УДК 631.45
https://doi.org/10.31251/pos.v9i1.305

Check for updates

# Исследование свойств нефтезагрязненной темногумусовой почвы

**© 2026 Р. В. Сапцын, О. З. Еремченко**

*ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», ул. Букирева, 15, г. Пермь, 614068, Россия. E-mail: ruslansaptsyn@gmail.com, eremch@mail.psu.ru*

***Цель исследования.*** *Оценить свойства и способность к выполнению экологических функций темногумусовой почвы (Rendzic Phaeozem), подверженной загрязнению в результате аварии на нефтепроводе и срезке верхнего нефтезагрязненного слоя.*

***Место и время проведения.*** *Аварийный разлив нефти в южно-таежной подзоне Пермского края в 2020 году сопровождался загрязнением темногумусовой почвы на площади 0,52 га. Загрязненную растительность и верхний слой почвы срезали и вывезли для ремедиации в специализированной организации. Темногумусовая почва входит в категорию особо охраняемых почв региона. В 2023 г. на загрязненном участке в семи точках были взяты пробы почвы из слоев 0–20 и 20–40 см; стандартом для сравнения послужила темногумусовая постагрогенная почва.*

***Методы.*** *В почвенных образцах были исследованы содержание остаточных нефтепродуктов; $pH_{вод}$ и $pH_{сол}$; гидролитическая кислотность; сумма оснований; органическое вещество; подвижные формы фосфора и калия; активность каталазы, уреазы и инвертазы; плотность почвы; плотность твердой фазы почвы; агрегатный состав; пористость; гранулометрический состав. Фитотестирование почвы проводили по реакции кресс-салата путем измерения длины и сырой массы надземной части. Значимость различий с фоновой почвой была рассчитана с помощью однофакторного дисперсионного анализа с использованием критерия Крускала-Уоллиса при уровне значимости $P<0,05$. Для комплексной оценки состояния нефтезагрязненной почвы был использован метод математической оптимизации.*

***Основные результаты.*** *Фоновая почва была диагностирована согласно классификации и диагностике почв России (2004): темногумусовая постагрогенная, метаморфизованная, ненасыщенная, среднемощная, высокогумусированная, слабонасыщенная, глинистая. Динамика остаточного содержания нефтепродуктов в слое 0–20 см темногумусовой почвы показала, что их количество сократилось в среднем на 50% в первый год наблюдений. Затем процесс самоочищения почвы замедлился; в 2022 году содержание нефтепродуктов снизилось в среднем на 12%. Впоследствии годовое снижение количества остаточной нефти (на 42%) произошло из-за рыхления почвы, что, по-видимому, активизировало деятельность углеводородокисляющих микроорганизмов. Негативное состояние верхних слоев загрязненной почвы проявилось в снижении пористости, ухудшении агрегатного состава и минерального питания (по содержанию подвижных форм форсфора и калия, активности уреазы), по сравнению с фоновой постагрогенной почвой. После срезания поверхностного загрязненного слоя остаточный темногумусовый горизонт по ряду показателей (гранулометрический состав, плотность, плотность твердой фазы) характеризовался сходством с фоновой почвой на глубине 20–40 см. По результатам фитотестирования у нефтезагрязненной почвы понижена способность к обеспечению условий для роста и развития растений.*

***Заключение.*** *После удаления верхнего нефтезагрязненного слоя остаточное нефтезагрязнение, комплекс почвенных свойств и расчетные коэффициенты оптимизации указывали на снижение экологического потенциала особо охраняемой темногумусовой почвы.*

***Ключевые слова:*** *нефтезагрязнение; темногумусовая почва (Rendzic Phaeozem); изменение свойств; экологические функции.*

***Цитирование:*** *Сапцын Р.В., Еремченко О.З. Исследование свойств нефтезагрязненной темногумусовой почвы // Почвы и окружающая среда. 2026. Том 9. № 1. e305. DOI: 10.31251/pos.v9i1.305*

## ВВЕДЕНИЕ

В нефтедобывающих странах отмечают загрязнение почвенного покрова из-за неправильной утилизации нефтесодержащих отходов, разгерметизации нефтепроводов и резервуаров для хранения нефти. Нефть и нефтепродукты вызывают комплекс негативных изменений в почвах: закупоривают поры, снижая водопроницаемость и аэрацию, уплотняют структуру, формируют гидрофобные слои, временно повышают содержание органического углерода с последующим его уменьшением относительно фона, нарушают состав гумуса (рост содержания фульвокислот), снижают емкость катионного обмена и подвижность фосфора, подавляют активность микроорганизмов и ферментов, а также провоцируют анаэробиоз из-за дефицита кислорода (Mekkiyah et al., 2023; Sánchez Mata et al.,

2023; Koohkan et al., 2023; Leewis et al., 2024). Эти изменения приводят к деградации почвенного профиля, фитотоксичности и потере плодородия (Akhanova et al., 2023; Daryaee et al., 2024). Методы рекультивации нефтезагрязненных почв отличаются значительным разнообразием, включают мероприятия по удалению нефти с поверхности, активизации процессов деструкции нефти путем активизации микробиоты, внесению удобрений и штаммов активных углеводородокисляющих микроорганизмов, усилению аэрации, а также биологическую рекультивацию при участии растений. Процесс деструкции нефтепродуктов в почвах ускоряют внесением биосульфактантов – поверхностно активных веществ. Все подходы адаптируют к региональным условиям (климат, тип почвы, целевое использование земель) (Abioye, 2011; Karlapudi et al., 2018; Mbachu et al., 2020; Sajadi Bami et al., 2022).

