, овсяница луговая, волоснец песчаный и рожь посевная. В полевом эксперименте через год после начала биологической очистки на загрязненные участки был произведен посев семян двукисточника и овсяницы. Перед посевом семян содержание нефтепродуктов в почве составляло от 9670 до 18530 мг/кг. Для оптимизации питательного режима в начале каждого вегетационного периода в почву вносили минеральные удобрения.

Учет морфологических показателей растений в конце первого вегетационного периода после посева показал, что биомасса растений в вариантах с внесением удобрений и бактериального препарата была ниже, чем в чистой почве. На участке без проведения восстановительных работ были отмечены единичные всходы двукисточника, растения были сильно угнетены и в дальнейшем погибли (рис. 21).

В конце второго вегетационного периода после посева биомасса двукисточника в вариантах с внесением удобрений и бактериального препарата превзошла значения, характерные для чистой почвы, а высота растений не отличалась от контрольных значений. Биомасса овсяницы превышала контрольные значения в среднем на 15 %, а высота растений была ниже. На участке без проведения восстановительных работ были отмечены единичные всходы двукисточника и овсяницы, растения были сильно угнетены, но сохранили способность к росту (рис. 22).



Рис. 21. Состояние растений на опытных площадках в конце первого вегетационного периода (фото В. Мязина)



Рис. 22. Состояние растений на опытных площадках в конце второго вегетационного периода (фото В. Мязина)

В конце третьего сезона фиторемедиации биомасса двукисточника в вариантах с внесением мелиорантов превышала контрольные значения на незагрязненной площадке на 50 %. Высота растений достоверно не отличалась от контрольного варианта. Биомасса и высота овсяницы были все еще немного ниже, чем в чистой почве. На участке без проведения восстановительных работ биомасса двукисточника и овсяницы была в три раза меньше контрольных значений, в то время как высота растений сопоставима с чистым контролем (рис. 23).



Рис. 23. Состояние растений на опытных площадках в конце третьего вегетационного периода (фото В. Мязина)

Учет исследуемых показателей в конце четвертого года наблюдений показал, что биомасса двукисточника превышала значения контрольного варианта в 2,5 раза. Биомасса и высота овсяницы достоверно не отличались от контрольных. На участке без проведения мероприятий по очистке почвы к концу четвертого вегетационного периода биомасса и высота двукисточника достигли контрольных значений. Биомасса овсяницы была в два раза ниже контрольных показателей (рис. 24).



Рис. 24. Состояние растений на опытных площадках в конце четвертого вегетационного периода (фото В. Мязина)

Стоит отметить, что остаточное содержание углеводов в почве более 10 000 мг/кг привело к существенному снижению эффективности проведения фиторемедиации. Большинство всходов двукосточника и овсяницы погибли к концу первого вегетационного периода. Появление жизнеспособных растений на загрязненном участке без предварительной обработки мелиорантами было отмечено на второй год проведения фиторемедиации. Через год биомасса растений на этом участке достигла трети от контрольных значений, а в конце четвертого года биомасса двукосточника достоверно не отличалась от показателей для чистой почвы. В то же время биомасса овсяницы все еще была в два раза ниже контрольных значений (рис. 25).

В результате проведенного исследования можно сказать, что двукосточник и овсяница показали высокую устойчивость к загрязнению почвы нефтепродуктами. При этом двукосточник оказался менее чувствительным к загрязнению и в данных условиях обладал в два раза большей биомассой и высотой растений, по сравнению с овсяницей, что дает ему преимущество при проведении фиторемедиации (рис. 26).

Также было установлено, что фиторемедиацию с посевом вышеупомянутых злаков целесообразно проводить при остаточном содержании углеводов в почве не более 10 г/кг и использовать минеральные удобрения для снижения дефицита питательных элементов.



Рис. 25. Зарастание участка с высоким уровнем загрязнения (более 10000 мг/кг) без проведения предварительной биологической очистки (фото В. Мязина)

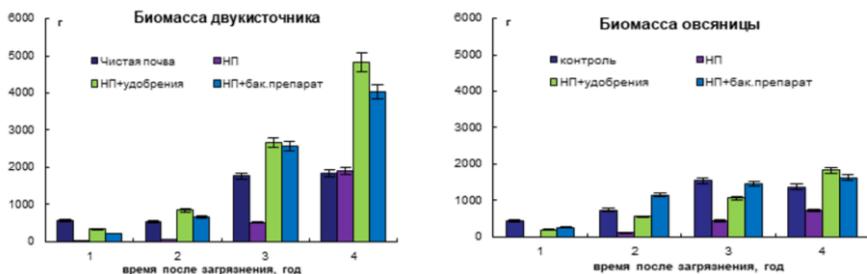


Рис. 26. Изменение биомассы растений в ходе эксперимента: НП — загрязненная почва без обработки; НП + удобрения — загрязненная почва с внесением минеральных и органических удобрений; НП + бак. препарат — загрязненная почва с внесением минеральных удобрений и бактериального препарата

КОМПЛЕКСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ С ПРИМЕНЕНИЕМ БИОПРЕПАРАТОВ — ДЕСТРУКТОРОВ УГЛЕВОДОРОДОВ И УСКОРЕННОГО ФОРМИРОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

Цель исследований заключались в оценке комплексного использования гидропонных экспресс-технологий создания искусственных фитоценозов и биопрепаратов — деструкторов углеводов для формирования искусственных фитоценозов на участках, загрязненных разными видами нефтепродуктов в условиях Мурманской области.

Для решения этих задач были заложены три полевых эксперимента. Они проводились на специализированном испытательном полигоне ООО «ЭкоЦентр», расположенном на территории полигона твердых бытовых отходов ООО «ОРКО-ИНВЕСТ» в поселке Дровяное близ города Мурманска. Полигон представляет собой экспериментальную площадку, разделенную на 87 ячеек, выполненных в виде деревянных коробов, внутренняя поверхность которых гидроизолирована технической пленкой (рис. 27). Высота ячеек — 0,5 м, площадь — 1 м². В ячейки внесена почва (тундровая иллювиально-гумусовая оподзоленная), загрязненная сырой нефтью и разными видами нефтепродуктов — мазутом и дизельным топливом в концентрации 3,5–4,7 %. Высота загрузки ячеек техногенным субстратом — 0,4 м.



Рис. 27. Общий вид экспериментального полигона на территории ООО «ОРКО-ИНВЕСТ» (фото Л. Ивановой)

Для формирования растительного покрова применяли два ранее разработанных инновационных экспресс-способа создания растительного покрова [Патент № 2393665; International Application No: RU2010/000001].

Для выращивания высококачественного коврового травяно-дернового покрытия использовали смесь из пяти видов злаковых растений: тимофеевки луговой — 25 %, костреца безостого — 25 %, овсяницы красной — 20 %, райграса пастбищного — 20 %, мятлика лугового — 10 % и мелкофракционированного вермикулитового субстрата марки «Випон-2» [Иванова, Котельников, 2008]. Термовермикулит — местный природный почвозаменитель, получаемый методом электрообжига минерала вермикулита (Ковдорское месторождение, Мурманская область), в результате чего он приобретает ряд ценных свойств, в том числе высокую воздухо- и влагоемкость, и широко используется для гидропонного выращивания растений, способствует интенсивному росту и развитию растений на всех стадиях онтогенеза и тем самым ускоряет формирование искусственно создаваемых фитоценозов. Данный субстрат не является источником вторичного загрязнения и при этом усиливает очищающую способность создаваемой фитосистемы за счет своих сорбционных свойств [Иванова, 2002; Иванова, Котельников, 2006].

В надземной части ковровая дернина, выращенная на вермикулитовом субстрате, имела качественный травостой высотой $6,0 \pm 0,4$ см, плотностью сложения $2000,4 \pm 102,2$ побегов/дм²; в подземной — жизнеспособную «войлочную подушку» толщиной $2,0 \pm 0,3$ см из корней, всецело охватывающую односантиметровый слой термовермикулита.

