ЭКОБИОТЕХ
ISSN 2618-964X http://ecobiotech-journal.ru

УДК 631.4 UDC 631.4

БИОРЕМЕДИАЦИЯ ПОЧВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ НЕФТЬЮ В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИЙНОГО РАЗЛИВА

Егорова Д.О.*, Патрушева А.А.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

*E-mail: daryao@rambler.ru

Аннотация

В статье представлены результаты исследования эффективности биоремедиации нефтезагрязненной почвы поселка Юг (Пермский край) с использованием коммерческого биопрепарата «Bionex Oil Solvent» и некоммерческого штамма *Rhodococcus opacus* KT112-7. Методом газовой хроматографии-масс-спектрометрии проведен анализ содержания некоторых групп углеводородов (алканы, цикланы, арены) до и после обработки почвы биологическими агентами. Установлено, что штамм KT112-7 демонстрирует более высокую эффективность в деградации углеводородов (45–52%), особенно алифатических фракций (44–60%, от начального содержания алканов). Препарат «Bionex Oil Solvent» снижает содержание нефтяных углеводородов в целом на 34–39%, проявляет более высокую активность в отношении цикланов (27–38%), чем штамм KT112-7 (11–22%). Штамм KT112-7 не оказывает существенного влияния на концентрацию исследованных металлов в нефтезагрязненной почве, в то время как внесение биопрепарата «Bionex Oil Solvent» приводит к повышению концентрации Na, Ca, Ni и Mn. Таким образом, для биоремедиации исследованной почвы более перспективным является применение штамма *R. opacus* KT112-7.

Ключевые слова

Rhodococcus opacus KT112-7 ◆ биоремедиация ◆ биопрепараты ◆ деградация углеводородов ◆ нефтезагрязненные почвы

Поступила в редакцию: 01.08.2025
Принято в печать: 23.09.2025

BIOREMEDIATION OF OIL-CONTAMINATED SOILS FROM ACCIDENTAL SPILLS

Egorova D.O.*, Patrusheva A.A.

Perm State National Research University, Perm, Russia

*E-mail: daryao@rambler.ru

Abstract

This study investigated the efficacy of bioremediation of oil-contaminated soil from the settlement of Yug (Perm Krai, Russia) using the commercial bioproduct "Bionex Oil Solvent" and the non-commercial strain *Rhodococcus opacus* KT112-7. Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) was employed to analyze the concentrations of selected hydrocarbon groups (alkanes, cycloalkanes, and arenes) before and after treatment with the biological agents. The results indicated that strain KT112-7 exhibited superior efficacy in hydrocarbon degradation (45%–52%), particularly for aliphatic fractions (44%–60% reduction in initial alkane content). "Bionex Oil Solvent" reduced overall petroleum hydrocarbon content by 34%–39%, demonstrating greater activity towards cycloalkanes (27%–38%) compared with that of strain KT112-7 (11%–22%). Strain KT112-7 did not significantly alter the concentration of the investigated metals in the oil-contaminated soil, whereas the application of "Bionex Oil Solvent" led to increased concentrations of Na, Ca, Ni, and Mn. Therefore, the application of *R. opacus* KT112-7 shows great promise for soil bioremediation.

Keywords

Rhodococcus opacus KT112-7 ◆ bioremediation ◆ biopreparations ◆ hydrocarbon degradation ◆ oil-contaminated soils

Received: 01.08.2025
Accepted: 23.09.2025

Цитировать | Cite as

DOI: 10.31163/2618-964X/2025-27 EDN: NHOYLE

ВВЕДЕНИЕ

Нефтедобывающая промышленность занимает ведущее место в структуре топливно-энергетического комплекса, играя важнейшую роль в обеспечении глобальной экономики энергетическими ресурсами. Вместе с тем, интенсивная эксплуатация нефтяных месторождений неизбежно приводит к негативным экологическим последствиям, среди которых особую проблему представляет загрязнение почвенного покрова углеводородами

[Шеховцева 2016; Wu *et al*. 2024]. Ярким примером подобного загрязнения является ситуация в посёлке Юг (Пермский край, Россия), расположенном в районе с высокой промышленной нагрузкой, где был зафиксирован локальный разлив нефтепродуктов, потребовавший проведения восстановительных мероприятий. В подобных случаях перспективным решением представляется применение биоремедиации — технологии, использующей способность специализированных микроорганизмов-деструкторов к биохимическому разложению нефтяных соединений при минимальном воздействии на окружающую среду [Качмазов 2017; Wu *et al*. 2024]. Согласно исследованиям, данный метод является экономически выгодной альтернативой традиционным физико-химическим способам рекультивации.

Наибольшей активностью в разложении нефтяных углеводородов обладают бактерии родов *Rhodococcus*, *Pseudomonas*, *Arthrobacter* и *Micrococcus*. Особый интерес представляют штаммы рода *Rhodococcus*. В ряде работ отмечается, что бактерии данного рода обладают способностью разлагать химические соединения различных органических групп, а также проявляют активность в отношении неорганических соединений, в том числе – металлов [Nazari *et al*. 2022]. Анализ данных, представленных в статьях основных научных издательств показал, что способностью разлагать нефтяные углеводороды обладают представители различных видов рода *Rhodococcus*. Chen с коллегами (2023) показал, что штамм *Rhodococcus* sp. OBD-3 разлагает 60.6–86.6 % нефтяных углеводородов при начальной концентрации 1г/л. Штамм *Rhodococcus qingshengii* 7B утилизировал 41–62% сырой нефти при начальной концентрации 20 г/л в зависимости от продолжительности культивирования [Iminova *et al*. 2022]. Высокую активность в отношении как сырой нефти (97 %), так и входящих в ее состав алканов (95 %) проявлял штамм *Rhodococcus erythropolis* LP27217 [D'Ugo *et al*. 2025]. Выделенный из нефтезагрязненной почвы штамм *Rhodococcus indonesiensis* SARSHI1 утилизировал до 90 % нефтяных углеводородов [Zaman et al., 2025]. В работе [Sun *et al.* 2025] показано, что применение в технологии биоремедиации нефтезагрязненной почвы штамма *Rhodococcus hoangii* S4, иммобилизованного на органическом носителе, существенно повышало эффективность очистки почвы от нефтяных углеводородов.