В разных природных зонах нашей страны часть почв развивается на редких почвообразующих породах и подлежит особой охране (Структурно-функциональная роль …, 2003). Почвообразующие породы и продукты их изменения составляют 95–98% почвенной массы, определяя ее гранулометрический и минералогический состав, а также физико-химические свойства. В Пермском крае почвы на элювии пермских пород (известняков, песчанников, мергелей) не образуют больших массивов, встречаются пятнами, занимая верхние части и перегибы склонов (Коротаев, 1962; Протасова, 2009; Еремченко и др., 2015). К почвам на пермских породах относятся темногумусовые почвы, у которых, в соответствии с предложенной систематизацией (Почвообразовательные процессы …, 2006), основным профилеобразующим процессом является формирование темногумусовых аккумуляций. Образованию в почвах темногумусовых горизонтов благоприятствует присутствие карбонатов в части пермских глин, а также особый минералогический и химический состав этих пород. В илистой фракции элювия пермских глин преобладает монтмориллонит, содержатся каолинит, гидрослюды, хлорит и/или смешанослойные минералы с доминированием хлоритовых пакетов. Среди основных свойств почв перечислены морфологически неоподзоленный профиль бурой окраски, комковато-зернистая структура, относительно высокое содержание гумуса, его гуматно-фульватный состав с преобладанием «бурой» фракции гуминовых кислот, отсутствие выноса илистой фракции из верхних горизонтов (Протасова, 2009).

В Пермском крае в процессе добычи и транспортировки нефти случались аварийные разливы, при которых загрязнение происходило практически мгновенно и в количествах, нарушающих нормальное функционирование почв и экосистем. Разработанные в регионе нормативы допустимого остаточного содержания нефтепродуктов (Об утверждении региональных …, 2018) достигались, преимущественно, путем срезки нефтезагрязненного слоя почвы и отсыпки на поверхность чистого субстрата. По мнению С.Я. Трофимова с соавторами (2023), сбор верхних нефтезагрязненных слоев может не оставить шансов на восстановление экологического потенциала почвы и в целом экосистемы.

В 2020 г. на юге Пермского края вследствие нарушения герметичности нефтепровода произошло загрязнение нефтью темногумусовой почвы. Постановлением Правительства Пермского края № 447-п темногумусовые почвы включены в перечень редких почв, находящихся под особой охраной (Об утверждении Порядка ..., 2022). В связи с особым охранным статусом, мониторинг остаточного нефтезагрязнения и оценка экологического состояния темногумусовой почвы являются актуальной задачей.

Цель исследований – оценить свойства и способность к выполнению экологических функций темногумусовой почвы, подверженной загрязнению в результате аварии на нефтепроводе и срезке верхнего нефтезагрязненного слоя.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Аварийный разлив нефти, вызванный несанкционированной врезкой в нефтепровод, был обнаружен в октябре 2020 г. в Чернушинском районе Пермского края. Территория исследований входит в Вятско-Камскую почвенную провинцию дерново-подзолистых почв. Загрязненный участок площадью 0,52 га расположен на землях категории «Земли сельскохозяйственного назначения». Верхняя часть гумусового горизонта нефтезагрязненной почвы была срезана и удалена вместе с залежной растительностью. В летние периоды 2021–2022 гг. почву несколько раз рыхлили для активизации процессов деструкции остаточной нефти. В течение 2020–2023 гг. проводили контроль над содержанием остаточных нефтепродуктов в почве; отбор проб из слоя 0–20 см проводили в 5–7 точках загрязненного участка.

В 2023 г. на расстоянии около 50 м от загрязненной территории был выбран контрольный участок, в пределах которого заложен почвенный полуразрез и две прикопки; пробы из фоновой почвы взяли в трехкратной повторности по глубинам 0–10, 10–20, 20–30, 30–40, 40–50 и 50–60 см (рис. 1). Координаты разреза фоновой почвы (в системе координат WGS-84): 56°30'03,2" с.ш., 55°56'18,7" в.д.




***Рисунок 1.*** Расположение разреза на фоновой темногумусовой почве и схема отбора почвенных проб на нефтезагрязненной почве.

В профиле фоновой темногумусовой почвы диагностировали следующие генетические горизонты (рис. 2, а):

AUpa – темногумусовый постагрогенный горизонт, 0–23/23 см, темно-бурой окраски, комковато-зернистый, увлажненный, легкоглинистый; содержит корни трав, переход явный.

AU – темногумусовый горизонт, 23–52/29 см, серовато-бурой окраски, легкоглинистый, комковатый, слегка уплотненный, сухой, встречаются корни трав; переход постепенный.

AC – переходный к почвообразующей породе горизонт, 52–66/14 см, коричнево-бурый, комковато-зернистый, легкоглинистый, уплотненный, увлажненный.

Cm – метаморфизированная почвообразующая порода, 66–90/24 см, коричнево-бурая, комковато-зернистая, легкоглинистая, уплотненная, увлажненная, переход постепенный.

C – почвообразующая порода с глубины 90 см, коричнево-бурая, бесструктурная, легкоглинистая, уплотненная, увлажненная.




а б

***Рисунок 2.*** Внешний вид темногумусовых фоновой постагрогенной (а) и нефтезагрязненной (б) почв.

Темногумусовая постагрогенная почва с профилем AUpa-Cm-C была отнесена к подтипу метаморфизированные (Классификация ..., 2004). По классификации IUSS Working Group WRB (2022) данный тип почвы соответсвует Rendzic Phaeozem.

В 2023 г. в центре нарушенного участка заложили полуразрез для морфологического описания почвы. В профиле нефтезагрязненной почвы диагностировали следующие генетические горизонты (рис. 2, в):

PU – агрогумусовый горизонт, 0–42/42 см; в слое 0–20/20 см серовато-бурой окраски, крупнокомковатый, увлажненный, легкоглинистый; в слое 20–42/22 см неоднородной серовато-бурой окраски с коричнево-бурыми фрагментами, крупнокомковато-глыбистый, легкоглинистый, увлажненный, уплотненный, вязкий, переход заметный ровный; присутствие выраженного запаха нефтепродуктов.

Cm – метаморфизированная почвообразующая порода, 42–69/27 см, коричнево-бурая, комковато-зернистая, легкоглинистая, уплотненная, увлажненная; переход постепенный.

C – почвообразующая порода с глубины 69 см, коричнево-бурая, легкоглинистая, плотная, вязкая, влажная.

У нефтезагрязненной почвы из-за срезки поверхностного слоя снижена мощность гумусового горизонта по сравнению фоновой почвой. В полуразрезе гумусовый горизонт почвы характеризовался мощностью около 42 см, а у фоновой темногумусовой почвы совокупная мощность гумусового и гумусово-переходного горизонта составила 66 см.

В 2023 г. отобрали почвенные пробы в 7 точках нефтезагрязненного участка по слоям 0–20 см и 20–40 см (см. рис. 1).

