Геоэкология

DOI: 10.35634/UdSU.2026.17.15.010

УДК 622

Е. А. Гудкова, В. Я. Соловьева, Т. С. Титова

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЗЕМЕЛЬ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ КАМЕННОУГОЛЬНОЙ СМОЛОЙ, МИКРООРГАНИЗМАМИ

Аннотация В настоящей работе представлена инновационная технология восстановления загрязненных углеводородами каменноугольной смолы почв с использованием консорциума микроорганизмов Arthrobactersp., Bacillusbrevis («Ленойл-СХП») и Acinetobactersp, («Дестройл»), а также фермента липазы («Липрозим»). Основное внимание уделено детальной характеристике основных компонентов каменноугольной смолы, как высокотоксичного углеводородного загрязнителя. Целью исследования является подбор рационального сочетания нескольких эффективных бактериальных материалов на основе высокоактивных штаммов микроорганизмов и ферментов, способных восстановить нарушенные углеводородами каменноугольной смолы территории. Для достижения поставленных целей использованы комплексные физико-химические методы анализа, включая высокоэффективную жидкостную хроматографию (ВЭЖХ) и газовую хроматографию с пламенно-ионизационным детектором (ГХ-ПИД), что позволило провести количественный анализ компонентного состава водных вытяжек. Результаты исследования продемонстрировали значительное усиление очищающей способности биоматериала при введении фермента липазы, это способствовало эффективной утилизации углеводородного загрязнения. Выявлены оптимальные композиции микроорганизмов и фермента, обеспечивающие максимальную нейтрализацию углеводородных загрязнений. Результатом исследования стала разработанная технология для экологически безопасного восстановления загрязненных почв, что имеет важное значение в промышленной экологии.
Ключевые слова: каменноугольная смола, углеводороды, ферменты биодеградации, биопрепарат, рекультивация.

Для цитирования: Гудкова Е. А., Соловьева В. Я., Титова Т. С., Эффективность восстановления земель, загрязненных каменноугольной смолой, микроорганизмами // Управление техносферой: электрон. журнал, 2026. Т.9. Вып.1. С. 145–160. DOI: 10.35634/UdSU.2026.17.15.010

Введение

Приоритетными в современной природоохранной сфере считаются задачи обеспечения устойчивого функционирования и восстановления экосистем,

нарушенных в процессе осуществления хозяйственной деятельности человека, в том числе связанной с добычей, транспортировкой, хранением углеводородов. Большинство углеводородов в природе Земли встречаются в сырой нефти и продуктах переработки каменного угля. Анализируя мировую обеспеченность топливными ресурсами, важно подчеркнуть, что основные загрязнители земли: нефть, природный газ и продукты переработки каменного угля. Анализ данных обеспеченности мира топливными ресурсами представлен в табл. 1.

Таблица 1

Обеспеченность мира топливными ресурсами

Топливные ресурсы (мир в целом)	**Нефть**	**Природный газ**	**Каменный уголь**
Запасы	140 млрд. т.	150 трлн. куб. м.	1100 млрд. т.
Добыча	3450 млн. т.	220 млрд. куб. м.	4625 млн. т.
Обеспеченность, лет	40	680	238

В настоящее время в области рекультивации земель практически нет исследований обезвреживания разливов каменноугольной смолы, производство и транспортировка которой увеличивается с каждым годом, в то же время работ по рекультивации земель, зараженных нефтепродуктами проведено огромное количество. Проведя сравнительный анализ каменноугольной смолы и нефти, важно отметить, что в их составах содержатся: летучие ароматические углеводороды (бензол и гомологи бензола, толуол, ксилол); полициклические ароматические углеводороды (бензопирен); парафины, смолы и асфальтены, фенолы (производные ароматических углеводородов). Следовательно, методы рекультивации земель, загрязненных нефтью и нефтепродуктами, предположительно могут снизить техногенную нагрузку на загрязнения каменноугольной смолой [1].