При формировании фитоценоза вторым экспресс-способом прямого посева использовали травосмесь из костреца безостого и тимофеевки луговой — по 49 г/м², овсяницы красной — 42 г/м², дополнительно был высеян клевер луговой — по 5 г/м².

В качестве микроорганизмов — деструкторов нефти, интенсивно потребляющих углеводородные компоненты, применяли биопрепараты «Деворойл» (ДЕ), «Родер» (РО) и «Микрозим (tm) ПЕТРО ТРИТ» (М).

Опыт 1

В опыте 1 изучали возможность комплексного использования двух способов создания растительного покрова и двух биопрепаратов для ускоренного формирования устойчивых высококачественных фитоценозов на почвах, загрязненных нефтью и нефтепродуктами (исходное содержание нефтепродуктов 3,6–4,5 %).

Наблюдения показали, что через две недели после закладки опыта степень прирастания дернины в вариантах, загрязненных мазутом, составила более 70 % (30 %-й выпад пришелся в основном на края травяного ковра), а в вариантах, загрязненных нефтью, — всего 10 %. В то же время применение прямого посева в варианте с нефтью позволило всего за одну неделю сформировать высококачественный растительный покров со 100 %-м проективным покрытием и глубоким проникновением корневой системы в техногенный субстрат. Первые весенние наблюдения показали, что зимний выпад растений имел место во всех вариантах опыта. Позднее в сформированных травостоях отмечено интенсивное отрастание и развитие всех видов растений. Внешний вид сформированного растительного покрова и керны фитоценозов, созданных двумя экспресс-способами на участках, загрязненных разными видами нефтепродуктов с привнесением нефтеокисляющих микроорганизмов, в условиях экспериментальной площадки представлены в табл. 7 и на рисунках 28–32. Анализ полученных данных позволил заключить, что совместное использование гидропонных способов ускоренного создания растительного покрова и биопрепаратов «Деворойл», «Родер» и «Микрозим (tm) ПЕТРО ТРИТ» может быть рекомендовано для быстрого (в течение одного вегетационного периода) формирования на почвах, загрязненных мазутом, дизельным топливом и нефтью, устойчивых, высококачественных фитоценозов с заданным видовым составом.

Таблица 7

Качественные показатели фитоценозов в условиях экспериментальной площадки

Используемые нефтепродукты и биопрепараты	Показатель					
	Высота травостоя, см	Длина корней, см	Толщина дернины, см	Плотность травостоя, шт/дм ²	Возд.-сух. биомасса надз. части, г/дм ²	Проективное покрытие, %
<i>Способ рекультивации на основе использования готовой к укладке ковровой дернины</i>						
Мазут + «Деворойл»	48,0 ± 2,1	16,0 ± 1,1	11,5 ± 1,1	189 ± 12,1	8,6 ± 0,3	90 ± 1,2
Нефть + «Деворойл»	22,0 ± 1,0	20,0 ± 0,2	10,0 ± 0,3	233 ± 21,1	3,1 ± 0,1	50 ± 0,5
Дизельное топливо + «Родер»	57,0 ± 1,4	25,0 ± 0,4	12,0 ± 0,4	417 ± 13,2	15,1 ± 0,1	100 ± 9,1
Нефть + «Родер»	65,0 ± 2,0	27,0 ± 1,0	11,0 ± 0,4	228 ± 12,3	18,6 ± 0,1	85 ± 1,2
<i>Способ рекультивации методом прямого посева</i>						
Нефть + «Родер»	30,0 ± 1,5	20,0 ± 0,3	9,0 ± 0,2	503 ± 32,0	8,0 ± 0,2	90 ± 1,1



Рис. 28. Травостой (слева) и дернина (справа), сформированные с использованием коврового покрытия в варианте, загрязненном мазутом, с применением препарата «Деворойл» (фото Л. Ивановой)



Рис. 29. Травостой (слева) и дернина (справа), сформированные с использованием коврового покрытия в варианте, загрязненном нефтью, с применением препарата «Деворойл» (фото Л. Ивановой)

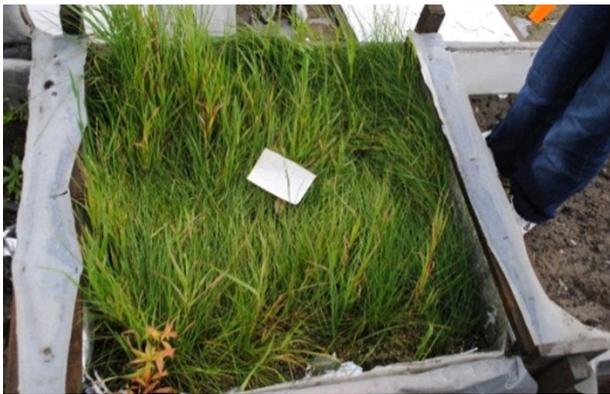


Рис. 30. Травостой (слева) и дернина (справа), сформированные с использованием коврового покрытия в варианте, загрязненном дизельным топливом, с применением препарата «Родер» (фото Л. Ивановой)



Рис. 31. Травостой (слева) и дернина (справа), сформированные с использованием коврового покрытия в варианте, загрязненном нефтью, с применением препарата «Родер» (фото Л. Ивановой)



Рис. 32. Травостой (слева) и дернина (справа), сформированные с использованием прямого посева в варианте, загрязненном нефтью, с применением препарата «Родер» (фото Л. Ивановой)

Опыт 2

В эксперименте для создания растительного покрова на участках, загрязненных нефтью и мазутом (содержание НП 4,7 %), применяли экспресс-способ прямого посева. Изучали влияние биопрепарата — деструктора углеводов «Микрозим» на качество формируемого растительного покрова. Во всех вариантах опыта отмечено быстрое и дружное прорастание семян. Уже на шестой день эксперимента был сформирован плотный зеленый растительный покров из проростков высотой 5–7 см, в котором были представлены все использованные виды трав, среди них лидировала тимофеевка луговая. Анализ полученных результатов показал, что использованный в эксперименте биопрепарат «Микрозим» способствует существенному улучшению качества сформированного в эксперименте растительного покрова (табл. 8, рисунки 33–36). Применение способа прямого посева семян в вермикулитовый субстрат, нанесенный на нефтезагрязненную минеральную почву, позволяет в условиях Севера в течение одного вегетационного периода формировать высококачественные фитоценозы с устойчивым к нефтезагрязнению видовым составом и проективным покрытием до 90 %, при котором не занятыми растительностью оставались лишь комки мазута, выступающие над поверхностью субстрата. Травостой высотой более 30 см был представлен всеми высеянными видами трав, в том числе многочисленными всходами клевера лугового. Хорошо развитая корневая система длиной более 20 см способствовала образованию мощной и плотной дернины толщиной более 10 см. Корни растений в основном обходили комки мазута, устремляясь в техногенный субстрат. Отдельные корни растений проникали в комки мазута на глубину более 2 см, а часть всходов появились даже в трещинах и разломах мазута (см. рис. 37).

Таким образом, экспресс-способ прямого посева в присутствии биопрепарата «Микрозим ПЕТРО ТРИТ» был рекомендован в качестве перспективного приема фиторекультивации нефтезагрязненных земель. Он позволяет в короткие сроки (три месяца) сформировать высококачественный устойчивый растительный покров, способный самостоятельно расти и развиваться в условиях нефтезагрязнения.