В пробах из фоновой и нефтезагрязненной почв определяли: содержание остаточных нефтепродуктов – гравиметрическим методом (ПНД Ф 16.1:2:2.2:2.3:3.64-10); гранулометрический состав – пипеточным методом Качинского после разрушения почвенных агрегатов пирофосфатом натрия; плотность твердой фазы – пикнометрическим методом; плотность почвы – в воздушно-сухом образце; агрегатный состав – путем просеивания воздушно-сухой почвы через колонку сит; пористость – традиционным расчетным способом; pH водный и pH солевой – в суспензии при соотношении почва : вода (1 : 2,5) и почва : 1 М раствор KCl (1 : 2,5) с помощью иономера «Экотест» (Россия); гидролитическую кислотность – методом Каппена; сумму оснований – методом Каппена-Гильковица; органическое вещество ($C_{орг}$) – титриметрическим методом по Тюрину; содержание подвижных форм фосфора и калия – по Кирсанову (Теория и практика ..., 2006); активность уреазы и инвертазы – по Ф.Х. Хазиеву (2005), каталазы – по методу Джонсона и Темпла путем обратного титрования остаточного $H_2O_2$ с $KMnO_4$. Фитотестирование почвы проводили по реакции кресс-салата согласно способу оценки биологической активности и токсичности почв и техногенных грунтов (Еремченко, Митракова, 2017); на почвенных пробах в течение 7 дней выращивали кресс-салат, затем были определены длина и сырая масса надземной части 25-ти растений.

Значимость различий между свойствами нефтезагрязненной и фоновой почв рассчитали однофакторным дисперсионным анализом с помощью критерия Краскела-Уоллиса при уровне значимости $P < 0,05$.

Для комплексной оценки состояния нефтезагрязненной почвы использовали метод математической оптимизации (Певнева, Калинкина, 2020), при котором для каждого почвенного свойства и показателя фитотестирования оптимумом служило фоновое значение в темногумусовой почве, относительно которого рассчитали нормированные коэффициенты. Путем сложения нормированных коэффициентов получили коэффициенты оптимизации фоновой и нефтезагрязненной почв.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С течением времени, вследствие микробиологического разложения, количество нефтепродуктов в почве уменьшается с замедлением (по экспоненте) в разы и на порядки (Замотаев и др., 2015). Динамика остаточного содержания нефтепродуктов в слое 0–20 см темногумусовой почвы показала, что их количество существенно (в среднем на 50%) уменьшилось в первый год наблюдений (рис. 3). В дальнейшем скорость самоочищения темногумусовой почвы снизилась: в 2022 г. деградация нефти замедлилась до 12% в год. В 2023 г. наблюдали значительное снижение количества остаточных нефтепродуктов (на 42%); рыхление почвы, предположительно, стимулировало активность углеводородокисляющих микроорганизмов.

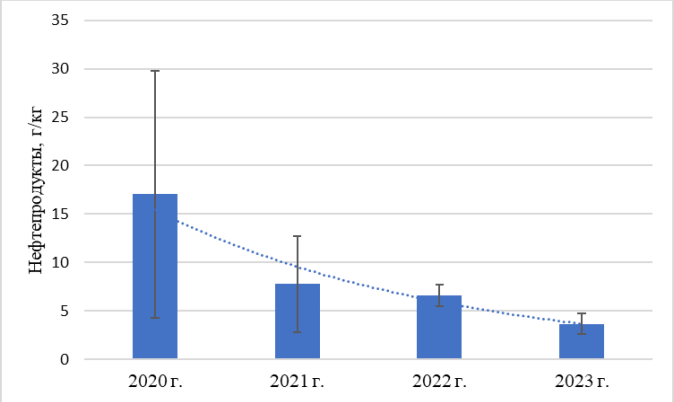



***Рисунок 3.*** Динамика содержания остаточных нефтепродуктов в слое 0–20 см загрязненной темногумусовой почвы, г/кг.

Считается, что рекультивация, ориентированная на фоновые показатели, может нанести большой вред экосистеме, поэтому вводятся нормативы **допустимого содержания нефтепродуктов** (**ДОСНП**), не нарушающие основные механизмы функционирования почвы (Пиковский и др., 2003; Трофимов и др., 2023). В 2023 г. содержание остаточных нефтепродуктов в темногумусовой почве существенно варьировало в пределах участка (рис. 4). В пяти точках отбора проб (Т1–Т4, Т6) в слое 0–20 см количество нефтепродуктов превысило нормативы ДОСНП, в одной точке (Т5) нефтезагрязнение было на уровне ДОСНП и в одной пробе (Т7) – на уровне фона. В пяти точках отбора проб почвы с глубины 20–40 см (Т2–Т6) нефтезагрязнение превысило допустимые нормативы, в одной пробе (Т1) было на уровне норматива и в одной пробе (Т7) – на уровне фона. Известно, что углеводороды различаются по восприимчивости к воздействию микроорганизмов; н-алканы являются наиболее легко разлагаемыми компонентами нефти, за ними следуют циклоалканы, в то время как ароматическая фракция наиболее устойчива (Jain et al., 2011). Соответственно, в первые годы после загрязнения в темногумусовой почве были минерализованы наиболее разлагаемые компоненты нефти; трудноразлагаемые фракции способны проникать в основную массу почвенной матрицы, эта адсорбция снижает доступность загрязняющего вещества для микроорганизмов (Mbachu et al., 2020).

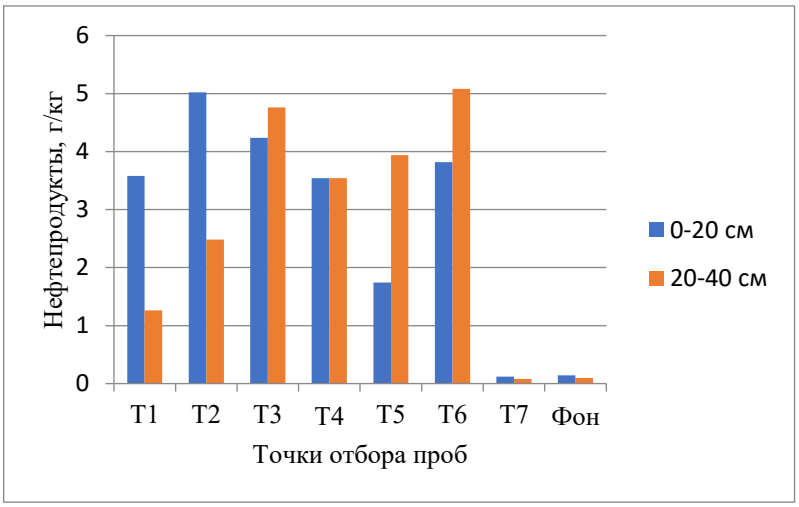



***Рисунок 4.*** Содержание остаточных нефтепродуктов в загрязненной темногумусовой почве, г/кг, 2023 г.

На фоне существенного варьирования остаточных нефтепродуктов в почве их среднее количество в слоях 0–20 см и 20–40 см не имело значимых различий (табл. 1).