Помимо индивидуальных культур бактерий, для удаления из окружающей среды нефти применяются бактериальные ассоциации, в состав которых входят бактерии нескольких родов. Удельная скорость деструкции нефти ассоциацией, состоящей из представителей *Rhodococcus* и *Bacillus* была в 3 раза выше, чем при применении данных штаммов индивидуально [Yan *et al.* 2024]. Применение бактериального консорциума, содержащего представителей родов *Pseudomonas*, *Stenotrophomonas*, *Ochrobactrum* и *Microbacterium* обеспечивало за 45 дней очистку почвы от нефтяных углеводородов на 30-89% [Kumari *et al*. 2023]. В работе [Wang *et al*. 2024] описано применение микробной ассоциации на основе штаммов родов *Bacillus*, *Acinetobacter* и *Microbacterium*. Внесение данной ассоциации в почву на разных глубинах, обеспечивало очистку от сырой нефти на 50–63%.

Деструктивная активность микроорганизмов существенно различается в отношении разных фракций нефти: штаммы родов *Arthrobacter* и *Micrococcus* наиболее эффективны против легких нефтяных фракций (*Micrococcus* разлагает до 99% бензина за 30 суток), тогда как для тяжелых фракций требуется применение микробных консорциумов. Например, ассоциация *Gordonia alkanivorans* и *Bacillus* sp. разрушает 58–76% нефти, а консорциум *Ochrobactrum* sp., *Stenotrophomonas maltophilia* и *P. aeruginosa* деградирует до 83,49% сырой нефти [Баландина, Еремченко 2018].

Существенную роль в бактериальной деструкции нефти играет синтез биологически активных поверхностных веществ (рамнолипидов, трегалолипидов), способствующих эмульгированию нефтяных фракций [Al-Dhabaan 2019]. Экспериментально установлено,

что *R. erythropolis* способен утилизировать до 36% нефтяных углеводородов за 14 суток благодаря продукции сукциноилтрегалолипидов, выполняющих функцию биосурфактантов [Al-Dhabaan 2019]. Представители рода *Pseudomonas* (*P. putida, P. fluorescens*) синтезируют поверхностно-активные рамнолипиды, снижающие межфазное натяжение и повышающие доступность углеводородов. В составе микробных ассоциаций эти штаммы демонстрируют деструктивную активность до 76,4%, а штамм *P. aeruginosa* MF069166 способен деградировать до 91% углеводородов сырой нефти благодаря продукции моно- и дирамнолипидов [Rehman *et al.* 2021].

Биохимические механизмы деградации включают окислительные реакции, катализируемые ферментными системами (оксигеназами, дегидрогеназами), что приводит к превращению токсичных соединений в воду, CO_2 и биомассу [Качмазов 2017]. Терминальная алкан монооксигеназа *Rhodococcus* осуществляет окисление н-алканов до жирных кислот с последующим β-окислением, ферменты класса диоксигеназ, в частности бактерий рода *Pseudomonas*, окисляют ароматические фракции нефти [Тишин, Тишина 2021].

Одной из проблем, сопряженной с нефтяным загрязнением почв, является избыточное содержание тяжелых металлов в нефтезагрязненных субстратах. Однако биоремедиация, оснвоанная на применении бактериальных культур позволяет одновременно решать данные проблемы. Так штаммы *Rhodococcus opacus* эффективно поглощают ионы кадмия, свинца, железа, меди, цинка и никеля, а представители *Rhodococcus rhodochrous* – ионы меди, никеля, кадмия, цинка и хрома [Nazari *et al*. 2022]. Извлечение металлов из субстрата происходит за счет механизма биосорбции. Штаммы *Rhodococcus opacus* сорбировали до 280 мг/л металлов (в частности 1,35 мг/л цинка, 129,34 мг/л никеля, 200,80 мг/л кадмия, 280,11 мг/л свинца), при этом эффективность очистки достигала 60% по кадмию и 88% по цинку [Nazari *et al*. 2022].

Цель исследования – оценка биоремедиационного потенциала штамма-деструктора *Rhodococcus opacus* КТ112-7 и коммерческого биопрепарата «Bionex Oil Solvent» в отношении почв, подвергнутых аварийному разливу нефти.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отбор образцов нефтезагрязненных почв произведен в непосредственной близости от п. Юг, Пермского муниципального округа, Пермского края, Россия (рис.1). Населенный пункт расположен в 30 км от города Пермь. Тип почвы характерен для данной местности – дерново-средне-подзолистый. Аварийный разлив сырой нефти был зафиксирован за 2 недели до пробоотбора почв. Визуальные признаки нефтезагрязнения были выражены наличием нефтяной пленки, и присутствием характерного запаха.

Для отбора образцов почвы было выбрано 4 участка (рис. 1). Количество точек отбора было ограничено проведением на загрязненной территории первого этапа рекультивации – механического. Были выбраны наиболее представительные участки, где наблюдались следы нефти. Всего было отобрано 4 почвенных пробы, пронумерованные цифрами от 1 до 4.

Отбор почвенных образцов производили методом конверта, согласно ГОСТ 17.4.4.02-2017. Количество точечных проб соответствовало требованиям ГОСТ 17.4.3.01-2017. Пробы отбирали из верхнего слоя почвы, глубиной до 10 см. Общая масса каждого образца составила 10 кг. Образцы были упакованы в герметичную пластиковую тару.

