

Оригинальная статья

УДК 504:579.6

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-246-256>

КОМПЛЕКСНАЯ БИОТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЁННОЙ ПОЧВЫ

Т. Н. Щемелинина , Е. М. Анчугова

*Институт биологии Федерального исследовательского центра
Коми научного центра Уральского отделения РАН
Россия, 167982, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28*

Поступила в редакцию 05.10.2022 г., после доработки 27.01.2023 г., принята 26.02.2023 г., опубликована 21.06.2023 г.

Аннотация. Решением проблемы загрязнения почвы нефтью и нефтепродуктами является использование технологий с комплексным применением материалов. На основе оценки загрязненного нефтью участка на территории демонтированного резервуарного парка разработана биотехнология, включающая как отходы деревообработки, так и биологические агенты, способствующие усилению скорости процесса очистки. Эффективность очистки почвы с применением технологии внесения биопрепарата «БИОТРИН», биогеосорбента «ГЕОЛЕКС®», кородревесной смеси и трав-рекультивантов составила 92 – 95% за 60 суток. Высокая дегидрогеназная активность подтверждает эффективные процессы окисления органического загрязнителя. Проектное покрытие высевными травами рекультивированного участка спустя 60 суток после посева трав составляет 85%, что характеризует очищенный грунт как не токсичный для роста и развития злаков.

Ключевые слова: почва, загрязнение нефтью, биопрепарат, биогеосорбент, кородревесная смесь, травы-рекультиванты, биотехнология очистки

Финансирование. Работа выполнена при финансировании Государственного задания Института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН по теме «Научно обоснованные биотехнологии для улучшения экологической обстановки и здоровья человека на Севере» (№ 1021051101411-4-1.6.23), ООО «БИОЭКОБАЛАНС».

Для цитирования. Щемелинина Т. Н., Анчугова Е. М. Комплексная биотехнология очистки нефтезагрязнённой почвы // Поволжский экологический журнал. 2023. № 2. С. 246 – 256. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-246-256>

ВВЕДЕНИЕ

Проблема загрязнения окружающей среды нефтью и нефтепродуктами (НП) в России признана на государственном уровне. Особенно интенсивному загрязнению нефтью и продуктами ее переработки подвержены территории, где ведется

 Для корреспонденции. Лаборатория биохимии и биотехнологии Института биологии Коми научного центра УрО РАН.

ORCID и e-mail адреса: Щемелинина Татьяна Николаевна: <https://orcid.org/0000-0002-4052-6424>, shemelinina@ib.komisc.ru; Анчугова Елена Михайловна: <https://orcid.org/0000-0002-7912-3518>, anchugova@ib.komisc.ru.

активная добыча нефти, осуществляется ее транспортировка и хранение. Потери нефтяного сырья при добыче и транспортировке в России по разным оценкам составляют от 1 до 3.5 – 4.5%. Соответственно, при уровне добычи в 555 млн т в 2018 г. (Klerikov et al., 2022) потери составляют от 18 до 23 млн т. Самоочищение экосистем возможно, однако, скорость этого процесса слишком мала и несопоставима с темпами антропогенного загрязнения.

Среди известных технологий восстановления нефтезагрязненных грунтов и водных систем наиболее безопасной для окружающей среды является биоремедиация (Коршунова и др., 2019; Ławniczak et al., 2020). Биоремедиация может быть основана как на стимуляции аборигенной микробиоты, так и на внесении на загрязненный участок биопрепаратов с подобранными штаммами микроорганизмов. Для повышения эффективности закрепления клеток микроорганизмов, сохранения их жизнеспособности и активности внеклеточных ферментов, для решения проблем утилизации сорбирующих материалов применяется способ иммобилизации микроорганизмов на сорбенты. Кроме того, в экологически неблагоприятных условиях сорбенты выступают в качестве базы-транспорта для микроорганизмов, позволяющей жить в анабиозе до 10 лет. Биопрепараты на основе микроорганизмов-нефтедеструкторов и биогеосорбенты (микроорганизмы, иммобилизованные на цеолиты) неоднократно подтвердили свою эффективность (Артюх и др., 2014; Shchemelinina et al., 2019). При сильном нефтяном загрязнении недостаточно внесения только биопрепаратов и биосорбентов. Для достижения положительного результата необходимо проводить комплексную биорекультивацию, включающую в том числе разрыхление и аэрацию почвы для улучшения ее структуры и повышения однородности загрязнения, внесение минеральных удобрений как дополнительного источника питания микроорганизмов (Трусей и др., 2016), посев трав-рекультивантов (Емельянова и др., 2015). В качестве структуратора почв могут послужить кородревесные отходы (КДО) лесопромышленного производства (Ташкинова, 2017).