В темногумусовой постагрогенной почве содержание гумуса относительно высокое, она относится к виду сильногумусированных почв, а по мощности темногумусового горизонта – к виду среднемощных почв (Классификация ..., 2004). Гумус постепенно убывает с глубиной, в слое 50–60 см содержалось около 1,4% органического углерода.

***Таблица 1***

Химические и физико-химические свойства фоновой постагрогенной и нефтезагрязненной почв (среднее ± ошибка)

| Почва | Глубина, см | Нефте-продукты, г/кг | $pH_{вод}$ | $pH_{сол}$ | С органический, % | Обменные катионы, ммоль/100 г | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | $H^+ + Al^{3+}$ | $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ |
| Постагро-генная | 0–10 | 0,08 | 6,34±0,09 | 5,27±0,19 | 3,17±0,38 | 8,61±0,77 | 21,72±0,78 |
| | 10–20 | 0,20 | 6,20±0,09 | 4,65±0,17 | 3,17±0,40 | 8,49±0,75 | 21,58±0,81 |
| | 20–30 | 0,10 | 5,72±0,07 | 4,45±0,14 | 2,70±0,38 | 8,38±0,88 | 21,72±0,92 |
| | 30–40 | 0,10 | 6,19±0,08 | 4,11±0,12 | 1,50±0,32 | нет данных | нет данных |
| | 40–50 | 0,06 | 6,09±0,06 | 4,15±0,12 | 1,63±0,33 | нет данных | нет данных |
| | 50–60 | 0,08 | 6,34±0,08 | 4,24±0,15 | 1,43±0,29 | нет данных | нет данных |
| Нефтезаг-рязненная | 0–20 | 3,66±1,10 | $5,96±0,08^{\alpha\beta}$ | $4,79±0,08^{\alpha}$ | $3,84±0,25^{\alpha\beta}$ | $5,98±0,62^{\alpha\beta}$ | 22,16±0,85 |
| | 20–40 | 3,51±0,59 | 5,92±0,21 | $4,61±0,08^{\gamma}$ | $3,59±0,32^{\gamma}$ | $5,17±0,60^{\gamma}$ | 22,14±0,64 |

Примечание.

α – значимые различия между свойствами нефтезагрязненной почвы в слоях 0-20 см и свойствами фоновой почвы в слое 0–10 см, β – значимые различия между свойствами нефтезагрязненной почвы в слое 0–20 см и свойствами фоновой почвы в слое 10–20 см, γ – значимые различия между свойствами нефтезагрязненной почвы в слое 20–40 см и свойствами фоновой почвы в слое 30–40 см при уровне значимости $P < 0,05$.

Из-за срезки верхнего слоя мощность гумусового горизонта нефтезагрязненной почвы снизилась до 30 см, поэтому почва была отнесена к виду маломощные. Через два года после нефтезагрязнения в обоих слоях (0–20 и 20–40 см) темногумусовой почвы содержание Сорг в среднем выше, чем в слое 0–10 см фоновой почвы (см. табл. 1). В нефтезагрязненных почвах временно увеличивается содержание органического вещества; нефтепродукты взаимодействуют с органическими и минеральными соединениями почвы (Замотаев и др., 2015; Трофимов и др., 2023; Sánchez Mata et al., 2023). Исследуемая темногумусовая почва благодаря глинистому составу и значительному содержанию гумуса, по-видимому, характеризуется повышенной способностью к адсорбции нефтепродуктов.

Фоновая постагрогенная почва имела слабокислую реакцию почвенной среды, поглотительная способность выше средней по принятой шкале оценки (Вальков и др., 2004). Около 28% от емкости поглощения составили обменные водород и алюминий (гидролитическая кислотность), то есть почва относится к роду ненасыщенные основаниями и виду слабонасыщенные основаниями (Классификация ..., 2004). В загрязненной темногумусовой почве кислотность была немного выше, чем в верхнем слое постагрогенной почвы. По В.П. Серединой (2015) окисление углеводородов первоначально может привести к подкислению почвенной среды (pH снижается на 1,5–2 единицы). Одновременно в загрязненной почве наблюдали уменьшение гидролитической кислотности относительно фоновой почвы (см. табл. 1). Определенное противоречие между снижением гидролитической кислотности и подкислением реакции среды в нефтезагрязненной почве обусловлено срезкой верхнего наиболее гумусированного слоя и, как следствие, уменьшением суммы обменных оснований. Кроме того, нефтепродукты снижают поглотительную способность почвы, блокируя обменные центры почвенного поглощающего комплекса (Середина, 2015; Sánchez Mata et al., 2023).

Известно, что в нефтезагрязненных почвах снижается уровень обеспеченности питательными элементами (Замотаев и др., 2015; Sánchez Mata et al., 2023). В соответствии со шкалой В.Ф. Валькова с соавторами (2004) постагрогенный слой (0–20 см) фоновой темногумусовой почвы характеризовался низким содержанием подвижных фосфатов и высоким содержанием подвижного калия (табл. 2). В нефтезагрязненной почве содержалось меньше подвижного калия и, особенно, подвижных фосфатов относительно фонового количества. В нефтезагрязненных почвах южной тайги Западной Сибири ухудшение условий калийного питания растений связали с переходом калия в необменное состояние (Середина, 2003). В нефтезагрязненной почве по принятым критериям (Вальков и др., 2004) уровень обеспеченности почвы подвижными питательными элементами понизился: по количеству фосфатов стал очень низким, калия – повышенным.