Каменноугольный деготь - каменноугольная смола представляет собой вязкую субстанцию черного цвета с характерным фенольным запахом и является побочным уникальным продуктом коксования каменных углей, не имеющим аналогов. Это сложная смесь более 1000 компонентов: ароматических, полициклических углеводородов и гетероциклических соединений, из которых на сегодняшний день идентифицировано около 50%. Для разделения смолы на фракции применяется метод ректификации, позволяющий выделить отдельные компоненты, обладающие различными физико-химическими свойствами. Фракционный состав каменноугольной смолы представлен в табл. 2.

Таблица 2

Фракционный состав каменноугольной смолы

Фракция	**Основные компоненты**	**Предел выкипания, ^{0}C**
Легкая	бензол, толуол, пиридин, ксилол, сероуглерод и другие	80-160
Фенольная	фенолы, нафталин, гомологи бензола, а также пиридиновые и хинолиновые основания и другие	165-210
Нафталиновая	нафталин, тионафтен, индол, метилнафталин и другие	216-230
Поглотительная	нафталин и его гомологи, аценафтен, флуорен, дибензофуран, индол, дифенил, хинолин и другие	235-300
Антраценовая	Антрацен, карбазол, фенантрен, пирен и другие	280-360
Пек каменноугольный	Парафины, пирен, хризен и другие	Выше 360

Каменноугольная смола – важный источник сырья для химической промышленности, цветной металлургии, дорожного строительства, сельского хозяйства и многих других сфер, и вместе с этим является одним из самых опасных для человека и окружающей среды. Восстановление природных объектов, загрязненных высокотоксичными углеводородами, характеризуется

низкой скоростью био- и фотодеградации, является серьезной экологической проблемой, угрожающей распространением в окружающей среде углеводородов, нарушая тонкие механизмы функционирования почв: окислительно-восстановительные процессы, активность почвенных ферментов и биоразнообразие микробных комплексов. Это приводит к нарушению экологического баланса в наземных биомах, трансформации трофических звеньев естественных биогеоценозов или их гибели.

Использование ароматических соединений микроорганизмами

Устойчивость соединений с ароматическим ядром была впервые установлена химиками в период производства красителей из каменноугольной смолы во второй половине XIX века. Это открытие стало важным этапом в развитии химической промышленности и исследования в области ароматических соединений. Процесс биодеградации ароматических соединений, таких как фенол и толуол, способность микроорганизмов легко разрушать бензольное кольцо по сравнению с сильными химическими реагентами, используемыми для расщепления ароматических ядер, вызывает восхищение и в настоящее время. Разложение углеводородов и ароматических веществ микроорганизмами обычно происходит в аэробных условиях, и наиболее часто механизм разложения связан с гидроксилированием, где ключевыми промежуточными продуктами до разрыва кольца являются *о* -дигидроксисоединения. Карбоциклические соединения, такие как нафталин, фенантрен, производные дифенила, также восприимчивы к микробному окислению. Возможное разложение этих соединений и их производных детально изучали Александр М. и Люстигманн Б., используя метод, основанный на отсутствии характерного спектра поглощения ультрафиолетового излучения, после разрыва бензольного кольца, чтобы выявить биологическое разложение таких соединений в почве. Этот метод

позволил детально изучить механизмы биодеградации и определить оптимальные условия для микробного разложения ароматических соединений, что важно для исследований в области утилизации сложных веществ при рекультивации загрязненных территорий углеводородным сырьем промышленными биопрепаратами [2].

В процессе рекультивации загрязненных территорий используют два метода биодеградации углеводородных загрязнений: активизация естественного биоценоза через создание оптимальных условий для его роста и интродукция активных микроорганизмов с последующим обеспечением благоприятных условий для их метаболизма. Выбор биологического материала зависит от возраста разлива и степени загрязнения, почвенных и климатических условий местности. На рекультивируемых площадях ведут мониторинг эффективности процесса биодеградации, отбираются пробы для проведения микробиологических исследований и физико-химических анализов на остаточное содержание загрязнителя [3].

Цель исследования

Подбор одного или рациональное сочетание нескольких эффективных бактериальных материалов на основе высокоактивных штаммов микроорганизмов и ферментов, способных восстановить нарушенные углеводородами каменноугольной смолы территории.

Исследование направленно на перспективы совместного действия подобранных микроорганизмов [4].

Материалы и методика исследования

На основании анализа известных данных, для исследований выбран консорциум из следующих микроорганизмов, обладающих значительным потенциалом биоремедиации углеводородов (основные характеристики приведены в табл. 3.).