Целью исследования – оценка технологии совместного применения биопрепарата «БИОТРИН», биогеосорбента «ГЕОЛЕКС®», кородревесной смеси и трав-рекультивантов в почве, загрязненной нефтью.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектом исследования была нефтезагрязненная почва на территории демонтированного резервуарного парка (рис. 1). Площадь участка загрязненной нефтью почвы для проведения опытно-промышленного эксперимента составила 100 м².

Описание применяемых материалов в технологии рекультивации. Биопрепарат «БИОТРИН» состоит из нетоксичного симбиотического альго-бактериально-дрожжевого консорциума: дрожжей *Rhodotorula glutinis* Fresen, Harrison, 1928, штамм VKM Y-2998D; бактерий *Pseudomonas yamanorum* Migula, 1894, штамм VKM B-3033D; микроводорослей *Chlorella vulgaris* Beijer f. *globosa* V. Andr. (Beijer, 1890) IPPAS-2024. Лабораторные эксперименты выявили эффективность очистки воды, почвы, щебеночного балласта от нефти и НП с применением биопрепарата

«БИОТРИН». Биопрепарат «БИОТРИН» увеличивал деструкцию углеводов по сравнению в вариантами без обработки: в воде на 54 – 92% от 3 до 14 суток (Нефтеокисляющий биопрепарат..., 2019), в почве на 35 – 86% от 7 до 30 суток, в щебеночном балласте на 87 – 99% до 15 мин (Способ очистки отходов..., 2020).



Рис. 1. Вид экспериментального участка и схема отбора проб
Fig. 1. A view of the experimental plot and the sampling scheme

Биогеосорбент «ГЕОЛЕКС®» представляет собой штаммы биопрепарата «БИОТРИН», иммобилизованные на глауконитовом сорбенте. Биогеосорбент зарекомендовал себя в лабораторных и промышленных экспериментах как эффективное средство для ремедиации водных, почвенных объектов от НП и в технологии очистки щебеночного балласта. Биогеосорбент «ГЕОЛЕКС®» увеличивал разложение углеводов по сравнению с контрольными образцами: в воде на 37 – 76% от 4 до 14 суток (Нефтеокисляющий биопрепарат..., 2019), в почве на 43 – 95% от 14 до 60 суток (Щемелинина и др., 2022), в щебеночном балласте на 82 – 93% до 15 минут (Способ очистки отходов..., 2020).

Кордревесная смесь – хорошо разложенный почвоподобный органический материал, отобранный со склада коры, возрастом более 60 лет со следующими эколого-агрохимическими свойствами: $pH_{(вод.)}$ 8.15, $pH_{(сол.)}$ 7.56; массовая доля азота общего – 6300 мг/кг; подвижных соединений фосфора (в пересчете на P_2O_5) – 7000 мг/кг, калия (в пересчете на K_2O) – 1030 мг/кг, Mg – 3500 мг/кг, Ca – 130 000 мг/кг. Общее микробное число в кордревесной смеси достигало 1.41×10^6 КОЕ/г.

Виды *трав-рекультивантов* для посева, подобранные в соответствии с рекомендациями зональной системы земледелия (Melekhina et al., 2020), обладали до-

статочной устойчивостью к содержащимся в почве загрязнителям, быстрым ростом, надежным вегетативным или семенным размножением. При использовании в целях фитомелиорации выделяли пионерные виды – однолетники и растения с коротким циклом развития, способствующие быстрому захвату территории, так как они обладают низкими конкурентными свойствами в фитоценозе, и со временем замещаются на аборигенные виды, более приспособленные к климатическим и почвенным условиям. Для тяжелых суглинистых почв были выбраны мятлик луговой *Poa pratensis* Linnaeus, 1753 (норма высева 40 – 80 кг/га), овес *Avena sativa* Linnaeus, 1753 (норма высева 200 кг/га), канареечник тростниковидный *Phalaris arundinacea* Linnaeus, 1753 (норма высева 25 – 60 кг/га) и клевер гибридный *Trifolium hybridum* Linnaeus, 1753 (норма высева 30 – 60 кг/га).

Внесение *минеральных удобрений* предполагает обеспечение нефтеокисляющих микроорганизмов и трав-рекультивантов усвояемыми формами азота, фосфора, калия и требуется практически на всех почвах. В технологию рекультивации экспериментального участка было выбрано минеральное удобрение – нитроаммофоска (NPK 16:16:16).