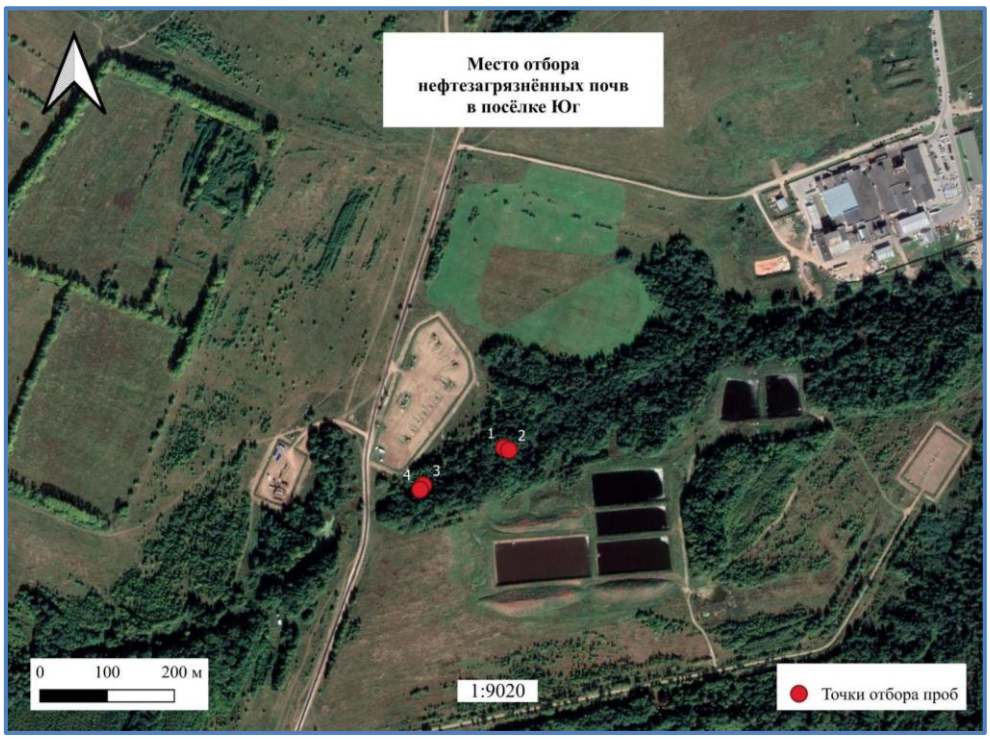

Рис 1. Расположение точек отбора почвенных образцов на территории аварийного нефтяного разлива

Присутствие нефтяных углеводородов в почве оценивали методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием. Пробоподготовку осуществляли согласно требованиям ГОСТ 17.4.4.02-84. Анализ проводили на газовом хроматографе 7010B с масс-селективным детектором 7890B (Agilent, США), при программировании согласно ГОСТ 31953-2012 и ISO 16703-2011. Качественный анализ производили на основе сравнения масс-спектров выявленных соединений и масс-спектров соединений в библиотеке NIST17, входящей в состав программного обеспечения хроматографа.

Наличие тяжелых металлов в образцах анализировали согласно РД 52.18.286-91 на атомно-адсорбционном спектрометре АА-6300 (Shimadzu, Япония). Экстракцию водорастворимых форм металлов проводили из 10 г образца, суспендированного в 125 мл деионизированной воды. Суспензию пропускали через фильтр «синяя лента», фильтрат выпаривали до объема 50 мл при нагревании. После остывания до комнатной температуры фильтрат переносили в мерную пробирку, добавляли 2–3 капли концентрированной азотной кислоты и при необходимости доводили объем фильтрата до метки 50 мл деионизированной водой. В качестве стандартов для определения использовали ГСО 7330-96 (государственный стандартный образец раствора ионов металлов), содержащий алюминий, железо, кадмий, кобальт, магний, медь, молибден, никель, свинец, цинк.

Агентами биоремедиации были выбраны: аэробный бактериальный штамм *Rhodococcus opacus* КТ112-7 (ВКМ Ac-2623D) из рабочей коллекции лаборатории микробиологии техногенных экосистем «ИЭГМ УрО РАН» и коммерческий биопрепарат «Bionex Oil Solvent». Штамм *R. opacus* КТ112-7 , ранее обозначавшийся как *R. wratislaviensis* КТ112-7, обладает биодеградативным потенциалом в отношении широкого спектра органических соединений (осуществляет деструкцию моноароматических соединений, бифенила и его хлор- и гидрокси-производных), а также проявляет биодеградативный потенциал в диапазоне температур +10 - +40ºС [Егорова и др. 2013, 2018; Egorova *et al*. 2020]. Микробиологический препарат «Bionex Oil Solvent» применяется для биоремедиации

нефтезагрязненных почв и водных систем. «Bionex Oil Solvent» представляет собой суспензионный концентрат на основе консорциума из 8 факультативно-анаэробных микроорганизмов, предназначенный для биодеградации углеводородов нефти и ее производных. Препарат по заявлению производителя, демонстрирует высокую эффективность в отношении широкого спектра нефтепродуктов, включая сырую нефть (все фракции), легкие и тяжелые нефтяные фракции, ароматические углеводороды и их производные (https://bionex.pro).

Схема эксперимента по биоремедиации *ex-situ*:

А) Модель «BOS» - Образцы почвы (500 г.) помещали в стерильные контейнеры и увлажняли рабочим раствором препарата «Bionex Oil Solvent», приготовленного согласно рекомендациям производителя. Каждый образец был распределен в 5 контейнеров

Б) Модель «КТ112-7» - Образцы почвы (500 г.) помещали в стерильные контейнеры и увлажняли бактериальной культурой штамма *Rhodococcus opacus* КТ112-7 так, что конечная концентрация культуры клеток составила 10^8 КОЕ/г почвы. Каждый образец был распределен в 5 контейнеров.

В) Модель «Контроль» - Образцы почвы (500 г.) помещали в стерильные контейнеры и увлажняли дистиллированной стерильной водой. Каждый образец был распределен в 5 контейнеров.

Контейнеры были помещены в климатостат с поддержанием температуры +24ºС, относительной влажностью воздуха 60%, режим освещенности 16:8. Период биоремедиации составил 2 месяца (60 сут). Эксперименты *ex-situ* были проведены трижды.

Статистическую обработку данных (n=15 для каждой модели) проводили с использованием стандартного пакета программ MS Excel. При анализе вычисляли среднее арифметическое, стандартное отклонение и ошибку среднего.

РЕЗУЛЬТАТЫ и ОБСУЖДЕНИЕ

В результате анализа состава нефтяного загрязнения исследуемых почвенных образцов установлено, что его основную долю составляют углеводороды, принадлежащие классам алканы, цикланы и арены (рис. 2). Незначительная доля приходилась на серо-,