Нефтепродукты в почвах подавляют активность микроорганизмов и ферментов (Koohkan et al., 2023; Leewis et al., 2024). Показатели активности каталазы и инвертазы используют при оценке экологического состояния нефтезагрязненных почв (Иванова, Усачева, 2012; Тазетдинова и др., 2013; Анчугова и др., 2016; Wu et al., 2016). В нефтезагрязненной темногумусовой почве активность каталазы находилась на уровне фона (см. табл. 2)., что указывало на успешную нейтрализацию

избыточного количества $H_2O_2$, образующегося при разрушении углеводородов (Polyak et al., 2018). В фоновой темногумусовой почве активность инвертазы по шкале Д.Г. Звягинцева (1978) была низкой. При участии инвертазы в почвах идет расщепление углеводов (Звягинцев, 1978); в нефтезагрязненной почве данный ферментативный процесс не был подавлен, поскольку активность инвертазы оставалась на уровне фоновых значений.

***Таблица 2***

Содержание подвижных фосфора и калия, ферментативная активность фоновой постагрогенной и нефтезагрязненной почв (среднее ± ошибка)

| Почва | Глубина, см | $P_2O_5$, мг/100 г | K, мг/100 г | Активность | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | каталазы, мл 0,1 $KMnO_4$×10 г×20 мин | уреазы, мг N-$NH_4$×10 г×24 ч | инвертазы, мг глюкозы, 10 г×24 ч |
| Постагрогенная | 0–10 | 5,2±1,4 | 24,9±5,6 | 2,9±0,4 | 3,6±0,7 | 7,3±0,4 |
| | 10–20 | 3,0±1,2 | 16,3±2,7 | 2,3±0,3 | 2,2±0,5 | 7,4±0,5 |
| | 20–30 | 2,6±0,9 | 13,3±3,1 | 1,9±0,3 | 1,9±0,4 | 7,4±0,4 |
| | 30–40 | 0,3±0,10 | 12,7±2,0 | 0,9±0,2 | 0,3±0,2 | 7,5±0,6 |
| Нефте-загрязненная | 0–20 | 1,2±0,2$^{\alpha\beta}$ | 15,7±1,6$^{\alpha}$ | 2,2±0,2 | 1,3±0,2$^{\alpha}$ | 6,9±0,5 |
| | 20–40 | 1,5±0,7 | 13,3±0,9 | 1,9±0,2 | 1,8±0,4 | 7,5±0,1 |

Примечание.

α – значимые различия между свойствами нефтезагрязненной почвы в слое 0-20 см и свойствами фоновой почвы в слое 0–10 см, β – значимые различия между свойствами нефтезагрязненной почвы в слое 0–20 см и свойствами фоновой почвы в слое 10–20 см при $P < 0,05$.

Фоновая почва характеризовалась низкой активностью уреазы (Звягинцев, 1978); в нефтезагрязненной почве уреазная активность была ниже фоновой в несколько раз. Уреаза в почвах катализирует гидролиз мочевины. Активность уреазы соответствует численности аммонифицирующих микроорганизмов, принимающих участие в минерализации азотсодержащих органических соединений (Хазиев и др., 1988). На фоне нефтезагрязнения подавление активности уреазы указывало, предположительно, на пониженную численность аммонифицирующих микроорганизмов и, следовательно, на нарушение циклов превращения азотсодержащих соединений.

В нефтезагрязненных почвах южной тайги отмечали статистически значимое уменьшение количества мелкопесчаной фракции, увеличение количества илистой фракции и общего содержания физической глины, что приводит к утяжелению гранулометрического состава (Середина, 2003). Фоновая темногумусовая почва имела легкоглинистый состав (табл. 3); постагрогенный горизонт немного богаче мелким песком и беднее крупной пылью, по сравнению с подпахотными пылевато-иловатыми горизонтами. В нефтезагрязненной почве понижено содержание ила, физической глины, мелкого песка и повышено количество крупной пыли, по сравнению с верхними слоями (0–10 и 10–20 см) постагрогенной почвы. Гранулометрический состав верхних почвенных слоев приобрел сходство с гранулометрическим составом фоновой почвы на глубине более 20 см, что обусловлено срезкой верхней части загрязненной почвы.

***Таблица 3***

Гранулометрический состав фоновой постагрогенной и нефтезагрязненной почв (среднее ± ошибка)

| Почва | Глубина, см | Размер частиц, мм; содержание, % | | | | | | Физическая глина, < 0,01 мм, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1–0,25 мм | 0,25–0,05 мм | 0,05–0,01 мм | 0,01–0,005 мм | 0,005–0,001 мм | < 0,001 мм | |
| Постаг-рогенная | 0–10 | 1,5±0,5 | 40,6±3,5 | 4,6±1,1 | 11.0±1,7 | 9,4±1,7 | 33.0±1,8 | 53,4±0,4 |
| | 10–20 | 1,5±0,4 | 33,3±2,2 | 10,9±1,5 | 11,6±1,8 | 9,3±1,6 | 33,3±1,7 | 53,2±0,5 |
| | 20–30 | 1,8±0,7 | 24,3±1,8 | 20.0±1,6 | 10,7±0,9 | 9,3±1,6 | 34,0±1,6 | 54,0±0,3 |
| | 30–40 | 1,7±0,6 | 16,4±1,1 | 26,0±1,7 | 14,8±1,9 | 15,2±1,9 | 26.0±1,5 | 56,0±0,7 |
| Нефтезаг-рязненная | 0–20 | 1,0±0,4 | 21,2±1,6$^{\alpha}$ | 26,8±1,6$^{\alpha}$ | 9,2±1,6 | 13,0±1,7 | 28,8±1,6$^{\alpha}$ | 51,0±0,2$^{\alpha}$ |
| | 20–40 | 1,4±0,4 | 24,4±1,6 | 19,5±1,5 | 9,2±0,6 | 16,3±1,4 | 29,1±1,3 | 54,6±1,0 |

Примечание.

α – значимые различия между показателями нефтезагрязненной почвы в слое 0-20 см и показателями фоновой почвы в слоях 0–10 и 10–20 см при $P < 0,05$.