Влияние препарата «Микрозим» на качественные показатели фитоценоза, сформированного способом прямого посева на участках, загрязненных мазутом и нефтью

Используемые нефтепродукты, биопрепараты	Показатель				
	Высота травостоя, см	Длина корней, см	Плотность травостоя, шт/дм ²	Биомасса, г/м ²	Проективное покрытие, %
Мазут	22,3 ± 1,6	19,7 ± 3,2	686,4 ± 31,2	610,0 ± 31,0	70,4 ± 6,2
Мазут + «Микрозим»	34,6 ± 2,4	22,0 ± 1,5	1019,7 ± 70,9	883,4 ± 35,4	80,6 ± 3,5
Нефть	26,4 ± 1,3	21,0 ± 1,0	650,0 ± 21,0	5,8 ± 0,2	80 ± 1,3
Нефть + «Микрозим»	31,2 ± 1,1	25,0 ± 1,0	802,3 ± 12,2	6,2 ± 0,2	90 ± 0,9



Рис. 33. Травостой (слева) и дернина (справа), сформированные с использованием прямого посева в варианте, загрязненном мазутом (фото Л. Ивановой)



Рис. 34. Травостой (слева) и дернина (справа), сформированные с использованием прямого посева в варианте, загрязненном мазутом, с внесением препарата «Микрозим» (фото Л. Ивановой)



Рис. 35. Травостой (слева) и дернина (справа), сформированные с использованием прямого посева в варианте, загрязненном нефтью (фото Л. Ивановой)



Рис. 36. Травостой (слева) и дернина (справа), сформированные с использованием прямого посева в варианте, загрязненном нефтью, с внесением препарата «Микрозим» (фото Л. Ивановой)



Рис. 37. Всходы растений внутри разломов в комках мазута (фото Л. Ивановой)

Таким образом, на основании полученных данных был сделан вывод о том, что использование инновационного способа прямого посева для биорекультивации наземных участков, загрязненных сырой нефтью, в присутствии биопрепарата «Микрозим» позволяет в короткие сроки (один вегетационный период) сформировать высококачественный, устойчивый растительный покров, способный противостоять нефтезагрязнению.

ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ С ПРИМЕНЕНИЕМ УСКОРЕННОГО ФОРМИРОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

В суровых климатических условиях Севера, расположения загрязненных территорий с высокой степенью деградации почвы на склонах проведение фиторемедиации путём посева трав может быть затруднено. Проростки гибнут из-за интоксикации, переувлажнения, смыва, а также в результате поедания животными надземной части растений. Решением данной проблемы может стать применение для биоремедиации растительной дернины на вермикулитовой или древесной основе. Растения в данных ассоциациях более устойчивы к неблагоприятным факторам.

Данная технология основана на комплексном применении вермикулитового субстрата-почвозаменителя и многолетних травянистых растений. Субстраты изготавливаются из природного минерала вермикулита: они легки (плотность 0,15–0,55 г/м³), отличаются высокими показателями механической прочности, влагоемкости и буферности. Данный субстрат не токсичен для биоты и признан благоприятным для выращивания растений. В состав фитоценоза входят пырей сизый, овсяница красная, райграс пастбищный и тимофеевка луговая.

Для оценки эффективности данной технологии на трёх участках горы Каскама (западный и юго-восточный склоны, вершина) на поверхности загрязненного грунта были размещены фрагменты ковровой дернины на вермикулитовой основе. Содержание нефтепродуктов в грунте под дерниной составляло от 36 000 до 82 000 мг/кг.

Площадь каждого дернового ковра 0,09 м². Перед их размещением на поверхность грунта было внесено комплексное минеральное удобрение. На рис. 38 показаны опытные участки с фрагментами травяной дернины.



Рис. 38. Фрагменты травяной дернины на площадке 1 (А), 2 (Б) и вершине (В) горы Каскама (фото В. Мязина)

Через три месяца растения на вермикулитовой подложке оставались жизнеспособными и образовали плотную дернину, закрепившись в грунте. Отделить фрагмент дернины от поверхности грунта, не разорвав ее, было невозможно. Внешний вид растительной дернины представлен на рис. 39.

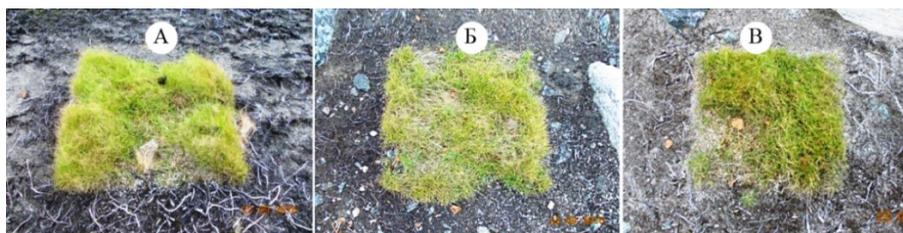


Рис. 39. Фрагменты травяной дернины на площадке 1 (А), 2 (Б) и вершине (В) горы Каскама (фото В. Мязина)

За счёт внесения минеральных удобрений значение актуальной кислотности грунта под растениями немного ниже, чем на других загрязненных участках — от 4,34 до 4,56 ед. рН.

В течение последующих двух лет наблюдение за состоянием травостоя показало, что растения на вермикулитовой подложке обладают высокой устойчивостью к загрязнению почвы нефтепродуктами. Это обусловлено наличием незагрязненного субстрата-почвозаменителя в составе. Именно в этом субстрате происходит развитие корневой системы растений на начальных этапах роста, когда они наиболее уязвимы к токсичности среды. В дальнейшем корни растений проникают глубже и происходит закрепление вермикулитовой основы с растениями на

поверхности загрязненного грунта. Уже в конце первого вегетационного периода произошло закрепление дернины на экспериментальных участках. В дальнейшем вермикулитовый субстрат и загрязненный грунт становятся одним целым элементом. На рис. 40 показано состояние травостоя через один и два года.



Рис. 40. Состояние травостоя на вермикулитовой подложке в июне (А) и сентябре (Б) 2017 г., а также в июне (В) и сентябре (Г) 2018 г. (фото В. Мязина)

Постепенно в составе растительности на вермикулитовых подложках стали появляться мхи (рис. 41).



Рис. 41. Появление мхов на травяных дернинах. Состояние травостоя в 2017 (А) и 2018 (Б) гг. (фото В. Мязина)

В течение многолетнего периода наблюдения с момента начала работ все растения остаются в жизнеспособном состоянии. Угнетение растений было отмечено только в первый сезон, после чего их состояние улучшилось. Таким образом, данная технология может быть использована при восстановлении нефтезагрязненных территорий для быстрого формирования растительного покрова на участках со старым загрязнением и в условиях высокой концентрации углеводов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этом обзоре мы попытались кратко изложить результаты наших исследований в области разработки и оптимизации биологических методов очистки нефтезагрязненных почв в Арктической зоне Российской Федерации. По нашему мнению, биоремедиация загрязненных территорий в настоящее время недооценена, что во многом ограничивает ее применение в условиях Севера. Проведенные многолетние исследования эффективности биологической очистки почв и грунтов показали, что биотехнологии способны стать альтернативным способом очистки загрязненных территорий в Арктическом регионе, несмотря на сложные климатические и почвенные условия. Методы биологической очистки могут найти свое применение как при доочистке почвы после ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов, так и при очистке старых загрязнений в рамках сокращения площади территорий с накопленным экологическим ущербом, что очень актуально для северных регионов.

Рекомендуемые нами биотехнологии очистки и восстановления нефтезагрязненных почв и грунтов позволяют с минимальными негативными последствиями и побочными эффектами очищать загрязненные участки и восстанавливать нарушенные территории Арктики и Субарктики. Природные механизмы очистки, лежащие в основе методов биостимуляции, биоаугментации и сорбционно-биологической очистки, способствуют восстановлению экосистем и поддержанию биоразнообразия. Естественные минеральные и органические сорбенты, используемые для повышения эффективности биологической очистки, будут включаться в состав минеральной матрицы почвы или ее органического вещества, они не требуют обязательного извлечения после завершения очистки. Относительная простота технологий биологической очистки и отсутствие необходимости экскавации загрязненной почвы и грунтов позволяют применять их в труднодоступных местах в условиях отсутствия подъездных путей, в том числе на прибрежных территориях.