Таблица 3

Характеристика микроорганизмов

Биоматериал	**«Липрозим»**	**«Ленойл-СХП»**	**«Дестройл»**
Углеводород окисляющие микроорганизмы	Липолитический фермент липазы	Bacilliusbrevis, Arthrobactersp	Acinetobacter sp.
форма биопрепарата	сухой, жидкий	сухой, суспензия	сухой, паста
утилизация загрязнителя	расщепление и фракционировани е жиров	углеводороды	углеводороды нефти
длительность очистки	-	60 дней	90 дней
pH	от 6,0–10,0	4,5-8,5	4,5-8,5
Т ^{0}C	+20 до +70^{0}C	от +3 до +40°C	от -4º до +42ºC
эффективность очистки (%)	ферментная активность 2000000 ед/г.	60-80%	50-70%
Токсичность	не токсичен	не токсичен	не токсичен
Срок хранения, мес.	12	12	12

Для проведения исследований, используя литературные данные выбраны биопрепараты, применяемые для рекультивации от углеводородного загрязнения почв. Выбор микроорганизмов, входящих в состав данных биопрепаратов, обусловлен их высокими показателями эффективности и экономической выгодой по сравнению с аналогами. –

- «Ленойл-СХП» – биопрепарат разработан в Институте Биологии Уфимского Научного Центра Российской Академии Наук, состоит из клеток микроорганизмов с углеводородокисляющей активностью и концентрацией не менее 108 клеток на грамм препарата, содержит аэробные микроорганизмы-деструкторы углеводородов Bacillus brevis и Arthrobacter sp.
- «Дестройл» – биопрепарат разработан на Бердском заводе биологических препаратов, содержит аэробные микроорганизмы-деструкторы углеводородов *Acinetobacter sp.* род грамотрицательных аэробных бактерий, способных разлагать токсичные для многих микроорганизмов вещества и расти

на ароматических углеводородах (бензоле, ксилоле, толуоле), в 5-7 раз ускоряя естественные процессы деструкции, и утилизирует углеводородное сырье за 90 дней до 70%.

- «Липрозим» разработан в Республике Беларусь ООО «Фермент», представляет собой фермент липазы, полученной глубинной ферментацией Aspergillus Niger, применяется в составах моющих средств для удаления жировых и масляных загрязнений.

Важно отметить, что микроорганизмы Bacillusbrevis и Acinetobactersp. природные продуценты липазы, введение которой, как добавку к бактериям на начальном этапе очистки загрязненных почв значительно активизируют процесс деструкции углеводородов, давая микроорганизмам время адаптироваться к новым климатическим условия, что значительно уменьшает временной интервал биодеградации углеводородов каменноугольной смолы [6]. Все использованные биопрепараты просты в применении**,** на загрязнённую почву наносят рабочий раствор из суспензии, которую готовят непосредственно перед применением путем вливания или распыления на пятно углеводородов с помощью любых предназначенных для этого устройств или вручную (при температуре почвы +5С +40°С). Расход препаратов зависит от степени загрязненности поверхности грунта. Продолжительность очистки грунта от углеводородов каменноугольной смолы 90 дней**.** Степень очистки зависит от исходной величины загрязнения и механического состава грунта [7].

На I этапе научно-исследовательской работы проведены комплексные физико-химические исследования 2-х проб каменноугольной смолы на определение: летучих ароматических соединений (бензол, толуол, этилбензол ксилолы), методом газожидкостной хроматографии равновесного пара с помощью хроматографа «Кристалл-2000М» с дозатором равновесного пара «ДРП-01»; полициклических ароматических углеводородов (нафталин, антрацен) жидкостной хроматографией с флуресцентным детектированием

с помощью хроматографа «Shimazu GC-20»; фенолов – флуориметрическим методом на приборе «Флюорат 02-3М», пробы каменноугольной смолы – с небольшим количеством твердых частиц. Результаты физико-химических исследований представлены в табл. 4.