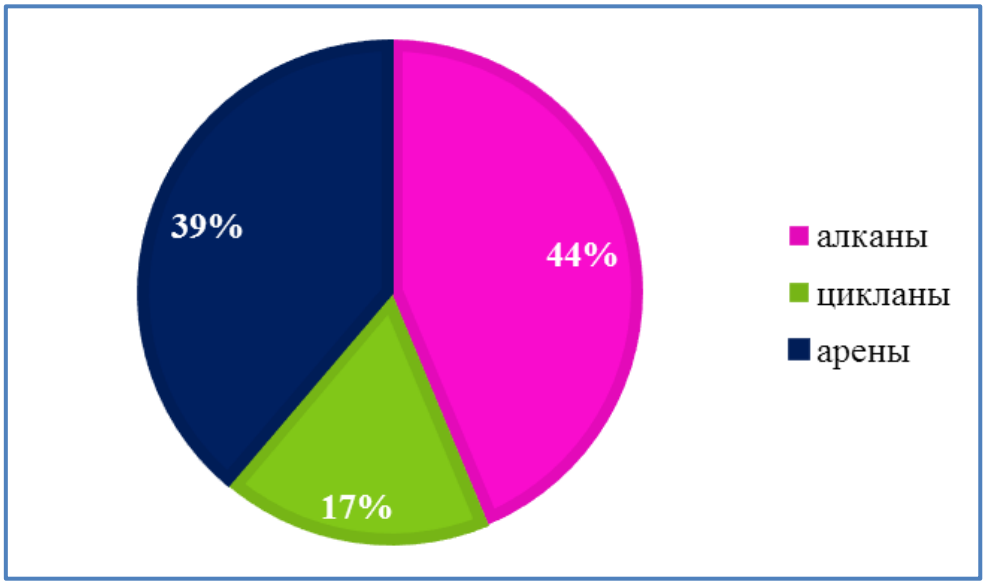

Рис. 2. Соотношение основных групп нефтяных углеводородов, выявленных в загрязнённых почвах

кислород- и азот-содержащие соединения. Такой состав характерен для нефтей парафино-нафтенового ряда [Петров, 1984]

В результате внесения биологических агентов произошло снижение концентрации основных компонентов загрязнителя в исследуемых образцах почвы (рис. 3, 4).

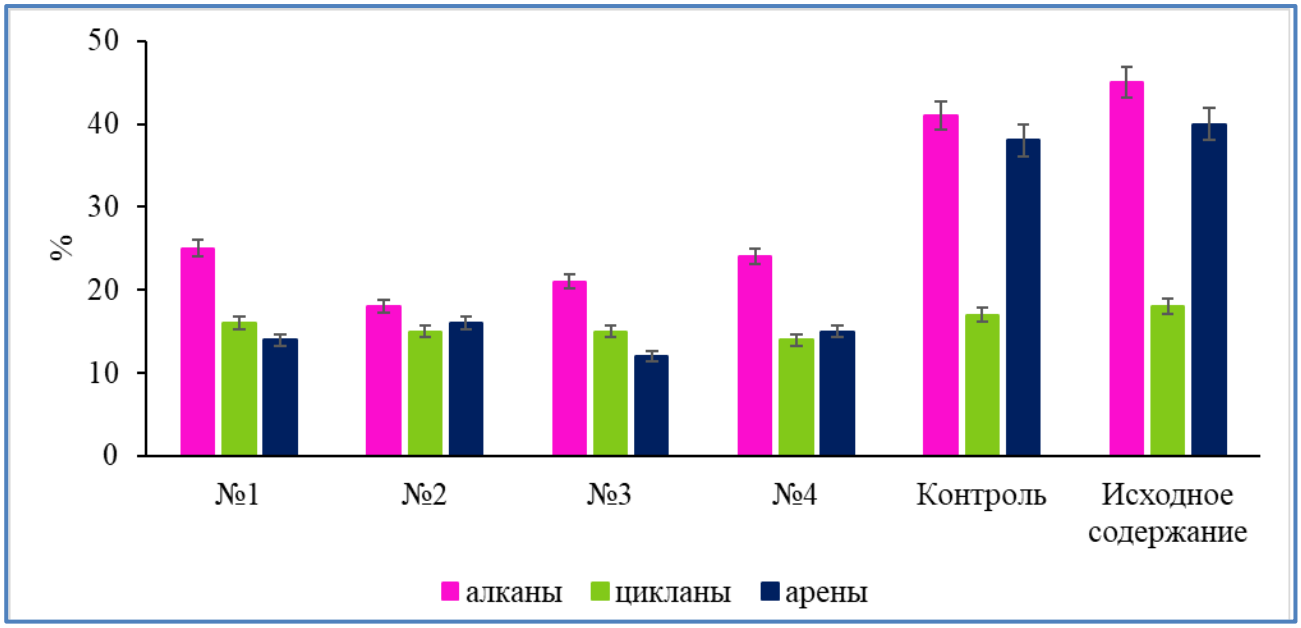

Рис 3. Концентрация основных групп нефтяных углеводородов в почвенных образцах после биоремедиации с применением штамма Rhodococcus opacus KT112-7.

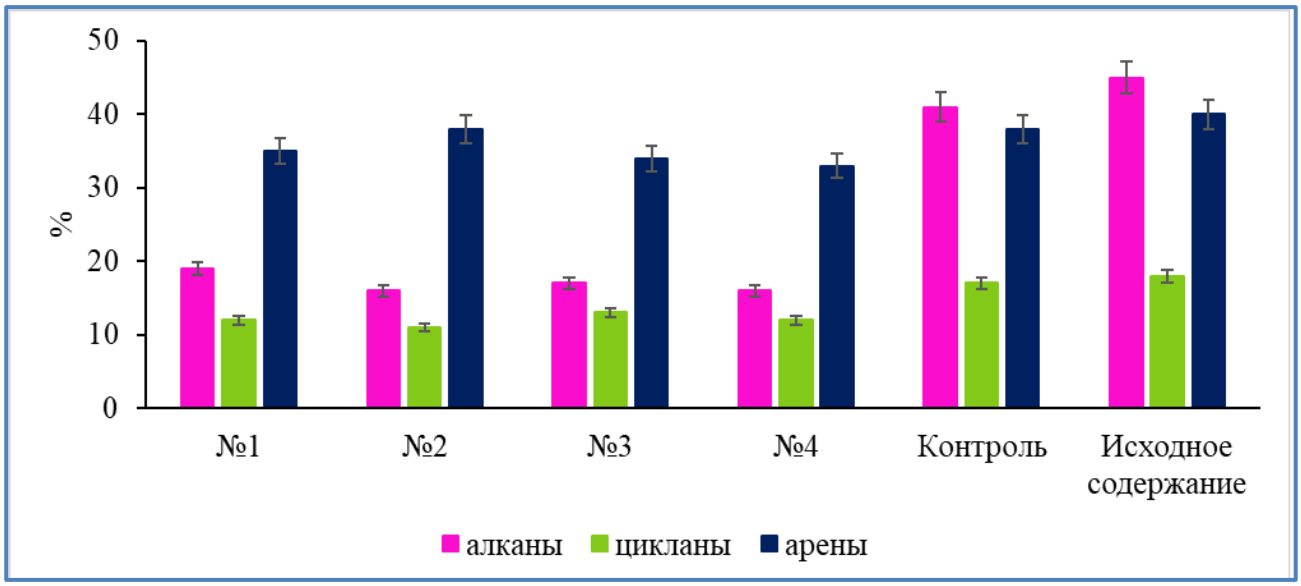

Рис 4. Концентрация основных групп нефтяных углеводородов в почвенных образцах после биоремедиации с применением раствора препарата «Bionex Oil Solvent».