Метод восстановления нефтезагрязненных территорий путем ускоренного формирования растительного покрова также полностью удовлетворяет современным требованиям экологии. Используемый субстрат является природным минералом, который в своем химическом составе не имеет вредных или запрещенных веществ. Ускоренное создание

растительного покрова совместно с биопрепаратами — деструкторами нефти позволит в короткие сроки формировать на почвах, загрязненных мазутом, дизельным топливом и нефтью, устойчивые высококачественные фитоценозы с определенным видовым составом.

Для обоснования широкого применения данных способов формирования растительного покрова и биопрепаратов — деструкторов нефти в качестве эффективного способа биоремедиации наземных нефтезагрязненных участков необходимо продолжать исследования их влияния на динамику содержания нефтепродуктов и численность микроорганизмов в загрязненных почвах.

Повсеместное использование технологий биологической очистки нефтезагрязненных территорий позволит повысить эффективность защиты и сохранения природной среды в условиях нарастающего негативного влияния антропогенных факторов, что является одной из наиболее актуальных проблем современности. Сокращение площадей накопленного экологического вреда и возможность быстрой и успешной ликвидации загрязнений — это те задачи, решить которые возможно уже сейчас с помощью биотехнологий.

ЛИТЕРАТУРА

Айткельдиева С. А., Файзуллина Э. Р. Изучение углеводородокисляющей активности микроорганизмов, выделенных из нефтезагрязненных почв Атырауской области (Казахстан) // Современные проблемы загрязнения почв. II Международная научная конференция: сборник материалов. Т. 2. — М.: Изд-во МГУ, 2007. С. 252–256.

Алехин В. Г., Емцев В. Т., Rogozina E. A., Фахрутдинов А. И. Биологическая активность и микробиологическая рекультивация почв, загрязненных нефтепродуктами // Биологические ресурсы и природопользование: сборник научных трудов. — Нижневартовск: Изд-во Нижневартовского пед. ин-та, 1998, Вып. 2. С. 95–105.

Алябина И. О., Урусевская И. С., Мартыненко И. А., Кречетов П. П. Почвенный покров России и его способность к самоочищению (по карте масштаба 1 : 15000000) // Доклады по экологическому почвоведению. 2008. № 1, вып. 7. С. 24–38.

Андреева Т. А. Интегральная оценка воздействия нефтяного загрязнения на параметры химического и биологического состояния почв таежной зоны Западной Сибири: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.27. — Томск, 2005. — 26 с.

Анискина М. В., Зануллин В. Г., Рымарь А. И. Оценка генотоксичности почв Усинского нефтяного месторождения при помощи растительных тест-систем // Экологические работы на месторождениях нефти Тимано-Печорской провинции. Состояние и перспективы: материалы III научно-практ. конф. — Сыктывкар, 2004. С. 160–163.

Баландина А. В., Еремченко О. З. Микробная ремедиация нефтезагрязненных агродерново-карбонатных почв и техногенных поверхностных образований в подзоне южной тайги. — Пермь: Перм. гос. фарм. акад.; Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2016. 100 с.

Баландина А. В., Садовникова Л. К. Биоремедиация нефтезагрязненных почв с помощью биопрепаратов // II Международная научная конференция «Современные проблемы загрязнения почв»: сборник материалов. — М.: Изд-во МГУ, 2007. С. 260–262.

Басюл Е. В. Методы очистки и рекультивации среды от нефтепродуктов // II Международная научная конференция

«Современные проблемы загрязнения почв»: сборник материалов. Т. 2. — М.: Изд-во МГУ, 2007. С. 262–264.

Безносиков В. А., Лодыгин Е. Д., Кондратенко Б. М. Экологическая оценка почв в районе эксплуатации нефтяных месторождений в условиях севера // Международный экологический форум «Сохраним планету Земля»: сборник докладов. — СПб.: Центральный музей почвоведения им. В. В. Докучаева, 2004. С. 144–148.

Буланова А. В., Грецова И. В., Муратова О. В. Исследование сорбционных свойств сорбентов, применяемых для очистки почв от нефтяных загрязнений // Вестник СамГУ — Естественнонаучная серия. 2005. № 3 (37). С. 150–158.

Васильева Г. К., Стрижакова Е. Р. Использование активированного угля в биоремедиации загрязненных почв и донных отложений (обзор) // Вестник РФФИ. 2008. № 4. С. 32–43.

Васильева Г. К., Стрижакова Е. Р., Барышникова Е. Р. Применение сорбентов для повышения эффективности биоремедиации загрязненных почв // Сорбенты как фактор качества жизни и здоровья. Матер. IV-й межд. конф. — Белгород, 2012. С. 194–200.

Васильева Г. К., Стрижакова Е. Р., Бочарникова Е. А., Семенюк Н. Н., Яценко В. С., Слюсаревский А. В., Барышникова Е. А. Нефть и нефтепродукты как загрязнители почвы. Технология комбинированной физической и биологической очистки загрязненных почв // Российский химический журнал. 2013. № 57. С. 79–104.

Водопьянов В. В. Математические модели и методы анализа восстановления биосистем, подверженных антропогенным воздействиям (на примере восстановления нефтезагрязненных почв): автореф. дис. ... д-ра тех. наук: 05.13.18. — Уфа, 2008. 43 с.

Воробьев Ю. Л., Акимов Б. А., Соколов Ю. И. Предупреждение и ликвидация разливов нефти и нефтепродуктов. — М.: Ин-октаво, 2005. — 368 с.

Габбасова И. М., Ситдинов Р. Н., Сулейманов Р. Р. Агрэкологический подход в системе рекультивации нефтезагрязненных земель // Биологическая рекультивация нарушенных земель: материалы международного совещания. — Екатеринбург: УрО РАН, 2003. С. 52–60.

Гайнутдинов М. З. О токсичности нефти. Проблема разработки автоматизированных систем наблюдения, контроля и оценки состояния

окружающей среды // Материалы Всесоюз. науч. техн. конф. — Казань, 1979. С. 141–143.

Галиулин Р. В., Галиулина Р. А., Башкин В. Н., Аكوва Г. С., Листов Е. Л., Балакирев И. В. Сравнительная оценка разложения углеводов газового конденсата и нефти в почве под действием биологических средств // *Агрохимия*. 2010. № 10. С. 52–58.

Гафарова Е. В., Зарипова С. К. Влияние цеолитсодержащей породы и эспарцета на биологические параметры выщелоченного чернозёма, загрязненного смесью углеводов // *Вестник СамГУ — Естественнонаучная серия*. 2005. № 6 (40). С. 146–156.

Гашев С. Н., Казанцева М. Н., Рыбин А. В., Соромотин А. В. Методика оценки фитопригодности нефтезагрязненных территорий (с рекомендациями к рекультивационным работам) // *Тюменская ЛОС ВНИИЛМ*. — Тюмень, 1992. 13 с.

Герасимова М. И., Строганова М. Н., Можарова Н. В., Прокофьева Т. В. Антропогенные почвы: генезис, география, рекультивация: учебное пособие / под ред. академика РАН Г. В. Добровольского. — Смоленск: Ойкумена, 2003. 268 с.

Гилязов М. Ю., Гайсин И. А. Агроэкологическая характеристика и приемы рекультивации нефтезагрязненных черноземов Республики Татарстан. — Казань: Фэн, 2003. 227 с.

Губкина Т. Г., Беляевский А. Т., Маслобоев В. А. Способы получения гидрофобных сорбентов нефти модификацией поверхности вермикулита органосилоксанами // *Вестник МГТУ*. — Т. 14, № 4. — 2011. — С. 134.