Образец условно незагрязненной почвы (УНП) был отобран в 200 м от экспериментального участка – на не загрязненной нефтью территории, покрытой смешанным березово-сосновым лесом. Фрагменты мохового и лишайникового покрова представлены видами рода *Polytrichum*, *Hylocomium*, преобладали многолетние травы (родов *Carex*, *Cirsium*, *Deschampsia*, *Trifolium*). В понижениях рельефа – сообщества болотных осок.

Отбор проб почвы проводился методом конверта (см. рис. 1) согласно нормативным документам, регламентирующим процедуру, за 30 суток до начала эксперимента, в день постановки эксперимента, спустя 14 и 60 суток ($n = 3$).

Количественный химический анализ был проведен в экоаналитической лаборатории Института биологии Коми НЦ УрО РАН с применением следующих методов: НП – гравиметрическим методом, РД 52.18.647-2003 (Методические..., 2003); pH водной вытяжки – потенциометрическим методом (Методика..., 2018). Для биохимических анализов за основу были взяты методы почвенной энзимологии (Хазиев, 2005).

Статистическую обработку полученных данных проводили непараметрическими методами с помощью пакета программ STATISTICA 10.0 (StatSoft Inc., OK, USA). Параметры выборки представлены в виде медианы, 1 и 3 квартилей, минимальных и максимальных значений выборки и отражены на диаграммах размаха.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка рекультивационного потенциала почв участка. Рекультивационным работам на территории демонтированного резервуарного парка предшествовало изучение рекультивационного потенциала почвенно-грунтового слоя, который включает оценку состояния техногенной поверхности, степени зарастания, определение концентрации загрязнения по фрагментам участка, глубины загрязнения, наличие поверхностной нефти, pH почвы, определение биологической активности.

Площадь участка для проведения опытно-промышленного эксперимента была огорожена сигнальными лентами.

Оценка состояния техногенной поверхности и степени зарастания. В почвенно-грунтовом покрове, трансформированном в результате хозяйственной деятельности, преобладали в основном отложения тяжелого механического состава – суглинки, обуславливающие низкую скорость разложения поллютантов. Особенностью участка являлось отсутствие растительного покрова и плодородного слоя для проведения биоремедиации. Исходные растительные сообщества по периметру участка замещены разреженными пионерными группировками сорняков и кустарников. Ближе к точкам 1 и 2 участка наблюдали переувлажнение, сопровождавшееся накоплением воды с образовавшейся на ней нефтяной пленкой в неровностях рельефа, наполняемых посредством поверхностного стока.

Определение концентрации загрязнения по фрагментам участка, глубины загрязнения, pH почвы. Концентрация нефти УНП согласно обзору А. А. Околеловой с соавторами (2019) оценивалась как средняя, а в почве, отобранной на экспериментальном участке, – как очень высокая. Содержание НП в почве эксперимента в 3.5 – 5.7 раза превышало содержание нефтепродуктов УНП (рис. 2). Глубина проникновения нефти в сформированной на техногенном ландшафте почве составляла 0.15 – 0.25 м. Небольшой фактический размер «ящика» (50%) объема выборки и распределение, близкое к нормальному, в точках свидетельствует о консервации поллютанта в пределах территории обследования.

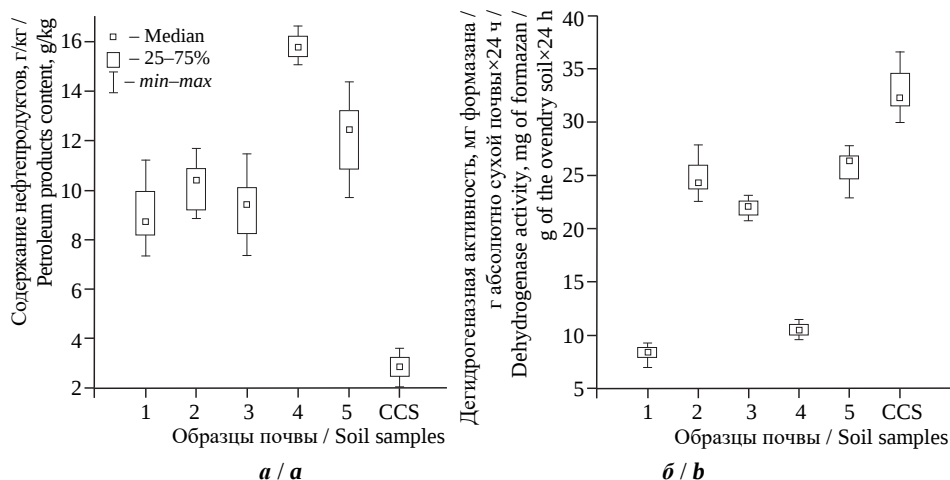


Рис. 2. Содержание нефтепродуктов (а) и дегидрогеназная активность (б) в образцах почвы при оценке рекультивационного потенциала участка; CCS – образец условно незагрязненной почвы

Fig. 2. The total petroleum hydrocarbon content (a) and the dehydrogenase activity (b) in soil samples while assessing the recultivation potential; CCS is a sample of conditionally clean soil

Уровень кислотности в почве экспериментального участка был нейтральный (рН 6.86 – 7.32), благоприятный для использования микроорганизмов в составе биопрепарата и биогеосорбента.