Следует отметить, что в модели «КТ112-7», содержащей штамм *R. opacus* КТ112-7, во всех образцах почвы отмечено существенное снижение группы алканов и аренов. Уровень деструкции данных соединений составил 44–60% для алканов, 62–70% для аренов. При этом деструкция циклaнов варьировала в пределах 11–22 % (рис. 3).

Обработка почвы раствором препарата «Bionex Oil Solvent» привела к существенному снижению концентрации цикланов (27–39%), при этом эффективность деструкции алканов была на уровне, сопоставимом с внесением монокультуры штамма *R. opacus* КТ112-7 (57–64%). Однако препарат «Bionex Oil Solvent» проявил низкую активность в отношении аренов, представленных в составе загрязнителя, эффективность деструкции составила 12,5–17% (рис. 4).

При оценке общего пула компонентов нефтяного загрязнения исследуемой почвы установлено, что снижение концентрации нефтяных углеводородов за 2 месяца эксперимента *ex-situ* с применением штамма *R. opacus* КТ112-7 составило 45–52%, а внесение препарата «Bionex Oil Solvent» обусловило снижение загрязнителя на 34–39%.

Следует отметить, что в контрольной модели, не содержащей биологических агентов, снижение концентрации нефтяных углеводородов составило 4%, что существенно ниже показателей, установленных для моделей «BOS» и «КТ112-7».

Анализ загрязненных почв на наличие металлов показал, что на ряду с металлами щелочной и щелочно-земельной группы, в почве присутствуют тяжелые металлы (рис. 5). В Российской Федерации установлены нормативы предельно допустимых концентраций тяжелых металлов в почвах [СанПиН 1.2.3685-21]. Согласно данных норм, выявленные концентрации тяжелых металлов не являются опасными, так как не превышают значений ПДК.

Анализ модельных почвенных систем показал, что культивирование почвы с биологическими агентами влияет на концентрацию металлов (рис. 5).

Так, через 2 месяца биоремедиации с использованием штамма *R. opacus* КТ112-7 происходит снижение концентрации Na во всех исследованных образцах, Ca и K – в образце №4, Mgи Pb – в образцах №3 и №4, Mn – в образце №3, Zn – в образцах №2 и №4, Ni и Cd – в всех образцах кроме №1 (рис. 5). Основываясь на известных фактах, что штаммы данного вида способны сорбировать металлы [Nazari *et al.* 2022], можно предположить, что в нашем исследовании снижение концентрации металлов в почве также обусловлено их биосорбцией клетками штамма *R. opacus* КТ112-7. Неожиданными оказались результаты по увеличению содержания кальция и марганца в образце №2, меди – в образцах №2-№4 и свинца – в образце №4 (рис. 5). Анализ литературных данных не позволил нам объяснить данное явление.

Внесение препарата «Bionex Oil Solvent» не приводило к снижению концентрации тяжелых металлов, а в ряде случаев даже наблюдалась их аккумуляция в почве (рис. 5). Однако, выявленные концентрации не превышают ПДК. Также обнаружено существенное повышение содержания натрия и кальция во всех образцах и железа в образце №3 (рис. 7). Возможно, такие колебания связаны с минеральным составом самого препарата «Bionex Oil Solvent», а бактериальная составляющая препарата не взаимодействует с металлами