Гузев В. С., Левин С. В. Техногенные изменения сообщества почвенных микроорганизмов // *Перспективы развития почвенной биологии: труды всероссийской конференции*. — М.: Макс-Пресс, 2001. С. 178–219.

Деградация и охрана почв: монография / под общей ред. акад. РАН Г. В. Добровольского. — М.: Изд-во МГУ, 2002. 654 с.

Денисова А. П., Архипова Н. С., Халилова А. Ф., Зарипова С. К., Бреус В. А., Бреус И. П. Влияние загрязнения дизельным топливом на устойчивость культур и биологическую активность выщелоченного чернозема // *Агрохимия*. 2011. № 2. С. 41–50.

Другов Ю. С., Родин А. А. Экологические анализы при разливах нефти и нефтепродуктов: практическое руководство; 2-е изд., перераб. и доп. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 270 с.

Евдокимова Г. А. Биоэкология: почвенная биота в техногенных зонах (биомасса, предельные техногенные нагрузки, критерии самовосстановления и устойчивости почв к загрязнению) // Инженерная экология. 2007. № 4. С. 35–44.

Евдокимова Г. А., Маслобоев В. А. Биоремедиация загрязненных нефтепродуктами почв в условиях Кольского Севера // МурманшельфИнфо. 2011. № 2 (15). С. 34–38.

Евдокимова Г. А., Мозгова Н. П., Корнейкова М. В., Ахтулова Е. М., Михайлова И. В. Воздействие загрязнения почв дизельным топливом на растения и ризосферную микробиоту // Агрохимия. 2007. № 12. С. 49–55.

Евдокимова Г. А., Мозгова Н. П., Михайлова И. В. Способы биоремедиации почв Кольского Севера при загрязнении дизельным топливом // Агрохимия. 2009. № 6. С. 61–66.

Елин Е. С. Биогеохимическая трансформация нефти-загрязнителя и болотного биогеоценоза при их взаимодействии // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. — Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2002. № 3. С. 153–166.

Завгородняя Ю. А., Дроздова О. Ю. Влияние гуминовых препаратов на микробиологическую активность почвы, загрязненной углеводородами // Международный молодежный научный форум «Ломоносов-2011»: материалы [Электронный ресурс]. — М.: МАКС Пресс, 2011. — 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM).

Зейферт Д. В., Гамерова Л. М. Характер зависимости между концентрацией нефти в почве и ее токсичностью // Экологический вестник России. 2012. № 12. С. 16–19.

Зосин А. П., Приймак Т. И., Агеев Н. Г., Сулименко Л. П. Использование биосорбента «С-Верад» для биодеградациии нефтезагрязнений при ремедиации нарушенных земель // VI межд. конференция «Экология и развитие северо-запада России»: материалы конференции. — СПб., 2001. С. 88–91.

Ибрагимова С. Т. Биологическое диагностирование нефтезагрязненных почв месторождений Казахстана: автореферат дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16. — Алматы, 2009. 18 с.

Иванова Л. А. Ковдорский вермикулит — гидропонный субстрат для северного растениеводства (Кольский полуостров) // Экология северных территорий России. Проблемы, прогноз ситуации, пути

развития, решения: Материалы международной конференции, Архангельск, 17–22 июня, 2002. Т. 1. — Архангельск, 2002. С. 166–168.

Иванова Л. А., Котельников В. А. Перспективы гидропонного выращивания растений в условиях Мурманской области. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2006. 110 с.

Иванова Л. А., Котельников В. А. Экологические аспекты использования ковдорского вермикулита в северном растениеводстве // Северные территории России: проблемы и перспективы развития // Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 2008. С. 517–520.

Иларионов С. А., Иларионова С. Ю., Назаров А. В., Калачникова И. Г. Восстановление почвенного биоценоза, подвергнутого нефтяному загрязнению // Письма в международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2005. № 1. С. 56–59.

Исакова Е. А., Корнейкова М. В. Деструкционная активность углеводородокисляющих микромицетов, выделенных из субстратов прибрежных территорий Баренцева и Белого морей // Вестник МГТУ. 2021. Т. 24, № 2. С. 178–189.

Казанцева М. Н., Казанцев А. П., Гашев С. Н. Характеристика нефтяного загрязнения территории Мамонтовского месторождения // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. — Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2001. Вып. 2. С. 86–90.

Капелькина Л. П. Технологические аспекты восстановления нарушенных земель в районах добычи нефти Западной Сибири // Антропогенная трансформация природной среды: материалы междунар. конф. — Пермь: Пермский гос. ун-т, 2010. Т. 3. С. 78–80.

Киреева Н. А., Водопьянов В. В. Моделирование биодegradации нефти в почве микроорганизмами // II Международная научная конференция «Современные проблемы загрязнения почв». Т. 2: сборник материалов. — М.: Изд-во МГУ, 2007. С. 78–79.

Киреева Н. А., Кабилов Т. Р., Григориади А. С., Онегова Т. С. Детоксикация нефтешлама с использованием целлюлозосодержащих субстратов // Вестник Башкирского университета. 2008. Т. 13, № 1. С. 47–51.

Киреева Н. А., Онегова Т. С., Жданова Н. В. Изучение возможности применения биопрепарата Белвитамил для ускорения деструкции нефти в почве и водоеме // Биотехнология. 2003. № 5. С. 77–80.

Киреева Н. А., Ямалетдинова Г. Ф. Фенолоксидазная активность нефтезагрязненных почв // Вестник Башкирского университета. 2001. № 1. С. 48–51.

Кокорина Н. Г. Эффективный способ очистки почв от нефтепродуктов // Плодородие. 2009. № 6. С. 51–53.

Кокорина Н. Г. Исследования эффективности испарения нефтепродуктов из загрязненных почв // IX Научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава. ВПИ (филиал) ВолГТУ: сборник материалов. — Волжский, 2010. С. 34–35.

Колбасов Г. А. Применение гуматов при рекультивации нефтезагрязнённых торфяных территорий // Естественные и технические науки. 2010. № 2. С. 212–216.

Корнейкова М. В., Евдокимова Г. А., Лебедева Е. В. Комплексы микроскопических грибов в загрязненных нефтепродуктами агроземах в условиях Кольского Севера // Микология и фитопатология. 2011. Т. 45, № 3. С. 249–256.

Леднев А. В. Изменение свойств дерново-подзолистых суглинистых почв под действием загрязнения продуктами нефтедобычи и приемы их рекультивации: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.01.03. — Ижевск, 2008. — 43 с.

Лушников С. В., Терещенко Н. Н., Митрофанова Н. А., Франк Ю. А. Эффективность рекультивации нефтезагрязненных почв // Фундаментальные достижения в почвоведении, экологии, сельском хозяйстве на пути к инновациям: I Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием; 23–25 апреля 2008 г.; Москва, МГУ им. М. В. Ломоносова, факультет почвоведения: Тезисы докладов / сост. Макаров О. А., Кулачкова С. А. — М.: МАКС Пресс, 2008. С. 27.

Маганов Р. У., Маркарова М. Ю., Муляк В. В., Загвоздкин В. К., Заикин И. А. Природоохранные работы на предприятиях нефтегазового комплекса. Ч. I. Рекультивация загрязненных нефтью земель в Усинском районе Республики Коми. — Сыктывкар, 2006. 208 с.

Маркарова М. Ю. Скорость очищения почв от нефти в условиях Севера // Вестник Института биологии Коми НЦ УрО РАН. — 2000. — Вып. 32. — URL: <http://ib.komisc.ru/add/old/t/ru/ir/vt/00-32/02.html>.

Маслобоев В. А., Евдокимова Г. А., Губкина Т. Г., Мязин В. А., Фокина Н. В., Украинская К. В. Биоремедиация загрязненных нефтепродуктами почв в субарктическом регионе // Проблемы

безопасности и эффективности освоения георесурсов в современных условиях: Материалы научно-практической конференции. — Пермь: Горный институт УрО РАН, 2014. С. 146–149.