Утрата плодородия нефтезагрязненных почв обусловлена нарушением водно-физических свойств, в том числе, увеличением глыбистости и снижением пористости (Середина, 2003; Гилязов, Гайси, 2021; Mekkiyah et al., 2023). Пробы воздушно-сухой фоновой постагрогенной почвы с нарушенным сложением имели низкую плотность и высокую общую пористость. В этой почве преобладали мезоагрегаты, верхний слой (0-10 см) отличался снижением доли макроагрегатов, по-видимому, в постагрогенный период произошло его оструктуривание при участии биогенных механизмов.

У нефтезагрязненной почвы относительно фоновой повышена плотность и снижена плотность твердой фазы; эти показатели приблизились к показателям плотности фоновой почвы на глубине 20-40 см (табл. 4). Пористость почвы снизилась, что может быть связано с остаточными углеводородами, которыми пропитались почвенные агрегаты. Одновременно в почве значительно повысилась доля макроагрегатов и уменьшилось количество мезоагрегатов, что, вероятно, обусловлено обеструктуривающей способностью нефти.

***Таблица 4***

Плотность, пористость и агрегатный состав фоновой постагрогенной и нефтезагрязненной почв (среднее ± ошибка)

| Почва | Глубина, см | Плотность, г/см$^3$ | Плотность твердой фазы, г/см$^3$ | Пористость, % | Микроагрегаты < 0,25 мм, % | Мезоагрегаты 0,25-10 мм, % | Макроагрегаты > 10 мм, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Постагрогенная | 0–10 | 0,97±0,01 | 2,65±0,07 | 63,3±3,5 | 3,5±0,1 | 87,5±6,7 | 9,0±1,3 |
| | 10–20 | 0,98±0,02 | 2,60±0,05 | 62,5±3,1 | 1,1±0,1 | 61,4±5,4 | 37,5±3,8 |
| | 20–30 | 0,93±0,01 | 2,58±0,03 | 64,1±4,1 | 0,4±0,1 | 75,5±6,1 | 24,1±2,9 |
| | 30–40 | 1,04±0,01 | 2,58±0,05 | 57,5±0,6 | 1,1±0,2 | 70,3±5,6 | 27,9±3,2 |
| Нефтезагрязненная | 0–20 | 1,04±0,01$^{\alpha}$ | 2,42±0,04$^{\alpha\beta}$ | 59,1±1,1$^{\alpha\beta}$ | 1,8±0,4$^{\alpha}$ | 49,2±4,8$^{\alpha\beta}$ | 49,1±4,9$^{\alpha\beta}$ |
| | 20–40 | 1,06±0,03$^{\gamma}$ | 2,49±0,11 | 60,8±3,5 | 1,1±0,4$^{\gamma}$ | 47,82±6,4$^{\gamma\delta}$ | 51,2±5,6$^{\gamma\delta}$ |

Примечание.

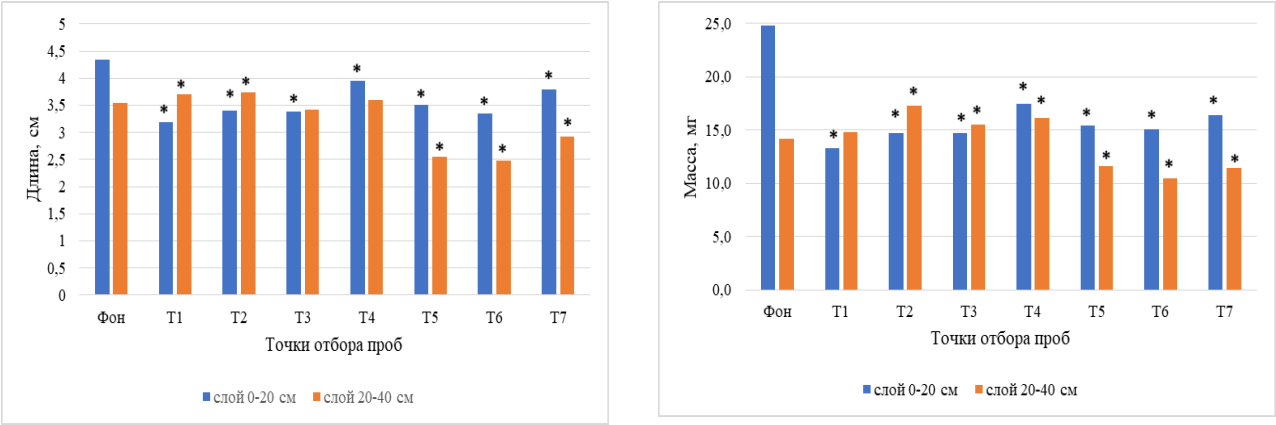
α – значимые различия между свойствами нефтезагрязненной почвы в слоях 0-20 см и свойствами фоновой почвы в слое 0–10 см, β – значимые различия между свойствами нефтезагрязненной почвы в слое 0–20 см и свойствами фоновой почвы в слое 10–20 см, γ – значимые различия между свойствами нефтезагрязненной почвы в слое 20-40 см и свойствами фоновой почвы в слое 20-30 см, δ – значимые различия между свойствами нефтезагрязненной почвы в слое 20-40 см и свойствами фоновой почвы в слое 30-40 см см при $P < 0,05$.

На каждом этапе процесса рекультивации нефтезагрязненных почв рекомендуют проводить биотестирование (Morachevskaya, Voronina, 2022). Известно, что степень негативного воздействия нефтепродуктов зависит от генетических особенностей почв (Поляк, Бакина, 2023). Например, в агротемногумусовой аллювиальной глееватой почве при относительно высоком нефтезагрязнении (3 г/кг) не наблюдали фитотоксичности, что объяснили относительно благоприятными агрохимическими свойствами и тяжелым гранулометрическим составом (Арзамазова и др., 2020). Для фитотестирования почв используют кресс-салат, т.к. это растение характеризуется повышенной устойчивостью и информативной реакцией морфологических показателей на нефтезагрязнение (Шулаев и др., 2019; Сапцын, Еремченко, 2023).

В нашем эксперименте у кресс-салата, выращенного на нефтезагрязненной почве из слоя 0–20 см, была понижена длина надземной части, по сравнению с растениями на фоновой почве (рис. 5а). На двух пробах из слоя загрязненной почвы 20–40 см (Т1, Т2) растения были выше контрольных растений, на двух пробах (Т3, Т4) – не отличались от контроля, а на трех пробах (Т5, Т6, Т7) растения были ниже.