Таблица 4

Содержание основных компонентов каменноугольной смолы

Номер пробы	Фенолы г/кг (%)	Нафталин, мг/кг (%)	Антрацен, мг/кг (%)	Бензол, мг/кг (%)	Толуол мг/кг (%)	Этилбензол, мг/кг (%)	М,П–ксилолы, мг/кг (%)	О-ксилол мг/кг (%)
1	34,15 (3,415)	46,6 (0,00466)	16,3 (0,00163)	26,5 (0,0265)	829 (0,0829)	416 (0,0416)	2437 (0,2437)	687 (0,0687)
2	38,75 (3,875)	19,3 (0,00193)	13,2 (0,00132)	248 (0,00248)	827 (0,0827)	359 (0,0359)	2543 (0,2543)	672 (0,0672)

На II этапе эксперимента проведены исследования на модельных опытах в лабораторных условиях гравиметрическим методом. Объекты исследования - загрязненные каменноугольной смолой пробы песка. Для микробиологической рекультивации использовали биопрепараты: «Дестройл» и «Ленойл-СХП», концентрация загрязнения 2,5% - 5%. Подготовка рабочей суспензии из сухой формы биопрепаратов осуществлялась согласно инструкции по их применению.

В течение 90 дней проводились наблюдения. Фиксировали: изменение цвета песка, маслянистость, вес. Проба сравнения – загрязненная проба без добавления биоматериала. Вес проб в одном случае уменьшался за счет естественной деградации, во втором – за счет работы микроорганизмов.

На основе проведенных исследований по рекультивации проб, загрязненных углеводородами каменноугольной смолы, можно сделать

следующие выводы: биопрепараты, «Ленойл-СХП» и «Дестройл» содержат в своем составе микроорганизмы Bacillus brevis, Arthrobacter sp., Acinetobacter sp., обладающие высокой углеводородокисляющей активностью, они способны выжить и адаптироваться при концентрациях загрязнения каменноугольной смолой до 5%. При совместном применении смеси биопрепаратов «Ленойл-СХП» и «Дестройл» процесс очищения песка от углеводородов каменноугольной смолы протекает эффективнее, результаты экспериментов представлены на рис. 1-3.

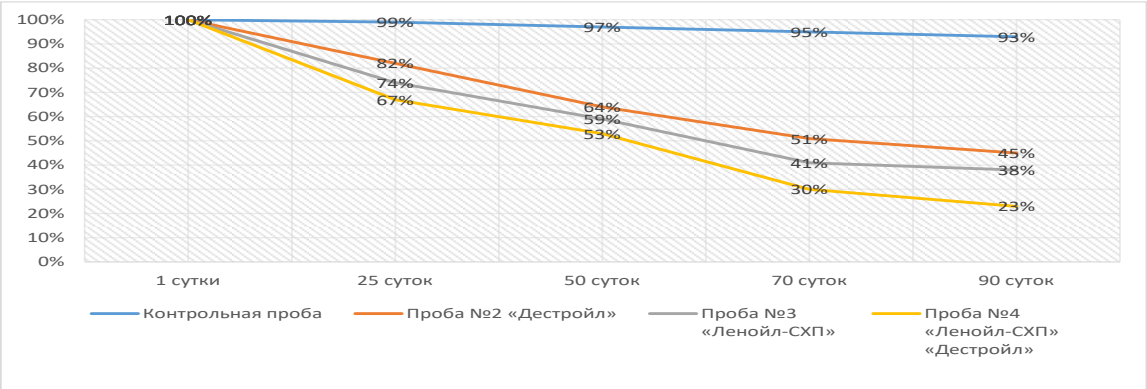


Рис. 1. Динамика окисления углеводородов каменноугольной смолы с концентрацией загрязнения 2,5%.