Определение биологической активности. Изучение ферментативной активности широко используется в экологическом мониторинге при анализе содержания НП и других техногенных органических веществ (Поляк, Сухаревич, 2020). Распад нефти и нефтяных углеводородов в почве связан с окислительно-восстановительными процессами, происходящими при участии различных ферментов (Рябцева и др., 2016). По результатам ранее проведенных исследований на загрязненных НП почв северных территорий установлен индикаторный фермент – дегидрогеназа, наиболее остро реагирующий на любые процессы, происходящие в почве (Anchugova et al., 2016).

Дегидрогеназная активность в загрязненных нефтью образцах почвы, отобранных за 30 суток до постановки эксперимента, варьировала от 8.4 до 25.8 мг формазана / 1 г абсолютной сухой почвы за 24 часа по вариантам и не превышала уровень УНП (см. рис. 2).

Технология рекультивации экспериментального участка. На основании комплексной оценки экспериментального нефтезагрязненного участка (100 м²) была разработана биотехнология очистки почвы, включающая последовательные производственные этапы рекультивации, проведенные друг за другом в течение 3 суток.

1-й этап (в первые сутки): биостимуляция: внесение кородревесной смеси (покрытие загрязненного участка не менее 5 см) → биоаугментация: внесение биопрепарата «БИОТРИН» в количестве 2 дм³ → внесение минеральных удобрений в количестве 10 кг;

2-й этап (на третьи сутки): биоаугментация: внесение активированного биогеосорбента «ГЕОЛЕКС®» в количестве 10 кг → проведение вспашки мотокультиватором на глубину 0.3 м → посев смеси семян трав-рекультивантов в количестве 10 кг.

Расчет вносимых количеств кородревесной смеси, биопрепарата «БИОТРИН», биогеосорбента «ГЕОЛЕКС®» был сделан исходя из оценки рекультивационного потенциала почвы участка: концентрации загрязнения (18.4 г/кг), глубины загрязнения (0.15 – 0.25 м), рН почвы (6.86 – 7.32), дегидрогеназной активности и оценки результатов предыдущих исследований (Нефтеоокисляющий биопрепарат..., 2019; Способ очистки отходов..., 2020; Щемелинина и др., 2022; Anchugova et al., 2016; Shchemelinina et al., 2019; Melekhina et al., 2020).

Свежеприготовленная суспензия биопрепарата «БИОТРИН» (активные живые клетки) ускоряла процессы деструкции нефтепродуктов в почве, активировала почвенную микробиоту, приводила к уменьшению срока очистки и снижению количества вносимого биогеосорбента «ГЕОЛЕКС®». Биогеосорбент «ГЕОЛЕКС®» выполнял 2 функции – сорбирование НП на глауконите и их деструкция иммобилизованными клетками микроорганизмов. Биопрепарат и биогеосорбент, дополняя друг друга, показали высокую нефтеоокисляющую способность в относительно короткие сроки.

Результаты внедрения биотехнологии. Кородревесная смесь на основе КДО оценивалась в качестве структуратора нефтяного шлама в лабораторном эксперименте. При внесении в шлам кородревесной смеси происходило разрыхление почвы, повышение дегидрогеназной активности по сравнению с нефтезагрязненным контрольным вариантом в 1.5 раза, снижение содержания НП на 34.5%, стимулирование роста овса. Исходя из результатов, кородревесная смесь включена в биотехнологию очистки экспериментального участка для разрыхления суглинистой почвы тяжелого гранулометрического состава с целью улучшения воздушного режима, привнесения микрофлоры, стимулирующей рост и развитие растений овса.

Эффективность очистки почвы экспериментального участка на территории демонтированного резервуарного парка от НП за 14 суток составила 18 – 37.5% (рис. 3). Содержание НП в почве имеет асимметричное распределение, дающее основание полагать, что на 14-е сутки произошла мобилизация загрязнения. Эффективность очистки почвы за 60 суток составила 92 – 95% (см. рис. 3).