Месяц С. П., Аверина О. В. Биотехнология утилизации нефтепродуктов в буртах // Антропогенная трансформация природной среды: материалы междунар. конференции. — Пермь: Пермский гос. ун-т, 2010. Т. 3. С. 126–129.

Месяц С. П., Шемякина А. Б. Активизация микробиологических процессов окисления мазутных загрязнений грунта // Вестник МГТУ. 2009. Т. 12, № 4. С. 742–746.

Методические рекомендации по выявлению деградированных и загрязненных земель. Письмо Минприроды РФ № 25/8-34. — 1995. 15 с.

Московченко Д. В. Нефтегазодобыча и окружающая среда. Эколого-геохимический анализ Тюменской области. — Новосибирск: Наука, 1998. 112 с.

Мукашева Т. Д. Выделение и отбор олиготрофных микроорганизмов, растущих на нефти и нефтепродуктах // Вестник КазГУ: Серия биологическая. 2001. № 1 (13).

Мязин В. А. Изменение ферментативной активности почвы при ее загрязнении нефтепродуктами // Актуальные проблемы региональной экологии и биодиагностика живых систем: Материалы XI Всерос. научно-практ. конф.-выставки инновационных экологических проектов с междунар. участием. — Киров: ООО «Веси», 2013. С. 275–279.

Мязин В. А. Разработка способов повышения эффективности биоремедиации почв Кольского Севера при загрязнении нефтепродуктами (в условиях модельного эксперимента): дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08. — Апатиты, 2014. 167 с.

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

Мязин В. А., Редькина В. В. Влияние загрязнения почвы нефтепродуктами на рост *Secale cereale* L. и перспективы ее использования при фиторемедиации // Вестник МГТУ. 2016. Т. 19, № 1/2. С. 217–221.

Мязин В. А., Редькина В. В. Оценка возможности применения злаков *Phalaroides arundinacea* и *Festuca pratensis* для восстановления почв, загрязненных нефтепродуктами // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: материалы VI Всероссийской научной конференции с международным участием. — Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2016. С. 125–129.

Мязин В. А., Фокина Н. В. Исследование эффективности различных способов биологической рекультивации почв, загрязненных нефтепродуктами, в климатических условиях Кольского полуострова // Современные проблемы загрязнения почв: сб. материалов IV Межд. научн. конф. — М.: Изд. МГУ, 2013. С. 402–406.

Надеин А. Ф. Очистка воды и почвы от нефтезагрязнений // Экология и промышленность России. 2001. № 11. С. 24–26.

Назарко М. Д., Романова К. Н., Ксандопуло С. Ю., Щербаков В. Г., Александрова А. В. Сорбент для очистки почвы от нефтяных загрязнений // Фундаментальные исследования. 2006. № 11. С. 96–98.

Назаров А. В., Ананьина Л. Н., Ястребова О. В., Плотникова Е. Г. Влияние нефтяного загрязнения на бактерии дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 2010. № 12. С. 1489–1493.

Назаров А. В., Иларионов С. А. Изучение причин фитотоксичности нефтезагрязненных почв // Письма в международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2005. № 1. С. 60–65.

Новоселова Е. И. Экологические аспекты трансформации ферментного пула почвы при нефтяном загрязнении и рекультивации: автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 03.00.27, 03.00.16. — Воронеж, 2008. 30 с.

Новоселова Е. И., Киреева Н. А. Экологически безопасный метод ускорения трансформации нефти в почвах // Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: новые методы и технологии исследований. Т. IV: Экологическая безопасность, инновации и устойчивое развитие. Образование для устойчивого развития / под ред. проф. Латыповой В. З. и доц. Яковлевой О. Г. Казань: Изд-во «Отечество», 2009. С. 189–191.

О порядке определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами. Письмо Минприроды РФ № 04-25/61-5678. 1994. 12 с.

Одинцова Т. А. Разработка технологии идентификации и мониторинга нефтяных загрязнений: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.36. Пермь, 2010. 214 с.

Пат. № 2393665. Способ создания экологически чистого покрытия и питательная среда для его выращивания / Иванова Л. А. Опубл. 20.01.2009, Бюл. № 2.

Пат. Рос. Федерация № 2703500. Нефтеокисляющий биопрепарат, биосорбент на его основе и способ его приготовления / Т. Н. Щемелинина, Е. М. Анчугова. Опубл. 17.10.2019. Бюл. № 29.

Пат. Рос. Федерация № 2764305. Способ очистки почв от нефтяных загрязнений методом гидропосева биосмеси с применением микроводорослей *Chlorella vulgaris globosa* IPPAS C-2024 / Корчагина Ю. С., Щемелинина Т. Н. Опубл. 17.01.2022, Бюл. № 2.

Пермитина В. Н., Димеева Л. А. Трансформация почвенного покрова нефтегазовых месторождений Восточного Прикаспия // Биологическая рекультивация нарушенных земель: материалы международного совещания. — Екатеринбург: УрО РАН, 2003. С. 383–392.

Петухова Г. А. Эколого-генетические последствия воздействия нефтяного загрязнения на организмы: автореф. дис. ... доктора биол. наук: 03.00.16. — Тюмень, 2007. 30 с.

Пиковский Ю. И. Трансформация техногенных потоков нефти в почвенных экосистемах // Восстановление нефтезагрязненных почвенных экосистем. — М.: Наука, 1988. С. 17–22.

Пиковский Ю. И. Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. — М.: Изд-во МГУ, 1993. 208 с.

Пиковский Ю. И., Геннадиев А. Н., Чернянский С. С., Сахаров Г. Н. Проблема диагностики и нормирования загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами // Почвоведение. 2003. № 9. С. 1132–1140.

Плешакова Е. В., Дубровская Е. В., Турковская О. В. Приемы стимуляции аборигенной нефтеокисляющей микрофлоры // Биотехнология. 2005. № 1. С. 42–49.

Плешакова Е. В., Дубровская Е. В., Турковская О. В. Сравнение эффективности интродукции нефтеокисляющего штамма *Dietzia maris* и стимуляции естественных микробных сообществ для ремедиации загрязнённой почвы // Прикладная биохимия и микробиология. 2008. 44 (4). С. 430–437.

Полонский В. И., Полонская Д. Е. Причины разнонаправленного действия нефтезагрязненной почвы на прорастание семян // Биодиагностика в экологической оценке почв и сопредельных сред: тезисы докладов международной конференции. — М.: Бином. Лаборатория знаний, 2013. С. 168.

Пора озеленять Арктику. Инновационные газонные технологии для создания травяного покрова различного назначения в условиях Заполярья: методические рекомендации / Л. А. Иванова, М. В. Слукотская, И. П. Кременецкая, Т. Т. Горбачева. — Апатиты: Издательство ФИЦ КНЦ РАН, 2020. — 37 с.: ил.

Пора очищать Арктику. Создание фитоочистной системы для доочистки сточных вод горнорудных предприятий от минеральных соединений азота / Л. А. Иванова, В. А. Мязин, М. В. Корнейкова, Н. В. Фокина, Г. А. Евдокимова, В. В. Редькина; отв. ред. канд. биол. наук Е. А. Боровичев. — Апатиты: Издательство Кольского научного центра, 2021. — 88 с.: ил.

РД 39-00147105-006-97. Инструкция по рекультивации земель, нарушенных и загрязненных при аварийном и капитальном ремонте магистральных нефтепроводов. — 1997. 22 с.

Рогозина Е. А., Шиманский В. К. Некоторые теоретические аспекты восстановления нефтезагрязненных почвенных экосистем [Электронный ресурс] // Нефтегазовая геология. Теория и практика. — 2007. — Т. 2. — URL: <http://www.ngtp.ru/rub/7/012.pdf>.