Угнетение кресс-салата, выращенного на нефтезагрязненной почве из слоя 0–20 см, особенно проявилось в уменьшении надземной массы растений (рис. 5б). Показатели массы кресс-салата на почве из слоя 20–40 см были меньше, чем у растений на почве из слоя 0–20 см. Нефтезагрязнение способствовало снижению массы растений (Т5, Т6, Т7); на одной пробе (Т1) их масса не отличалась от контроля; но на трех пробах (Т2, Т3, Т4) масса растений была выше, чем у растений на пробах из фоновой почвы. Снижение функциональной способности почвы по обеспечению условий для роста и развития растений, видимо, обусловлено остаточным нефтезагрязнением и ухудшением структурности почвы. Последние этапы деградации нефтепродуктов отличаются присутствием в почвах, в основном, самых сложных компонентов, трудно разлагаемых микроорганизмами, затрудняющих водно-воздушный и пищевой режимы (Орлов и др., 2002; Mekkiyah et al., 2023). Снижение обеспеченности питательными элементами (P, K) и уменьшение активности уреазы в

нефтезагрязненной темногумусовой почве также могли быть причиной ухудшения пищевого режима. Повышенные относительно контроля показатели длины и, особенно, массы кресс-салата, выращенного на отдельных пробах из слоя 20–40 см, обусловлены, по-видимому, пониженным нефтезагрязнением (Т1) и относительно благоприятным комплексом свойств (Т1, Т2, Т3, Т4).




*а* *б*

***Рисунок 5.*** Длина (а) и масса (б) тест-культуры, выращенной на пробах из фоновой постагрогенной и нефтезагрязненной почв с глубины 0–20 и 20–40 см: * – значимые различия с растениями на фоновой почве при $P<0,05$.

Большая часть методик, оценивающих интегральное состояние почв, основывается на бальной системе, состоящей из множества показателей, при этом ряд авторов указывают на проблемы, связанные с выбором показателей и их веса в оценке, упрощением сложных почвенных процессов и трудностями интерпретации (Karlen et al., 1997; Bünemann et al., 2018; Janků et al., 2022). При оценке экологического состояния нефтезагрязненной темногумусовой почвы был использован метод математической оптимизации с определением условий существования объекта (или протекания процесса), при которых достигается наилучшее значение какого-либо свойства этого объекта (или процесса). При постановке задачи оптимизации выбирается цель; критерий оптимизации – это свойства объекта, определяющие цель (Певнева, Калинкина, 2020).

В проведенных исследованиях объектом оптимизации была темногумусовая нефтезагрязненная «оскальпированная» почва. Цель процесса оптимизации – восстановление свойств почвы, обеспечивающих выполнение экологических функций по обеспечению условий существования живых организмов. В качестве критериев оптимизации (оптимумов) объекта использовали свойства фоновой постагрогенной темногумусовой почвы (среднее в слоях 0–20 см и 20–40 см). Из выборки полученных данных ($x_1$, $x_2$, $x_3$, $x_4$, … $x_n$) в качестве оптимумов выбрали показатели фоновой почвы, а именно, максимальные ($x_{max}$) значения – для $pH_{сол}$, подвижных фосфатов и калия, активности ферментов, пористости, длины и массы тест-культуры, а также минимальное ($x_{min}$) значение – для плотности почвы. Относительно этих оптимумов рассчитали нормированные коэффициенты загрязненной почвы: $x_k = x_n / x_{max}$ или $x_k = x_{min} / x_n$; для фоновой почвы нормированные коэффициенты свойств равны единице. Путем сложения нормированных коэффициентов ($x_k$) получили коэффициенты оптимизации нефтезагрязненной почвы из слоев 0–20 и 20–40 см в 7 точках отбора проб и фоновой почвы в среднем по слоям 0–20 и 20–40 см (рис. 6). При данном формализованном подходе учитывался комплекс экологически важных свойств, определяющих функционирование почвы относительно эталона – темногумусовой почвы, отнесенной к категории особо охраняемых почв в регионе.

Для проб нефтезагрязненной почвы из слоя 0–20 см наблюдали уменьшение нормированных коэффициентов по комплексу экологически значимых свойств и, следовательно, существенное снижение коэффициентов оптимизации относительно коэффициентов оптимизации фоновой почвы из слоя 0–20 см (см. рис. 6). У четырех проб загрязненной почвы из слоя 20–40 см (Т1, Т2, Т3, Т4) были более высокие коэффициенты оптимизации, чем у фоновой почвы, благодаря повышенным нормированным коэффициентам по содержанию калия, активности каталазы и уреазы, длины и массы тест-культуры. Относительное улучшение свойств и функций нефтезагрязненной почвы на этой глубине, предположительно, связано с рыхлением и частичным перемешиванием с верхним

слоем почвы. У трех проб загрязненной почвы из слоя 20–40 см коэффициенты оптимизации были ниже, чем у фоновой почвы. Снижение коэффициентов оптимизации обусловлено не только усиленным нефтезагрязнением (Т4, Т6), но и низкими нормированными коэффициентами содержаний подвижных калия и, особенно, фосфатов (Т4, Т5, Т6), порозности (Т5, Т6), показателей тест-культуры (Т5, Т6).