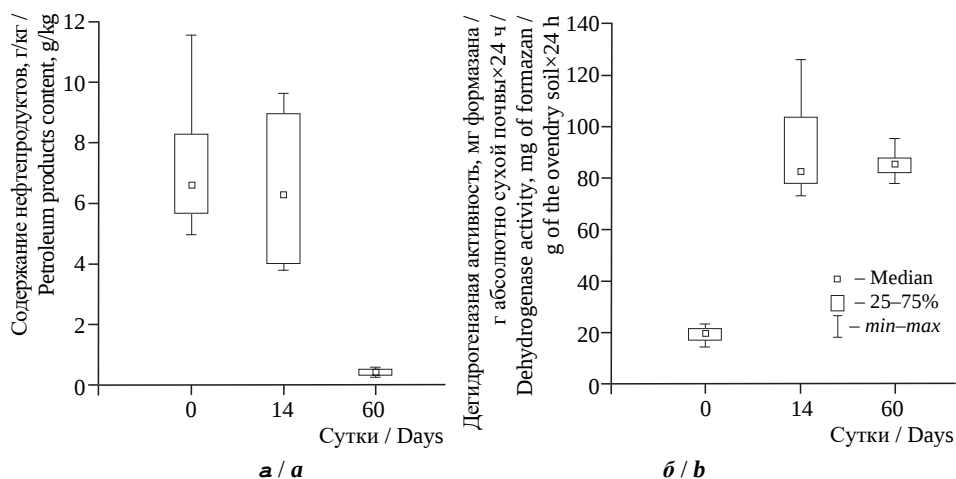


Рис. 3. Содержание нефтепродуктов (а) и дегидрогеназная активность (б) в почве участка в ходе эксперимента

Fig. 3. The total petroleum hydrocarbon content (a) and the dehydrogenase activity (b) in soil samples during the experiment

Дегидрогеназная активность отражала интенсивность процессов окисления нефти. В ответ на инокуляцию микроорганизмов биопрепарата, биогеосорбента и активацию почвенной микробиоты на экспериментальном участке активность почвенной дегидрогеназы повышалась в 4 – 6 раз (см. рис. 3). Процессы дегидрирования к концу эксперимента усиливались, что свидетельствовало об интенсивных процессах трансформации в почве.

Проективное покрытие смесью трав-рекультивантов экспериментального участка составило 85% за 60 суток (рис. 4).

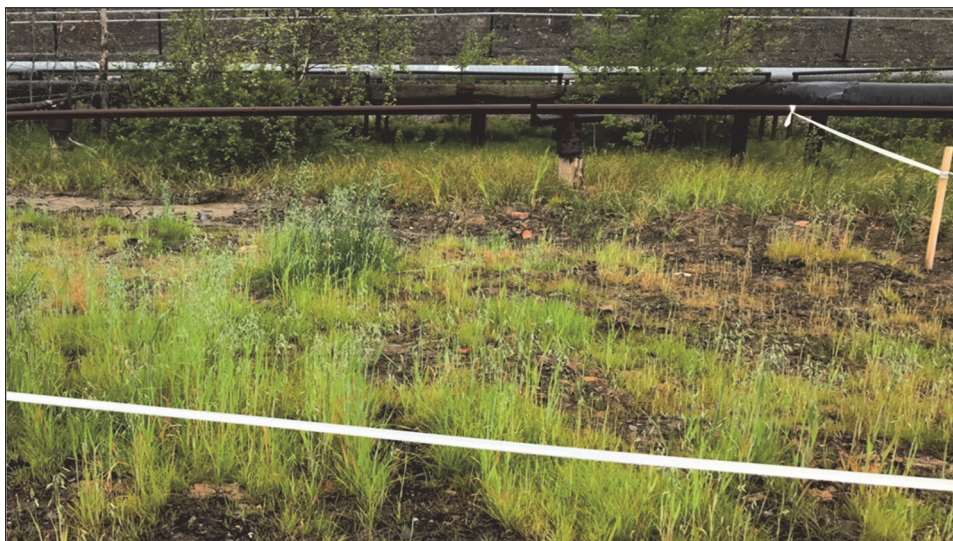


Рис. 4. Проектное покрытие экспериментального участка

Fig. 4. Plant cover of the experimental plot

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что предложенная комплексная биотехнология очистки загрязненной нефтью почвы участка на территории демонтированного резервуарного парка эффективна: снижение содержания НП в почве за 60 суток составило 92 – 95%. Повышение дегидрогеназной активности почвы свидетельствовало об интенсивных процессах окисления органического загрязнителя. Проектное покрытие высеванными травами рекультивированного участка спустя 60 суток достигло 85%, что характеризует очищенную почву как не оказывающую ингибирующего действия на рост и развитие растений.