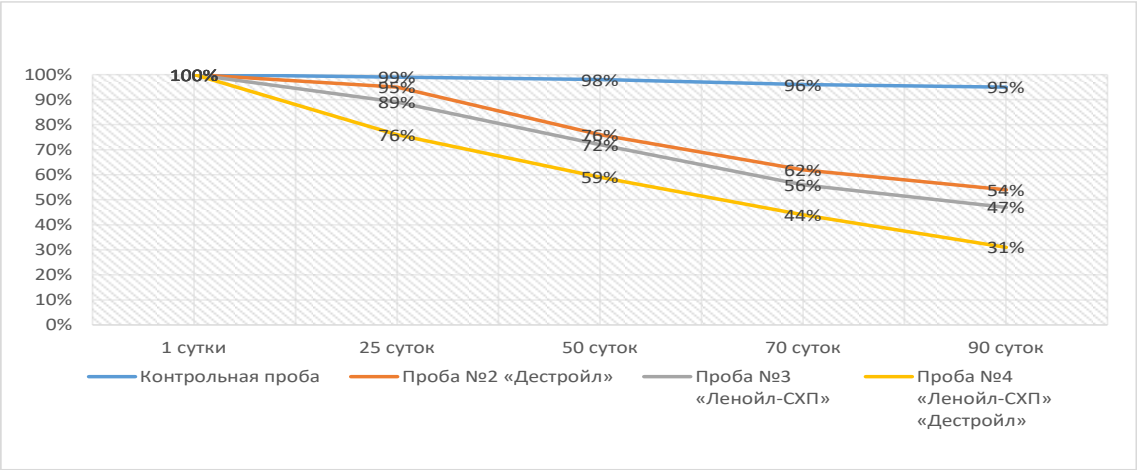


Рис. 2. Динамика окисления углеводородов каменноугольной смолы с концентрацией загрязнения 3%.

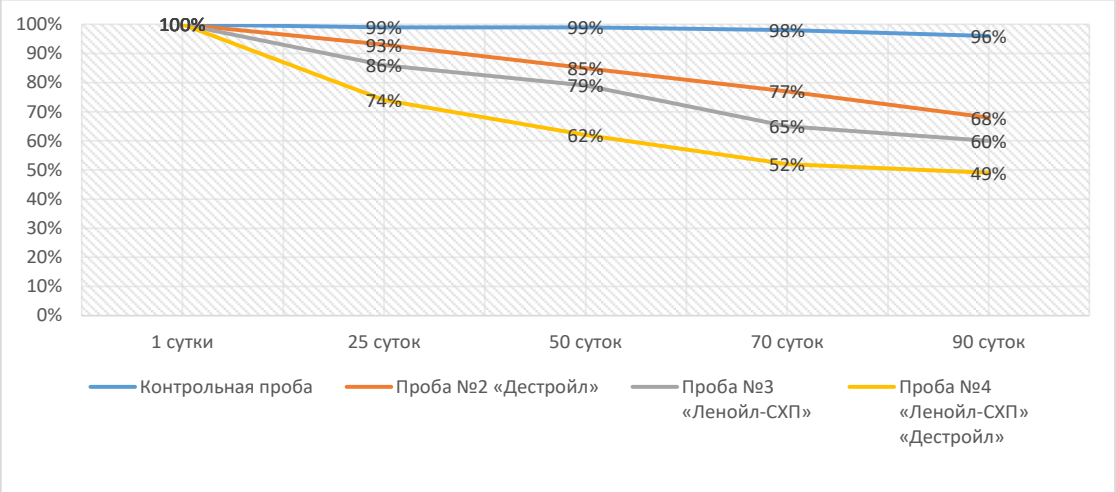


Рис. 3. Динамика окисления углеводородов каменноугольной смолы с концентрацией загрязнения 5%.

На III этапе эксперимента проведены физико-химические исследования эффективности применения выбранного состава микроорганизмов для деградации основных компонентов каменноугольной смолы.

Исследования проводились по аттестованным методикам, методами ВЭЖХ (высокоэффективной жидкостной хроматографии); ГХ-ПИД (газовой хроматографии с пламенно-ионизационным детектором). Объект исследования в экспериментах - загрязненный каменноугольной смолой песок с концентрацией 5%. Для микробиологической рекультивации использовали биопрепараты: «Дестройл», «Ленойл-СХП» (состав 1:1) и «Липрозим» 1% от количества вносимого биоматериала [8]. Подготовка рабочей суспензии из сухой формы биопрепаратов осуществлялась согласно инструкции по применению. Длительность проведения эксперимента 90 дней.

Оценка эффективности совместного действия микроорганизмов составы 1-3:

- СОСТАВ №1 –проба песка, загрязненная каменноугольной смолой без индукции биоматериала;

- СОСТАВ №2 – песок, загрязненный каменноугольной смолой, биопрепарат «Дестройл», «Ленойл-СХП»;
- СОСТАВ №3– песок, загрязненный каменноугольной смолой, биопрепарат «Дестройл», «Ленойл-СХП», «Липрозим».