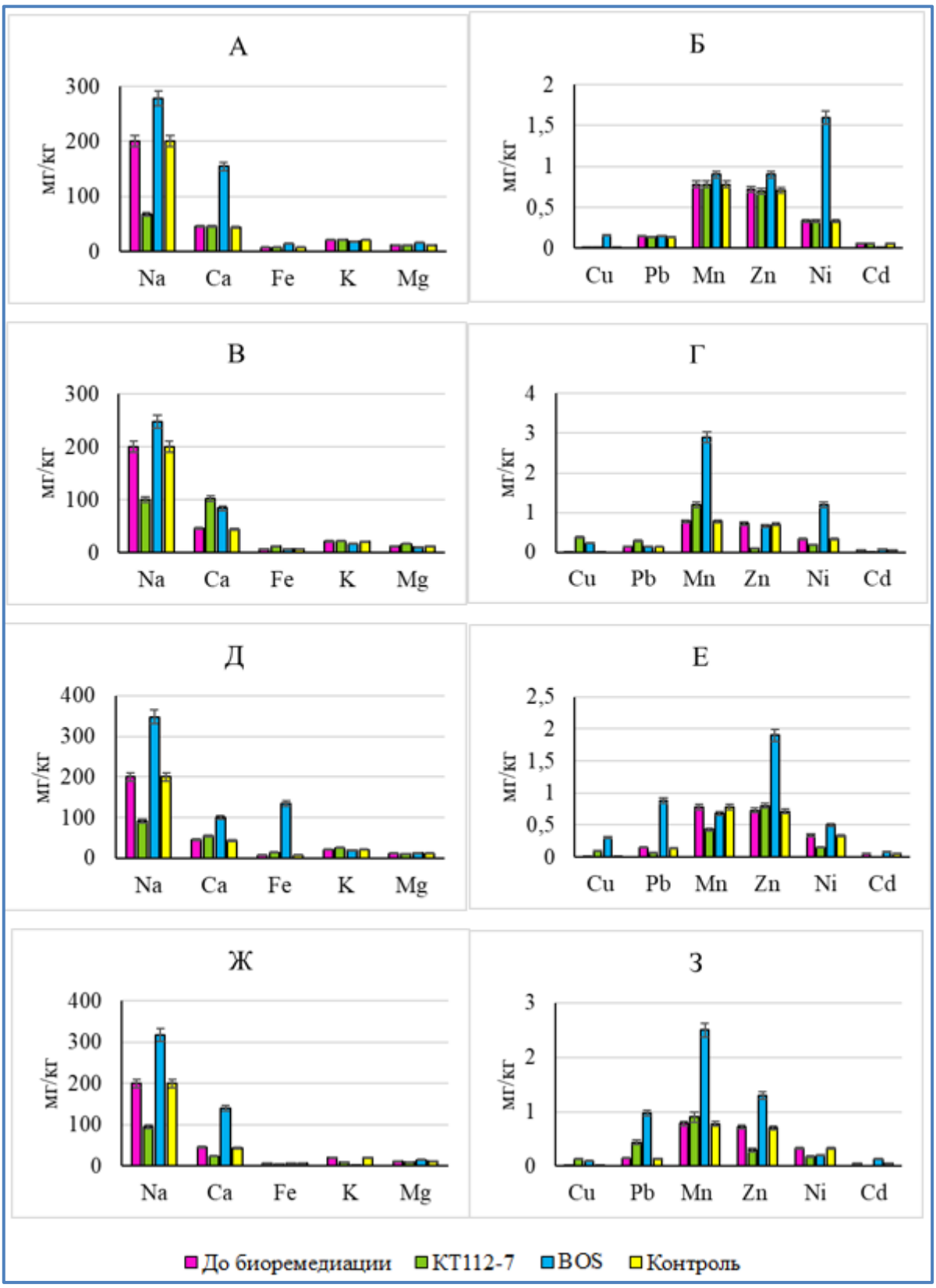

Рис. 5. **Содержание металлов в образцах почв: А,Б – образец №1, В,Г – образец №2, Д, Е – образец №3, Ж, З – образец №4.**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение биологических методов, основанных на биохимическом потенциале микроорганизмов в настоящее время рассматривается как один из самых перспективных и дружественных природе подходов восстановления нефтезагрязненных территорий. При этом,

всегда вопросом выбора остается применение препаратов на основе монокультуры или сообщества микроорганизмов.

В настоящем исследовании показано, что штамм *R. opacus* КТ112-7 эффективно удаляет из почвы алканы и арены (44–60% и 60–70%, соответственно), но почти не проявляет деградативной активности к цикланам. При этом общий уровень нефтяного загрязнения был снижен на 45–52%. Использование коммерческого препарата «Bionex Oil Solvent» обусловило снижение уровня нефтяного загрязнения менее чем на 40 %. Надо отметить, что данный препарат обусловил более эффективную деструкцию цикланов, чем монокультура штамма *R. opacus* КТ112-7.

Внесение штамма *R. opacus* КТ112-7 способствовало снижению концентрации ряда металлов в почве, что не было отмечено при внесении коммерческого препарата «Bionex Oil Solvent».

Таким образом, на основании проведенного исследования можно заключить, что препарат «Bionex Oil Solvent» и штамм *R. opacus* КТ112-7 обладают высоким биоремедиационным потенциалом в отношении нефтезагрязненных почв, и могут быть использованы для восстановления территорий, подвергнутых аварийному разливу нефти.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ и Правительства Пермского края в рамках научного проекта № 24-17-20025

Конфликт интересов (Conflicts of Interest)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Баландина А.В., Еремченко О.З. (**2016**) Микробная ремедиация нефтезагрязненных агродерново-карбонатных почв и техногенных поверхностных образований в подзоне южной тайги: монография. Перм. Гос. Фарм. акад.; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь: 100.

ГОСТ 17.4.3.01–2017. (**2018**) Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. Стандартинформ. Москва.

ГОСТ 17.4.4.02–2017. (**2018**) Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. Стандартинформ. Москва.

ГОСТ 17.4.4.02–84. (**2008**) Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. Стандартинформ. Москва.

ГОСТ 31953–2012. (**2013**) ВОДА. Определение нефтепродуктов методом газовой хроматографии. Стандартинформ. Москва.

Егорова Д.О., Корсакова Е.С., Демаков В.А., Плотникова Е.Г. (**2013**) Деструкция ароматических углеводородов штаммом *Rhodococcus wratislaviensis* КТ112-7, выделенным из отходов соледобывающего предприятия. *Прикладная биохимия и микробиология.* **49**(3): 267-278. https://doi.org/10.7868/S0555109913030070

Егорова Д.О., Первова М.Г., Демаков В.А., Плотникова Е.Г. (**2018**) Особенности разложения хлорированных бифенилов штаммом *Rhodococcus wratislaviensis* КТ112-7 в условиях

засоления. *Прикладная биохимия и микробиология*. **54**(3): 253-ш263. https://doi.org/10.7868/S0555109918030042

Качмазов Д.Г. (**2017**) Биоремедиация загрязненных почв. *Международный научно-исследовательский журнал.* **12-3**(66): 107-109. https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.104 EDN: YNMNZZ

Петров А.А. (**1984**) Углеводороды нефти. Наука. Москва: 280.

РД 52.18.286–91. (**1991**) Методика выполнения измерений массовой доли водорастворимых форм металлов в пробах почвы атомно-адсорбционным анализом. Москва.

СанПиН 1.2.3685-21. (**2021**) Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: https://docs.cntd.ru/document/573500115?marker=6560IO (дата обращения: 29.04.2025).

Тишин А.С., Тишина Ю.Р. (**2021**) Сравнение зарубежного и отечественного опыта в очистке почв и грунтов, загрязненных нефтепродуктами. *Международный научно-исследовательский журнал.* **10-1**(112): 106-112. https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.112.10.018 EDN: GDPNJO

Шеховцева А.М. (**2016**) Негативное воздействие нефтедобывающей промышленности на окружающую среду. *Антропогенная трансформация природной среды*. (2): 92-97. EDN: YMRFOR

Al-Dhabaan F. A. (**2019**) Morphological, biochemical and molecular identification of petroleum hydrocarbons biodegradation bacteria isolated from oil polluted soil in Dhahran, Saud Arabia. *Saudi Journal of Biological Sciences*. **26**(6): 1247-1252. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2018.05.029

Bionex Oil Solvent. Официальный сайт компании Bionex. [Электронный ресурс]. (дата обращения: 18.02.2025). URL: https://bionex.pro/production/industrial/bionex-oil-solvent

Chen X., Shan G., Shen J., Zhang F., Liu Y., Cui C. (**2023**) In situ bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil: isolation and application of a *Rhodococcus* strain. *International microbioogy.* **26**(2): 411-421. https://doi.org/10.1007/s10123-022-00305-1.

D'Ugo E., Mukherjee A., Resitano M., Giuseppetti R., Fortini D., Matturro B., Chirico M., Pisanu M.E., Tucci M., Pozzi R. *et al.* (**2025**) Fishing out microorganisms for bioremediation using metagenomics: Isolation and whole-genome sequencing of the metabolically versatile *Rhodococcus erythropolis* LP27217 strain from oil spill lake. *Journal of hazardous materials*. **496**: 139463. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.139463.