Рекомендовано внедрение разработанной комплексной биотехнологии очистки нефтезагрязнённой почвы на территориях со сходными показателями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Артюх Е. А., Мазур А. С., Украинцева Т. В., Костюк Л. В. Перспективы применения биосорбентов для очистки водоемов при ликвидации аварийных разливов нефти // *Известия СПбГТИ(ТУ)*. 2014. № 26. С. 58 – 66.

Емельянова Е. К., Алексеев А. Ю., Шестопалов А. М., Забелин В. А. Экологические подходы к биорекультивации нефтезагрязненных грунтов и водоемов в условиях Сибири // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2015. Т. 2, № 3. С. 70 – 73.

Коришнюкова Т. Ю., Четвериков С. П., Бакаева М. Д., Кузина Е. В., Рафикова Г. Ф., Четверикова Д. В., Логинов О. Н. Микроорганизмы в ликвидации последствий нефтяного загрязнения (обзор) // *Прикладная биохимия и микробиология*. 2019. Т. 55, № 4. С. 338 – 349. <https://doi.org/10.1134/S0555109919040093>

Нефтеокисляющий биопрепарат, биосорбент на его основе и способ его приготовления: пат. 2703500 Рос. Федерация: МПК, C12N 1/26, C02F 3/34, B09C 1/10, C02F 101/32, C12R 1/38,

C12R 1/89 / Щемелинина Т. Н., Анчугова Е. М.; заявитель и патентообладатель Т. Н. Щемелинина, Е. М. Анчугова. № 2018120922; заявл. 06.06.18; опубл. 17.10.19, Бюл. № 29. 14 с.

Околелова А. А., Капля В. Н., Лапченков А. Г. Оценка содержания нефтепродуктов в почвах // Научные ведомости БелГУ. Серия: Естественные науки. 2019. Т. 43, № 1. С. 76 – 86.

Поляк Ю. М., Сухаревич В. И. Почвенные ферменты и загрязнение почв: биодegradация, биоремедиация, биоиндикация // Агрохимия. 2020. № 3. С. 83 – 93.

РД 52.18.647-2003. Определение массовой доли нефтепродуктов. Методика выполнения измерений гравиметрическим методом. Методические указания. Сыктывкар: Комитет государственной статистики Республики Коми, 2003. 10 с.

Рябцева Н. Д., Никитина В. С., Абдуллин М. И., Багаутдинов Р. Ф., Кадилов А. А. Изучение каталитических процессов микробного окисления нефтяных углеводородов // Вестник Башкирского университета. 2016. Т. 21, № 2. С. 308 – 313.

Способ очистки отходов щебневого балласта, применяемого на железной дороге: пат. 2711162 Рос. Федерация: МПК, E01B 27/06, B08B 3/08 / Некрасова В. Н., Щемелинина Т. Н., Анчугова Е. М.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «БИОЭКОБАЛАНС». № 2019102645; заявл. 30.01.19; опубл. 15.01.20, Бюл. № 2. 10 с.

Ташинова И. Н. Исследование экологической безопасности структуратора на основе отходов строительства и сноса, содержащих amino- и нитроароматические соединения // Вестник Технологического университета. 2017. Т. 20, № 14. С. 139 – 142.

Трусей И. В., Гуревич Ю. Л., Ладыгина В. П. Влияние агрохимической обработки нефтезагрязненной почвы на динамику численности мезофильных и психрофильных микроорганизмов // Поволжский экологический журнал. 2016. № 4. С. 467 – 475.

ФР.1.31.2018.31639. Почвы, грунты, донные отложения, торф. Методика измерений pH, удельной электропроводности водной вытяжки и массовой доли плотного остатка в исследуемых материалах. Методика измерения. Сыктывкар, 2018. 27 с.

Хазиев Ф. Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 252 с.

Щемелинина Т. Н., Анчугова Е. М., Котова О. Б. Биогeосорбент «Гeолекс»: внедрение технологий в практику // Вестник геонаук. 2022. № 4. С. 51 – 56. <https://doi.org/10.19110/geov.2022.4.3>

Anchugova E. M., Melekhina E. N., Markarova M. Yu., Shchemelinina T. N. Approaches to the assessment of the efficiency of remediation of oil-polluted soils // Eurasian Soil Science. 2016. Vol. 49, no. 2. P. 234 – 237. <https://doi.org/10.1134/S1064229316020022>

Klepikov V. P., Klepikova L. V., Shahbaz M. Oil tank farm emission trends of Russian refineries // Energy Reports. 2022. Vol. 8, suppl. 9. P. 1236 – 1244. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.07.068>