Руденко Е. Ю. Влияние отходов пивоварения на ферментативную активность нефтезагрязнённой чернозёмной почвы // Теоретическая и прикладная экология. 2011. № 3. С. 60–64.

Салангина Л. А. Изменение агрохимических и агрофизических характеристик почвы под влиянием нефтяного загрязнения // Биологическая рекультивация нарушенных земель: материалы международного совещания. — Екатеринбург: УрО РАН, 2003. С. 278–283.

СанПиН 2.1.7.1287-03. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы (Приложение 1). Постановление Главного государственного санитарного врача РФ № 53 от 17 апреля 2003 г.

Смольникова В. В., Емельянов С. А., Дементьев М. С. Воздействие углеводородов нефти на окружающую среду и способы очистки нефтезагрязненных субстратов // Известия Самарского научного центра РАН. 2009. Т. 11, № 1 (6). С. 1378–1380.

Солнцева Н. П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. — М.: Изд-во МГУ, 1998. 376 с.

Стрижакова Е. Р., Васильева Г. К. Ускоренная биоремедиация почвы в присутствии сорбентов // III Международная конференция «Международное сотрудничество в биотехнологии: Ожидания и реальность»: материалы конференции. — 2006. — URL: http://www.rusbio.biz/ru/nb2006_31.shtml.

Сулейманов Р. Р., Абдрахманов Т. А., Жаббаров З. А., Турсунов Л. Т. Ферментативная активность и агрохимические свойства лугово-аллювиальной почвы в условиях нефтяного загрязнения // Известия Самарского научного центра РАН. 2008. Т. 10, № 2. С. 294–298.

Сухова И. В., Садовникова Л. К., Трофимов С. Я. Современное состояние органического вещества верховых торфяников Западной Сибири в условиях нефтяного загрязнения // Сохраним планету Земля: сборник докладов международного экологического форума. — СПб.: Центральный музей почвоведения им. В. В. Докучаева, 2004. С. 188–191.

Устинов, М. Т., Казанцев В. А., Елизарова Т. Н., Магаева Л. А., Якутин М. В. Мониторинг территорий нефтегазовых промыслов методом почвотестирования // Исследования эколого-географических проблем природопользования для обеспечения территориальной организации и устойчивости развития нефтегазовых регионов России: Теория, методы и практика. — Нижневартовск: НГПИ, ХМРО РАЕН, ИОА СО РАН, 2000. С. 197–199.

Фарахова И. З. Агрохимические свойства и приемы рекультивации нефтезагрязненных серых лесных почв Предкамья Республики Татарстан: автореф. дис. ... канд. с/х. наук: 06.01.04. — Казань, 2009. 25 с.

Фокина Н. В., Мязин В. А., Мозгова Н. П., Евдокимова Г. А. Динамика убыли нефтепродуктов из агроземов и их микробиологическая активность // Международная конференция «Антропогенная трансформация природной среды»: материалы конференции. Т. III. — Пермь, 2010. С. 452–458.

Хабидуллина Ф. М., Шубакова А. А., Арчегалова И. Б., Романов Г. Г. Исследования способности нефтеокисляющих бактерий утилизировать нефть // Биотехнология. 2002. № 6. С. 57–62.

Холоденко В. П., Чугунов В. А., Жиглецова С. К., Родин В. Б., Ермоленко З. М., Фомченков В. М., Ирхина И. А., Кобелев В. С., Волков В. Я. Разработка биотехнологических методов ликвидации нефтяных

загрязнений окружающей среды // Российский химический журнал. 2001. Т. XLV, № 5–6. С. 135–141.

Чапоргина А. А., Корнейкова М. В., Фокина Н. В. Деструкционная активность углеводородокисляющих микромицетов, выделенных из почв Кольского полуострова // Микология и фитопатология. 2019. Т. 53, № 1. С. 36–45.

Чижев Б. Е., Долингер В. А. Классификация нефтезагрязненных земель таежной зоны Западной Сибири с целью их рекультивации // Леса и лесн. хоз-во Западной Сибири. Вып. 6: сб. науч. тр. — Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 1998. С. 179–192.

Чижев Б. Е., Долингер В. А., Захаров А. И. Особенности нефтяного загрязнения территории Ханты-Мансийского автономного округа // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2007. № 8. С. 15–21.

Чухарева Н. В., Шишмина Л. В. Сравнение сорбционных свойств верхового и низинного торфа по отношению к товарной нефти и стабильному газовому конденсату // Химия растительного сырья. 2012. № 4. С. 193–200.

Шумилова И. Б., Максимович Н. Г., Блинов С. М., Кузнецов Л. Н. Возможные пути борьбы с последствиями разливов нефтепродуктов // Геология, разработка, бурение и эксплуатация нефтяных месторождений Пермского Прикамья. Вып. 2: сб. науч. трудов. — Пермь, 1999. С. 240–249.

Щемелинина Т. Н. Биологическая активность нефтезагрязненных почв Крайнего Севера на разных стадиях их восстановления и при рекультивации (на примере Усинского района Республики Коми): автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.27, 03.00.16. — Воронеж, 2008. 24 с.

Яценко В. С., Стрижакова Е. Р., Васильева Г. К., Зиннатшина Л. В. Способ снижения экологических рисков при проведении биоремедиации нефтезагрязненных почв in-situ // Проблемы анализа риска. 2014. № 11. С. 6–17.

Al-Nasrawi H. Biodegradation of crude oil by fungi isolated from Gulf of Mexico // Journal of Bioremediation and Biodegradation. 2012. V. 3, Iss. 4. DOI: <http://dx.doi.org/10.4172/2155-6199.1000147>

Bandura L., Woszek A., Kolodynska D., Franus W. Application of mineral sorbents for removal of petroleum substances: a review // Minerals. 2017. 7. 37–43. DOI: 10.3390/min7030037

Evdokimova G. A., Masloboev V. A., Mozgova N. P., Myazin V. A., Fokina N. V. Bioremediation of oil-polluted cultivated soils in the Euro-Arctic Region // *Environmental Science and Engineering*. 2012. № 9. 1130–1136.

International Application No: PCT/RU2010/000001. Method for biologically recultivating industrial wastelands / Ivanova L. A. Pub. No.: WO/2011/084079. Publication Date: 14.07.2011. International Filing Date: 11.01.2010. IPC: A01B 79/02 (2006.01), A01G 1/00 (2006.01), A01G 31/00 (2006.01).

Korneykova M. V., Chaporgina A. A., Redkina V. V. Oil destructive activity of fungi isolated from the soils of the Kola Peninsula urbanization // *Challenge and Opportunity for Soil Functions and Ecosystem Services: Proceedings of the 9th Suitma Congress*. Eds. V. Vasenev, E. Dovletyarova, Z. Cheng, T. Prokofieva, J. Morel, N. Ananyeva. Springer, 2019. 123–134. DOI: 10.1007/978-3-319-89602-1_16

Kuyukina M. S., Ivshina I. B. Bioremediation of contaminated environments using *Rhodococcus* // *Biology of Rhodococcus*. Springer, Cham. 2019. 231–270. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-11461-9_9

Mahtab A. M., Rajapaksha A. U., Lim J. E., Zhang M., Bolan N., Mohan D., Vithanage M., Lee S. S., Ok Y. S. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review // *Chemosphere*. 2014. 99. 19–33. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.10.071

Myazin V. A., Korneykova M. V., Chaporgina A. A., Fokina N. V., Vasilyeva G. K. The effectiveness of biostimulation, bioaugmentation and sorption-biological treatment of soil contaminated with petroleum products in the Russian Subarctic // *Microorganisms*. 2021. № 9. P. 1722.