Egorova D.O., Gorbunova T.I., Pervova M.G., Kir'yanova T.D., Demakov V.A., Saloutin V.I., Chupakhin O.N. (**2020**) Biodegradability of hydroxylated derivatives of commercial polychlorobiphenyls mixtures by *Rhodococcus*-strains. *Journal of hazardous materials*. **400**: 123328. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123328.

Iminova L., Delegan Y., Frantsuzova E., Bogun A., Zvonarev A., Suzina N., Anbumani S., Solyanikova I. (**2022**) Physiological and biochemical characterization and genome analysis of *Rhodococcus qingshengii* strain 7B capable of crude oil degradation and plant stimulation. *Biotechnoogyl reports*. **35**: e00741. https://doi.org/10.1016/j.btre.2022.e00741.

ISO 16703–2011 Soil quality - Determination of content of hydrocarbon in the range C10 to C40 by gas chromatography.

Kumari S, Gautam K, Seth M, Anbumani S, Manickam N. (**2023**) Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons in crude oil by bacterial consortium in soil amended with Eisenia fetida

and rhamnolipid. *Environmental science and pollution research.* **30**(34):82517-82531. https://doi.org/10.1007/s11356-023-28082-y.

Nazari M.T., Simon V., Machado B.S., Crestani L., Marchezi G., Concolato G., Ferrari V., Colla L.M., Piccin J.S. (**2022**) *Rhodococcus*: A promising genus of actinomycetes for the bioremediation of organic and inorganic contaminants. *Journal of environmental management.* **323**: 116220. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116220.

Rehman R., Ali M.I., Ali N., Badshah M., Iqbal M., Jamal A., Huang Z. (**2021**) Crude oil biodegradation potential of biosurfactant-producing *Pseudomonas aeruginosa* and *Meyerozyma* sp. *Journal of hazardous materials*.. 418: 126276. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126276.

Sun X., Ma Y., Pang L., Wei J., Fu H., Li Y., Li Y., Lu J., Bao M. (**2025**) Enhancement of petroleum degradation by biochar supported Fe3O4 nanoparticles: Role of immobilized *Rhodococcus hoagii* S4 in oil spill remediation. *Journal of hazardous materials*. 496: 139333. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.139333.

Wang Y., Sun S., Liu Q., Su Y., Zhang H., Zhu M., Tang F., Gu Y., Zhao C. (**2024**) Characteristic microbiome and synergistic mechanism by engineering agent MAB-1 to evaluate oil-contaminated soil biodegradation in different layer soil. *Environmental science and pollution research.* **31**(7): 10802-10817. https://doi.org/10.1007/s11356-024-31891-4.

Wu M., Feng S., Liu Z., Tang S. (**2024**) Bioremediation of petroleum-contaminated soil based on both toxicity risk control and hydrocarbon removal-progress and prospect. *Environmental science and pollution research.* **31**(50): 59795-59818. https://doi.org/10.1007/s11356-024-34614-x.

Yan Z.F., Fei Y., Wang Z.Q., Yang J., Zhou X.Y., Huang Q.S., Chen S., Wu J. (**2024**) Synergistic bioremediation of petroleum-contaminated soil using immobilized consortium of *Rhodococcus rhodochrous* and *Bacillus subtilis* laccase. *Journal of environmental management*. **370**: 123049. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123049.

Zaman S.A.U., Bhrdwaj A., Nayarisseri A., Khazanehdari K.A., Bhuyan R. (**2025**) Isolation and characterization of novel hydrocarbon-degrading bacteria from oil polluted soil near Nacharam, Hyderabad, India. *Scientific reports.* **15**(1): 17219. https://doi.org/10.1038/s41598-025-01081-4.

REFERENCES

Balandina A.V., Eremchenko O.Z. (**2016**) Microbial remediation of oil-contaminated agrosod-carbonate soils and technogenic surface formations in the southern taiga subzone: monograph. Perm. State Pharm. Acad.; Perm. State National Research University. Perm: 100. (in Rus.)

GOST 17.4.3.01–2017. (**2018**) Nature protection. Soils. General requirements for sampling. Standartinform. Moscow. (In Rus.)

GOST 17.4.4.02–2017. (**2018**) Nature protection. Soils. Methods of sampling and preparation of samples for chemical, bacteriological, and helminthological analysis. Standartinform. Moscow. (In Rus.)

GOST 17.4.4.02–84. (**2008**) Nature protection. Soils. Methods of sampling and preparation of samples for chemical, bacteriological, and helminthological analysis. Standartinform. Moscow. (In Rus.)

GOST 31953-2012. (**2013**) WATER. Determination of petroleum products by gas chromatography. Standartinform. Moscow. (In Rus.)

Egorova D.O., Korsakova E.S., Demakov V.A., Plotnikova E.G. (**2013**) Destruction of aromatic hydrocarbons by the Rhodococcus wratislaviensis KT112-7 strain isolated from waste from a

salt mining enterprise. *Applied biochemistry and microbiology*. **49**(3): 267-278. https://doi.org/10.7868/S0555109913030070 (In Rus.)

Egorova D.O., Pervova M.G., Demakov V.A., Plotnikova E.G. (**2018**) Decomposition features of chlorinated biphenyls by the Rhodococcus wratislaviensis KT112-7 strain under salinization conditions. *Applied biochemistry and microbiology*. **54**(3): 253-263. https://doi.org/10.7868/S0555109918030042 (In Rus.)

Kachmazov D.G. (**2017**) Bioremediation of polluted soils. International Scientific Research Journal. **12-3**(66): 107-109. https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.104 EDN: YNMNZZ (In Rus.)

Petrov A.A. (**1984**) Hydrocarbons of oil. Science. Moscow: 280. (In Rus.)

RD 52.18.286–91. (**1991**) Methodology for measuring the mass fraction of water-soluble forms of metals in soil samples by atomic adsorption analysis. Moscow. (In Rus.)

SanPiN 1.2.3685-21. (**2021**) Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans. [Electronic resource] // CODEX: an electronic fund of legal and regulatory-technical documents. – URL: https://docs.cntd.ru/document/573500115?marker=6560IO (accessed: 04/29/2025). (In Rus.)

Tishin A.S., Tishina Yu.R. (**2021**) Comparison of foreign and domestic experience in cleaning soils and soils contaminated with petroleum products. International Scientific Research Journal. **10-1**(112): 106-112. https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.112.10.018 EDN: GDPNJO (In Rus.)