Lawniczak Ł., Woźniak-Karczewska M., Loibner A. P., Heipieper H. J., Chrzanowski Ł. Microbial degradation of hydrocarbons – basic principles for bioremediation: A review // Molecules. 2020. Vol. 25, no. 4. Article number 856. <https://doi.org/10.3390/molecules25040856>

Melekhina E. N., Kanev V. A., Markarova M. Yu., Nadezhkin S. M., Nowakowski A. B., Taskaeva A. A., Tarabukin D. V., Velegzhaninov I. O., Rasova E. E. Assessment of the state of oil-polluted ecosystems of European Subarctic: A multidisciplinary approach // Theoretical and Applied Ecology. 2020. № 2. P. 123 – 129. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-2-123-129>

Shchemelinina T. N., Gömze L. A., Kotova O. B., Ibrahim J. E. F. M., Shushkov D. A., Harja M., Ignatiev G. V., Anchugova E. M. Clay- and zeolite-based biogeo sorbents: modelling and properties // Épitóanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials. 2019. Vol. 71, no. 4. P. 131 – 137. <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2019.23>

Original Article

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-246-256>

Integrated biotechnology for oil-polluted soil cleanup

T. N. Shchemelinina , E. M. Anchugova

*Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
28 Kommunisticheskaya St., Syktyvkar 167982, Russia*

Received: 5 October 2022 / revised: 27 January 2023 / accepted: 26 February 2023 / published: 21 June 2023

Abstract. Technologies with integrated resource applications are probable solutions to the problem of soil pollution with oil and petroleum products. Based on our assessment of the potential for the recultivation of a plot on the territory of a rigged out reservoir tank storage, a biotechnology, including both forestry residues and biological agents capable of enhancing soil remediation processes, was developed. After having been applied, the technology comprising the BIOTRIN biopreparation, the GEOLEX® biogeosorbent, bark-and-wood waste and seeds to promote revegetation showed a soil cleanup efficiency of 92–95% for 60 days. The dehydrogenase activity increased, confirming intense processes of pollutant oxidation. After 60 days, the plant cover with sown herbs reached 85%, which characterized the purified soil as having no inhibitory effect on the growth and development of plants.

Keywords: soil, oil pollution, biopreparation, biogeosorbent, bark-and-wood waste, herbs to promote revegetation, cleanup technology

Funding. The study was supported by the State Task of the Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences on “Scientifically Justified Biotechnologies to Improve the Ecological Situation and Human Health in the North” (no. 1021051101411-4-1.6.23), BIOECOBALANCE LLC.

For citation: Shchemelinina T. N., Anchugova E. M. Integrated biotechnology for oil-polluted soil cleanup. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2023, no. 2, pp. 246–256 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2023-2-246-256>

REFERENCES

Artyukh E. A., Mazur A. S., Ukrainitseva T. V., Kostyuk L. V. Looking forward to biorebents future application for ponds’ cleaning after emergency oil spills. *Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*, 2014, no. 26, pp. 58–66 (in Russian).

Emel’yanova E. K., Alekseev A. Yu., Shestopalov A. M., Zabelin V. A. Ecology-based approaches to bio-remediation of oil-contaminated soil and water in Siberia. *Interexpo GEO-Siberia*, 2015, vol. 2, no. 3, pp. 70–73 (in Russian).

Korshunova T. Yu., Chetverikov S. P., Bakaeva M. D., Kuzina E. V., Rafikova G. F., Chetverikova D. V., Loginov O. N. Microorganisms in the elimination of oil pollution consequences (review). *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 344–354. <https://doi.org/10.1134/S0003683819040094>

Oil-Oxidizing Biopreparation, Biosorbent Based on it and Method for its Preparation. Patent RU 2703500. Int. Cl. C12N 1/26, C02F 3/34, B09C 1/10, C02F 101/32, C12R 1/38, C12R 1/89.

 *Corresponding author.* Laboratory of Biochemistry and Biotechnology of the Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Tatiana N. Shchemelinina: <https://orcid.org/0000-0002-4052-6424>, shchemelinina@ib.komisc.ru; Elena M. Anchugova: <https://orcid.org/0000-0002-7912-3518>, anchugova@ib.komisc.ru.

Shchemelinina T. N., Anchugova E. M.; Proprietor: Tatyana N. Shchemelinina, Elena M. Anchugova. Application: 2018120922, Published: 06.06.2018, Date of publication 17.10.2019, Bulletin no. 29. 14 p. (in Russian).

Okolelova A. A., Kaplya V. N., Lapchenkov A. G. Evaluation of oil content in soils. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences Series*, 2019, vol. 43, no. 1, pp. 76–86 (in Russian).