Schacht O., Ajibo K. Soil Bioremediation: In-Situ vs. Ex-situ (Costs, Benefits, and Effects). WSP and Göteborg Energi, 2002. 77 p.

Semenyuk N. N., Yatsenko V. S., Strijakova E. R., Filonov A. E., Petrikov K. V., Zavgorodnyaya Yu. A., Vasilyeva G. K. Effect of Activated Charcoal on Bioremediation of Diesel Fuel Contaminated Soil // *Microbiology*. 2014. № 83. 589–598. DOI: 10.1134/S0026261714050221

Vasilyeva G. K., Bakhaeva L. P., Strijakova E. R., Shea P. J. Biodegradation of 3,4-dichloroaniline and 2,4,6-trinitritoluene in soil in the presence of natural adsorbents // *Environ. Chem. Let.* 2003. № 1. 176–183. DOI: 10.1007/s10311-003-0033-8

Vasilyeva G. K., Strijakova E. R., Shea P. J. Use of activated carbon for soil bioremediation. Viable methods of soil and water pollution monitoring,

protection and remediation. NATO Collection; Netherlands: Springer. 2006. 309–322. DOI: 10.1007/978-1-4020-4728-2_20

Xu X. et al. Petroleum hydrocarbon-degrading bacteria for the remediation of oil pollution under aerobic conditions: a perspective analysis // *Frontiers in Microbiology*. 2018. V. 9. 2885. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02885>

ПРИЛОЖЕНИЯ

Рекомендации по выбору метода биологической очистки и восстановления почв и грунтов в Евро-Арктическом регионе (свежее загрязнение)

Вид нефтепродуктов (НП)	Исходное содержание углеводородов, мг/кг	Глубина загрязнения, см	Приемы биологической очистки	Период очищения почвы до уровня ОДК ¹
Светлые НП	< 15 000	До 10	Улучшение водно-воздушного режима почвы (рыхление, полив)	3–4 месяца
	> 15 000	Более 10	Внесение минеральных и органических удобрений ² Внесение бактериального препарата на основе аборигенных УОБ ³ Посев трав, устойчивых к загрязнению почвы НП ⁴	12 и более месяцев ⁵
Темные НП	< 5000	До 5	Улучшение водно-воздушного режима почвы (рыхление, полив)	3–4 месяца
	> 5000	Более 5	Внесение минеральных и органических удобрений ² Внесение бактериального препарата на основе аборигенных УОБ ³ Посев трав, устойчивых к загрязнению почвы НП ⁴	12 и более месяцев ⁵

¹ В качестве ОДК нефтепродуктов приняты величины, рекомендованные Ю. И. Пиковским с соавторами (2003).

² Количество вносимых минеральных и органических удобрений, карбоната кальция необходимо уточнять по результатам химического анализа почв и значения рН.

³ Внесение бактериального препарата целесообразно при низкой численности микроорганизмов в почве.

⁴ Проведение этапа фиторекультивации возможно при остаточном содержании углеводородов в корнеобитаемом слое почвы не более 10 г/кг.

⁵ Время очистки и восстановления почвы зависит от исходного уровня загрязнения.

Рекомендации по выбору методов биологической очистки и восстановления почв и грунтов в Евро-Арктическом регионе (старое загрязнение)

Тип почвы или грунта	Приемы биологической очистки ¹	Ориентировочный период очищения почвы до уровня ОДК ²
Минеральные почвы или грунты легкого гранулометрического состава (содержание органических веществ менее 5 %)	Сорбционно-биологическая очистка (торф — 20 л/м ² , N, P ₂ O ₅ , K ₂ O — 25 г/м ² , CaCO ₃ — 150 г/м ² или ГАУ — 1 кг/м ² , N, P ₂ O ₅ , K ₂ O — 25 г/м ² , CaCO ₃ — 150 г/м ² или биоудобрения «Бамил», «Омуг» — 100 г/м ² , P ₂ O ₅ , K ₂ O — 25 г/м ² , CaCO ₃ — 150 г/м ²); посев травосмеси для рекультивации, содержащей семена злаков и бобовых растений (через 1–2 года после начала очистки)	4–6 лет (при исходном содержании углеводов — 30 000 мг/кг)
Органогенные и органоминеральные почвы и грунты (содержание органических веществ более 5 %)	Биостимуляция (N, P ₂ O ₅ , K ₂ O — 25 г/м ² , CaCO ₃ — 150 г/м ²); посев травосмеси для рекультивации, содержащей семена злаков и бобовых растений (через 1–2 года после начала очистки)	7 лет (при исходном содержании углеводов — 30 000 мг/кг)

¹ Количество вносимых минеральных удобрений и карбоната кальция необходимо уточнять по результатам химического анализа почв и значения pH.

² Период очищения будет определяться исходным содержанием углеводов в почве и может быть рассчитан с использованием формул: $T_{99} = \ln 100/k$; $T_{arc} = \ln(\frac{y_0}{y_{arc}})/k$, где y_{arc} — ориентировочно допустимая концентрация углеводов; y_0 — исходное содержание углеводов; k — константа скорости разложения углеводов. Константа скорости разложения углеводов рассчитывается как $k = \ln(\frac{y_0}{y})/t$, где y — остаточное содержание углеводов в момент времени t ; y_0 — исходное содержание углеводов.

Приложение III

Рекомендации по выбору метода биологической очистки прибрежных территорий арктических морей после загрязнения нефтепродуктами

Тип побережья	Тип нефти	Способ биоремедиации	Растения для фиторемедиации	
Каменистые и галечные пляжи	Легкая	Сорбционно-биологическая очистка ¹	Волоснец песчаный (<i>Leymus arenarius</i>) Овсяница песчаная (<i>Festuca arenaria</i>)	
	Средняя			
	Тяжелая			
Песчаные пляжи	Легкая	То же	Волоснец песчаный (<i>Leymus arenarius</i>) Овсяница песчаная (<i>Festuca arenaria</i>) Лебеда головатая (<i>Atriplex glabriuscula</i>)	
	Средняя			
	Тяжелая			
Марши	Легкая	»	Овсяница красная (<i>Festuca rubra</i>) Осоки (<i>Carex spp.</i>) Триостренник болотный (<i>Triglochin palustris</i>) Бескильница (<i>Puccinellia spp.</i>)	
	Средняя	Биостимуляция ² (биоаугментация ³)		
	Тяжелая	То же		
Прибрежные луга	Легкая	Сорбционно-биологическая очистка ¹	Овсяница красная (<i>Festuca rubra</i>) Чина алеутская (<i>Lathyrus aleuticus</i>) Бескильница (<i>Puccinellia spp.</i>) Иван-чай узколистный (<i>Chamaenerion angustifolium</i>)	
	Средняя			Биостимуляция ² (биоаугментация ³)
	Тяжелая			То же

¹ Сорбенты вносят в следующих количествах (% от массы загрязненного субстрата): торф — 5, гранулированный активированный уголь — 1, термоактивированный вермикулит — 0,5; возможно использование минеральных и органических сорбентов как совместно с биопрепаратом, так и отдельно; внесение минеральных удобрений — из расчета соотношения С : N : P : K в грунте — 70 : 1 : 0,5 : 1.

² Внесение минеральных удобрений — из расчета соотношения С : N : P : K в грунте — 70 : 1 : 0,5 : 1.

³ Количество вносимого биопрепарата (плотность суспензии 10⁷ кл/мл) — 20 л/1 т загрязненного субстрата; биопрепарат можно использовать в виде суспензии отдельно или совместно с раствором удобрений в нужной концентрации; необходимость использования биопрепаратов определяется по результатам анализа численности нефтеокисляющих микроорганизмов и активности ферментов; выбор биопрепарата (грибной или бактериально-грибной) будет зависеть от свойств субстрата (количества и качества органического вещества, значения pH, структуры сложившегося микробного сообщества).

ISBN 978-5-91137-481-5