Результаты физико-химического количественного анализа концентраций компонентного состава углеводородов каменноугольной смолы в исследуемых образцах после обработки составами 1-3 представлены на рис. 4.

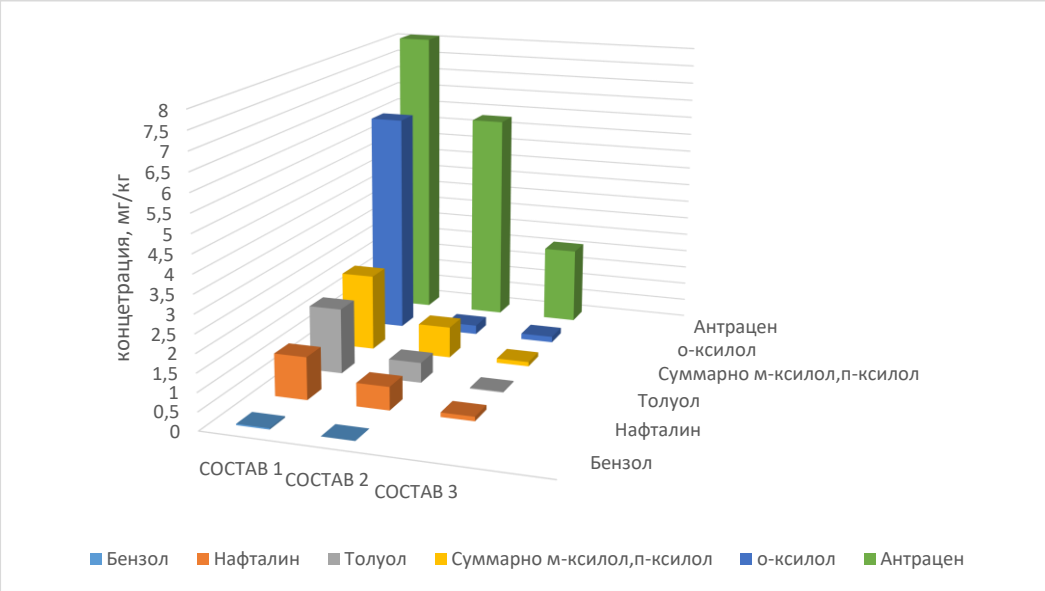


Рис. 4. Диаграмма деградации углеводородов составами 1-3

Выводы

Микроорганизмы, входящие в состав биопрепаратов, способны эффективно разлагать углеводороды различной структуры, включая линейные и циклические соединения. Они активно проникают в толщу углеводородного слоя и способствуют восстановлению процессов аэрации.

Микроорганизмы совместно с ферментами ускоряют разложение каменноугольной смолы более чем в два раза. Микроорганизмы *Bacilliusbrevis*, *Arthrobactersp.*, *Acinetobactersp и фермент липазы* «Липрозим» способны адаптироваться к токсичным условиям и метаболизируют углеводороды при