Shekhovtseva A.M. (**2016**) The negative impact of the oil industry on the environment. Anthropogenic transformation of the natural environment. (2): 92-97. EDN: YMRFOR (In Rus.)

Al-Dhabaan F. A. (**2019**) Morphological, biochemical and molecular identification of petroleum hydrocarbons biodegradation bacteria isolated from oil polluted soil in Dhahran, Saud Arabia. *Saudi Journal of Biological Sciences*. **26**(6): 1247-1252. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2018.05.029

Bionex Oil Solvent. Официальный сайт компании Bionex. [Электронный ресурс]. (дата обращения: 18.02.2025). URL: https://bionex.pro/production/industrial/bionex-oil-solvent

Chen X., Shan G., Shen J., Zhang F., Liu Y., Cui C. (**2023**) In situ bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil: isolation and application of a *Rhodococcus* strain. *International microbioogy*. **26**(2): 411-421. https://doi.org/10.1007/s10123-022-00305-1.

D'Ugo E., Mukherjee A., Resitano M., Giuseppetti R., Fortini D., Matturro B., Chirico M., Pisanu M.E., Tucci M., Pozzi R. *et al.* (**2025**) Fishing out microorganisms for bioremediation using metagenomics: Isolation and whole-genome sequencing of the metabolically versatile *Rhodococcus erythropolis* LP27217 strain from oil spill lake. *Journal of hazardous materials*. **496**: 139463. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.139463.

Egorova D.O., Gorbunova T.I., Pervova M.G., Kir'yanova T.D., Demakov V.A., Saloutin V.I., Chupakhin O.N. (**2020**) Biodegradability of hydroxylated derivatives of commercial polychlorobiphenyls mixtures by *Rhodococcus*-strains. *Journal of hazardous materials*. **400**: 123328. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123328.

Iminova L., Delegan Y., Frantsuzova E., Bogun A., Zvonarev A., Suzina N., Anbumani S., Solyanikova I. (**2022**) Physiological and biochemical characterization and genome analysis of *Rhodococcus qingshengii* strain 7B capable of crude oil degradation and plant stimulation. *Biotechnoogyl reports*. **35**: e00741. https://doi.org/10.1016/j.btre.2022.e00741.

ISO 16703–2011 Soil quality - Determination of content of hydrocarbon in the range C10 to C40 by gas chromatography.

Kumari S, Gautam K., Seth M., Anbumani S., Manickam N. (**2023**) Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons in crude oil by bacterial consortium in soil amended with Eisenia fetida

and rhamnolipid. *Environmental science and pollution research.* **30**(34):82517-82531. https://doi.org/10.1007/s11356-023-28082-y.

Nazari M.T., Simon V., Machado B.S., Crestani L., Marchezi G., Concolato G., Ferrari V., Colla L.M., Piccin J.S. (**2022**) *Rhodococcus*: A promising genus of actinomycetes for the bioremediation of organic and inorganic contaminants. *Journal of environmental management.* **323**: 116220. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116220.

Rehman R., Ali M.I., Ali N., Badshah M., Iqbal M., Jamal A., Huang Z. (**2021**) Crude oil biodegradation potential of biosurfactant-producing *Pseudomonas aeruginosa* and *Meyerozyma* sp. *Journal of hazardous materials*.. 418: 126276. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126276.

Sun X., Ma Y., Pang L., Wei J., Fu H., Li Y., Li Y., Lu J., Bao M. (**2025**) Enhancement of petroleum degradation by biochar supported Fe3O4 nanoparticles: Role of immobilized *Rhodococcus hoagii* S4 in oil spill remediation. *Journal of hazardous materials*. 496: 139333. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.139333.

Wang Y., Sun S., Liu Q., Su Y., Zhang H., Zhu M., Tang F., Gu Y., Zhao C. (**2024**) Characteristic microbiome and synergistic mechanism by engineering agent MAB-1 to evaluate oil-contaminated soil biodegradation in different layer soil. *Environmental science and pollution research.* **31**(7): 10802-10817. https://doi.org/10.1007/s11356-024-31891-4.

Wu M., Feng S., Liu Z., Tang S. (**2024**) Bioremediation of petroleum-contaminated soil based on both toxicity risk control and hydrocarbon removal-progress and prospect. *Environmental science and pollution research.* **31**(50): 59795-59818. https://doi.org/10.1007/s11356-024-34614-x.

Yan Z.F., Fei Y., Wang Z.Q., Yang J., Zhou X.Y., Huang Q.S., Chen S., Wu J. (**2024**) Synergistic bioremediation of petroleum-contaminated soil using immobilized consortium of *Rhodococcus rhodochrous* and *Bacillus subtilis* laccase. *Journal of environmental management*. **370**: 123049. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123049.

Zaman S.A.U., Bhrdwaj A., Nayarisseri A., Khazanehdari K.A., Bhuyan R. (**2025**) Isolation and characterization of novel hydrocarbon-degrading bacteria from oil polluted soil near Nacharam, Hyderabad, India. *Scientific reports.* **15**(1): 17219. https://doi.org/10.1038/s41598-025-01081-4.

Цитировать как

Егорова Д.О., Патрушева А.А. (**2025**). Биоремедиация почв, загрязненных нефтью в результате аварийного разлива. *Экобиотех*. **8**(3): 387-399. DOI: 10.31163/2618-964X/2025-27 EDN: NHOYLE

Cited as

Egorova D.O., Patrusheva A.A. (**2025**). Bioremediation of oil-contaminated soils from accidental spills. *Ecobiotech*. **8**(3): 387-399. DOI: 10.31163/2618-964X/2025-27 EDN: NHOYLE (In Rus.)

Сведения об авторах

Дарья Олеговна Егорова, д.б.н., доцент, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия, E-mail: daryao@rambler.ru, SPIN: 9450-7883, Author ID 119197, ORCID: 0000-0001-8018-4687, Scopus Author ID: 36622279600, WoS Researcher ID: AAF-5550-2019

Анастасия Алексеевна Патрушева, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия, E-mail: patrusheva59@yandex.ru

Information About the Author(s)

Darya O. Egorova, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Perm State University, Perm, Russia, E-mail: daryao@rambler.ru, SPIN: 9450-7883, Author ID 119197, ORCID: 0000-0001-8018-4687, Scopus Author ID: 36622279600, WoS Researcher ID: AAF-5550-2019

Anastasya A. Patrusheva, Perm State University, Perm, Russia, E-mail: patrusheva59@yandex.ru