Polyak Yu. M., Sukharevich V. I. Soil enzymes and soil pollution: Biodegradation, bioremediation, bioindication. *Agrokhimiya*, 2020, no. 3, pp. 83–93 (in Russian).

RD 52.18.647-2003. *Opreделение massovoj doli nefteproduktov. Metodika vypolneniya izmenij gravimetricheskim metodom. Metodicheskie ukazaniya* [Regulation Document 52.18.647-2003. Determination of the Total Petroleum Hydrocarbons Mass Concentration. The Measurement Procedure Based on the Gravimetric Method]. Syktyvkar, State Statistic Committee of the Republic of Komi Publ., 2003. 10 p. (in Russian).

Ryabtseva N. D., Nikitina V. S., Abdullin M. I., Bagautdinov R. F., Kadirov A. A. The research on catalytic processes of the microbial oxidation of petroleum hydrocarbons. *Bulletin of Bashkir University*, 2016, vol. 21, no. 2, pp. 308–313 (in Russian).

Method of Cleaning Crushed Ballast Wastes Used on Railway. Patent RU 2703500. Int. Cl. E01B 27/06, B08B 3/08. Nekrasova V. N., Shchemelinina T. N., Anchugova E. M.; Proprietor: Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennostyu “BIOEKOBALANS”. Application: 2019102645, Published: 30.01.2019, Date of publication 15.01.2020, Bulletin no. 2. 10 p. (in Russian).

Tashkinova I. N. The research on the environmental compatibility of the structure-forming agent based on mineral construction and demolition waste containing aminoaromatics and nitroaminoaromatics. *Herald of Technological university*, 2017, vol. 20, no. 14, pp. 139–142 (in Russian).

Trusey I. V., Gurevich Y. L., Ladygina V. P. Influence of the agrochemical treatment of oil-contaminated soil on the abundance dynamics of mesophilic and psychrophilic microorganisms. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2016, no. 4, pp. 467–475 (in Russian).

FR.1.31.2018.31639. *Pochvy, grunty, donnye otlozheniya, torf. Metodika izmerenij pH, udel'noj elektroprovodnosti vodnoj vytyazhki i massovoj doli plotnogo ostatka v issleduemyh materialah. Metodika izmereniya* [Federal Register 1.31.2018.31639. Soils, Sediments, Peat. The Measurement Procedure for pH, Specific Conductivity of a Soil-Water Extract and Dissolved Solids in Sampling Materials. The Measurement Procedure]. Syktyvkar, 2018. 27 p. (in Russian).

Khaziev F. Kh. *Metody pochvennoi enzimologii* [Methods of Soil Enzymology]. Moscow, Nauka Publ., 2005. 252 p. (in Russian).

Shchemelinina T. N., Anchugova E. M., Kotova O. B. The Geolex biogeosorbent: Practical application of technologies. *Vestnik of Geosciences*, 2022, no. 4, pp. 51–56. <https://doi.org/10.19110/geov.2022.4.3>

Anchugova E. M., Melekhina E. N., Markarova M. Yu., Shchemelinina T. N. Approaches to the assessment of the efficiency of remediation of oil-polluted soils. *Eurasian Soil Science*, 2016, vol. 49, no. 2, pp. 234–237. <https://doi.org/10.1134/S1064229316020022>

Klepikov V. P., Klepikova L. V., Shahbaz M. Oil tank farm emission trends of Russian refineries. *Energy Reports*, 2022, vol. 8, suppl. 9, pp. 1236–1244. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.07.068>

Ławniczak Ł., Woźniak-Karczevska M., Loibner A. P., Heipieper H. J., Chrzanowski Ł. Microbial degradation of hydrocarbons – basic principles for bioremediation: A review. *Molecules*, 2020, vol. 25, no. 4, article number 856. <https://doi.org/10.3390/molecules25040856>

Melekhina E. N., Kanev V. A., Markarova M. Yu., Nadezhkin S. M., Nowakowski A. B., Taskaeva A. A., Tarabukin D. V., Velegzhaninov I. O., Rasova E. E. Assessment of the state of oil-polluted ecosystems of European Subarctic: A multidisciplinary approach. *Theoretical and Applied Ecology*, 2020, no. 2, pp. 123–129. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-2-123-129>

Shchemelinina T. N., Gömze L. A., Kotova O. B., Ibrahim J. E. F. M., Shushkov D. A., Harja M., Ignatiev G. V., Anchugova E. M. Clay- and zeolite-based biogeosorbents: modelling and properties. *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*, 2019, vol. 71, no. 4, pp. 131–137. <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2019.23>