концентрации загрязнения до 5%. Эти штаммы способны расти на загрязненных углеводородами каменноугольной смолы территориях, оставляя нетоксичные метаболиты и легко разлагаемые белки, которые усваиваются аборигенной микрофлорой, восстанавливая экосистему. Консорциум рекомендуется для рекультивации земель, загрязненных каменноугольной смолой, включая ликвидацию аварийных ситуаций. Данный подход целесообразно использовать на втором этапе рекультивации после проведения механической очистки основного объема углеводородного загрязнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаджиев И. М., Курачев В. М., Андроханов В. А. Стратегия и перспективы решения проблем рекультивации нарушенных земель. Новосибирск: ЦЭРИС, 2001. 31 с.
2. Биотехнологические методы очистки окружающей среды от техногенных загрязнений / О. Н. Логинов, Н.Н, Силищев, Т. Ф. Бойко, Н. Ф. Галимзянова. Уфа: гос. изд. научно-тех. литературы «Реактив», 2000. 100 с.
3. Корнелле Т.В. Принципы и методы интенсификации биологического разрушения углеводородов в окружающей среде (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. 1996. 32. № 6. С.579 – 585.
4. Рогозина Е. А. Сравнительная характеристика отечественных биопрепаратов, предлагаемых для очистки почв и грунтов от загрязнения нефтью и нефтепродуктами // Нефтегазовая геология. Теория и практика 2010. Т.5. №3. С. 1 – 18.
5. Сравнительная характеристика липаз и перспективы разработки новых липолитических ферментных препаратов для пищевой промышленности / А. А. Толкачева, Е.С. Железняк, Д.А. Черенков, О.С. Корнеева // Актуальная биотехнология. 2016. № 3 (18). С. 177 – 178.
6. Гудкова Е. А. Каменноугольная смола – высокотоксичный углеводородный загрязнитель окружающей среды. // Геоэкохимия защиты литосферы: сб. трудов конф. СПб.: Петербургский гос. университет путей сообщения Императора Александра I, 2020. С. 28.
7. Полевой эксперимент по очистке почв от нефтяного загрязнения с использованием углеводородокисляющих микроорганизмов / Д.Г. Сидоров, И.А. Борзенков,

Р.Р. Ибатулин, Е.И. Милехина, И.Т. Храмов, С. С. Беляев, М.В. Иванов // Прикладная биохимия и микробиология. 1997. Т.33. №5. С. 497 – 502.

8. Гудкова Е. А. Разработка технологий обезвреживания песчаного грунта наливных станций от каменноугольной смолы // Геоэкохимия защиты литосферы: сб. трудов конф. СПб.: Петербургский гос. университет путей сообщения Императора Александра I, 2020. С. 68.

Поступила в редакцию: 12.11.2025

Сведения об авторах

Гудкова Елена Александровна
*а*ссистент, ФГБОУ ВО Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 9, Россия.
E-mail: gea-surgut@yandex.ru

Соловьева Валентина Яковлевна
д.т.н., профессор, зав. каф. «Инженерная химия и естествознание», ФГБОУ ВО Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 9, Россия.
E-mail: 9046185117@mail.ru

Титова Тамила Семеновна
д.т.н., профессор, зав. каф. «Техносферная и экологическая безопасность», ФГБОУ ВО Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Московский проспект, д. 9, Россия.
E-mail: titova@pgups.ru

E. A. Gudkova, V. Y. Solovyova, T. S. Titova

EFFICIENCY OF RESTORATION OF LANDS CONTAMINATED WITH COAL TAR BY MICROORGANISMS

Annotation This paper presents an innovative technology for the restoration of soils contaminated with coal tar hydrocarbons using a consortium of microorganisms Arthrobacter sp., Bacillusbrevis ("Lenoyl-SKhP") and Acinetobacter sp. ("Destroyl"), as well as the enzyme lipase ("Liprozim"). The main attention is paid to the detailed characterization of the main components of coal tar as a highly toxic hydrocarbon pollutant. The aim of the study is to select a rational combination of several effective bacterial materials based on highly active strains of microorganisms and enzymes capable of restoring territories disturbed by coal tar hydrocarbons. To achieve the set goals, complex physicochemical methods of analysis were used, including high-performance liquid chromatography and gas chromatography with a flame ionization detector, which made it possible to carry out a quantitative analysis of the component composition of aqueous extracts. The results of the study demonstrated a significant enhancement of the cleaning ability of the biomaterial upon the introduction of the lipase enzyme; this contributed to the effective utilization of hydrocarbon pollution. Optimal compositions of microorganisms and the enzyme ensuring maximum neutralization of hydrocarbon pollutants have been identified. The result of the study was a developed technology for the environmentally safe restoration of contaminated soils, which is of great importance in industrial ecology.
***Keywords*:** coal tar, hydrocarbons, enzymes, biodegradation, biopreparation, reclamation.

For citation: Gudkova E. A., Solovyova V. Ya., Titova T. S., [Efficiency of restoration of lands contaminated with coal tar by microorganisms] *Upravlenie tekhnosferoi,* 2026, vol. 9, issue 1, pp. 145–160. DOI: 10.35634/UdSU.2026.17.15.010. (In Russ.).

REFERENCES

1. Gadzhiev I. M., Kurachev V. M., Androkhanov V. A. *Strategiya i perspektivy resheniya problem rekul'tivatsii narushennykh zemel'* [Strategy and Prospects for Solving the Problems of Land Reclamation]. Novosibirsk: TSERIS, 2001, 31 p. (In Russ.).
2. Loginov O.N., Silishchev N. N., Boyko T. F., Galimzyanova N. F. *Biotekhnologicheskie metody ochistki okruzhayushchei sredy ot tekhnogennykh zagryaznenii* [Biotechnological methods of environmental purification from anthropogenic pollution]. Ufa: Publ., gos. izd. nauchno-tekh. literatury «ReaktiV», 2000, 100 p. (In Russ.).
3. Coronelli T.V. Printsipy i metody intensifikatsii biologicheskogo razrusheniya uglevodorodov v okruzhayushchei srede (obzor) [Principles and Methods of Intensifying the Biological Destruction of Hydrocarbons in the Environment (Review)]. *Prikladnaya biokhimiya i*

mikrobiologiya [*Applied Biochemistry and Microbiology*], 1996, 32, no. 6, pp. 579 – 585. (In Russ.).

4. Rogozina E. A. Sravnitel'naya kharakteristika otechestvennykh biopreparatov, predlagaemykh dlya ochistki pochv i gruntov ot zagryazneniya neft'yu i nefteproduktami [Comparative characteristics of domestic biopreparations proposed for the purification of soils and subsoils from oil and petroleum products pollution]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika* [*Oil and Gas Geology. Theory and Practice*], 2010, vol.5, no.3, p. 1–18. (In Russ.).
5. Tolkacheva A.A. Sravnitel'naya kharakteristika lipaz i perspektivy razrabotki novykh lipoliticheskikh fermentnykh preparatov dlya pishchevoi promyshlennosti [Comparative characteristics of lipases and prospects for the development of new lipolytic enzyme preparations for the food industry]. *Aktual'naya biotekhnologiya* [*Actual Biotechnology*], 2016, no. 3 (18), pp. 177 – 178. (In Russ.).
6. Gudkova E. A. Kamennougol'naya smola – vysokotoksichnyi uglevodorodnyi zagryaznitel' okruzhayushchei sredy [Coal Tar - a Highly Toxic Hydrocarbon Environmental Pollutant]. *Geoekokhimiya zashchity litosfery* [*Geoecochemistry of lithosphere protection*]. St. Petersburg: Peterburgskii gos. universitet putei soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 2020, 28 p. (In Russ.).
7. Sidorov D.G. Polevoi eksperiment po ochistke pochv ot neftyanogo zagryazneniya s ispol'zovaniem uglevodorodokislyayushchikh mikroorganizmov [Field experiment on soil purification from oil pollution using hydrocarbon-oxidizing microorganisms]. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya* [*Applied Biochemistry and Microbiology*], 1997, vol.33, no.5, pp. 497 – 502. (In Russ.).
8. Gudkova E. A. Razrabotka tekhnologii obezvrezhivaniya peschanogo grunta nalivnykh stantsii ot kamennougol'noi smoly [Development of technologies for neutralizing sandy soil at filling stations from coal tar]. *Geoekokhimiya zashchity litosfery* [*Geoecology of Lithosphere*] Protection St. Petersburg: Peterburgskii gos. universitet putei soobshcheniya Imperatora Aleksandra I, 2020, P.68. (In Russ.).

Received: 12.11.2025

About the Authors

Gudkova Elena Aleksandrovna
Assistant, Head of the Department of Engineering Chemistry and Natural Sciences, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Moskovsky Prospekt 9, St. Petersburg, Russia.
E-mail: gea-surgut@yandex.ru

Solovyova Valentina Yakovlevna
Dr. of Engineering, Professor, Head of the Department of Engineering Chemistry and Natural Sciences, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Moskovsky Prospekt 9, St. Petersburg, Russia.
E-mail: 9046185117@mail.ru

Titova Tamila Semenovna
Dr. of Engineering, Professor, Head of the Department of Technosphere and Environmental Safety, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Moskovsky Prospekt 9, St. Petersburg, Russia.
E-mail: titova@pgups.ru