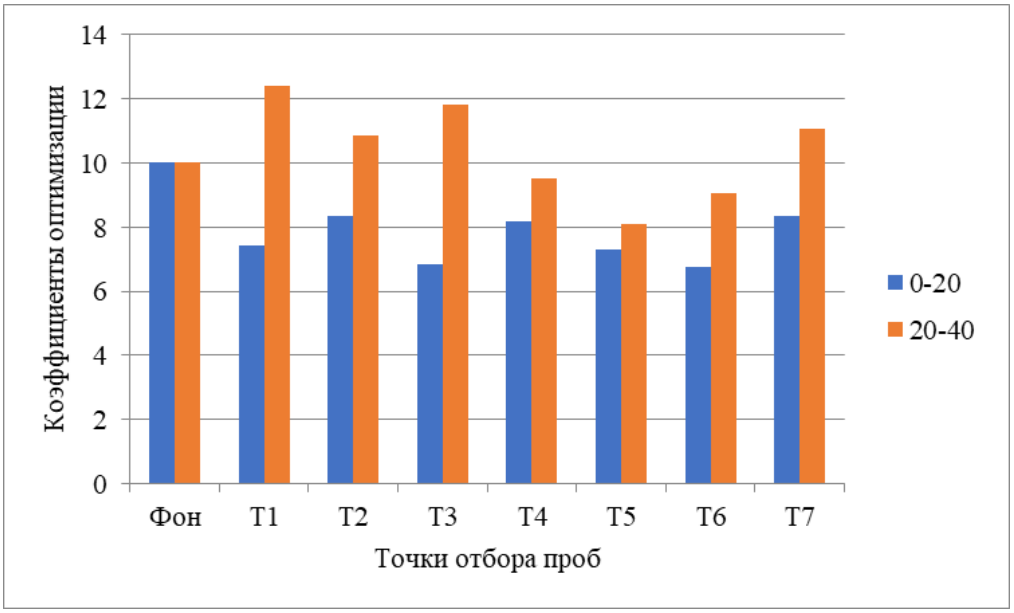



***Рисунок 6.*** Коэффициенты оптимизации темногумусовых фоновой постагрогенной и нефтезагрязненной почв.

Восстановление свойств и экологических функций темногумусовой почвы зависит от деструкции остаточных нефтепродуктов. В научной литературе освещены условия для успешного самоочищения почвы и методы ускорения биоразложения нефтепродуктов (Jain et al., 2011; Mbachu et al., 2020). В темногумусовой почве относительно благоприятная реакция почвенной среды. Кислород на всех этапах биодеградации нефти является наиболее распространенным поглотителем электронов; необходимый уровень аэрации в темногумусовой почве, вероятно, поддерживают комковатая структура, благоприятная плотность (1,04–1,06 г/см$^3$) и значительная доля мезоагрегатов (около 50%).

Биодеградационные процессы в нефтезагрязненных почвах рекомендуют ускорять стимуляцией местных микроорганизмов, добавляя питательные вещества (Coulon et al., 2005; Mbachu et al., 2020). В темногумусовой почве низкая обеспеченность подвижными фосфатами и подавление активности уреазы указывали на возможность активизировать микробиологическую деструкцию внесением азотно-фосфорных удобрений. В случае отсутствия положительных результатов от биостимуляции, предлагается внесение в почву активных штаммов углеводородокисляющих микроорганизмов (Abioye, 2011; Mbachu et al., 2020).

Биодеградацию нефти в почвах ограничивает низкая растворимость ее компонентов. Биосурфактанты – поверхностно-активные вещества – снижают поверхностное и межфазное натяжение углеводородов, способствуют их десорбции из частиц почвы, эмульгированию и микробиологическому разложению (Itrich et al., 2015; Karlapudi et al., 2018; Selva Filho et al., 2023). Эмульгирование нефти и ее растворение в воде под действием биосульфактантов дают возможность очистки почвы путем промывки на месте. Углеводороды мобилизуются путем образования мицелл с моющим раствором; затем раствор, содержащий загрязняющие вещества, собирается из нагнетательных скважин для обработки, удаления или повторной закачки в то же место. Загрязняющие вещества в мицеллярной фазе могут быть отделены и обработаны активированным углем, подвергнуты электрохимической обработке и деэмульгированию (Sajadi Bami et al., 2022).

Применение вышеуказанных экологических методов очистки нефтезагрязненных почв и последующий посев многолетних трав могли бы завершить процесс восстановления экологического потенциала темногумусовой почвы, относящейся к категории особо охраняемых почв в Пермском крае.

## ВЫВОДЫ

1. После аварийного разлива нефти на участке площадью 0,52 га была срезана верхняя часть (слой около 20 см) темногумусовой почвы. Через два года в слое 0–40 см темногумусовой почвы количество нефтепродуктов сильно варьировало и в среднем превысило региональные нормативы допустимого содержания остаточных нефтепродуктов.
2. Принадлежность нефтезагрязненной почвы к типу темногумусовые, подтипу метаморфизированные, роду – ненасыщенные основаниями, видам – сильногумусированные и слабонасыщенные основаниями не изменилась, но в результате срезки верхнего слоя почвы из среднемощной стала маломощной. Остаточный гумусовый горизонт по ряду физических свойств (гранулометрический состав, плотность, плотность твердой фазы) характеризовался сходством с фоновой почвой на глубине 20–40 см.
3. Негативные изменения в слое 0–40 см темногумусовой нефтезагрязненной почвы проявились в снижении пористости, ухудшении агрегатного состава, уменьшении содержания подвижных фосфора и калия, подавлении активности уреазы относительно показателей соотвествующего слоя фоновой почвы.
4. У темногумусовой нефтезагрязненной почвы снизилась способность к выполнению функции по обеспечению условий для роста и развития растений. Расчетные коэффициенты оптимизации почвы, особенно в слое 0–20 см, указывали на общее понижение экологического потенциала почвы.
5. Процессы биодеструкции остаточных нефтепродуктов в темногумусовой почве целесообразно активизировать путем применения минеральных удобрений, внесением активных штаммов углеводородокисляющих микроорганизмов или биосульфактантов – поверхностно активных веществ.

## ЛИТЕРАТУРА

Анчугова Е.М., Мелехина Е.Н., Маркарова М.Ю., Щемелинина Т.Н. Подходы к оценке методов рекультивации нефтезагрязненных почв // Почвоведение. 2016. № 2. С. 257–260. https://doi.org/10.7868/S0032180X16020027

Арзамазова А.В., Кинжаев Р.Р. Белецкая Д.В. Оценка токсичности нефтезагрязненных почв по показателям всхожести семян и длины корней проростков пшеницы (*Triticum aestivum* L.) // Проблемы агрохимии и экологии. 2020. № 4. С. 51–55. https://doi.org/10.26178/AE.2020.51.76.007

Вальков В.Ф., Елисеева Н.В., Имгрунт И.И, Казеев К.Ш., Колесников С.И. Справочник по оценке почв. Майкоп: ГУРИПП «Адыгея», 2004. 236 с.

Гилязов М.Ю., Гайси И.А. Основные итоги исследования нефтезагрязненных почв Республики Татарстан // Воспроизводство плодородия почв и продовольственная безопасность в современных условиях: сборник трудов Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию кафедры агрохимии и почвоведения Казанского ГАУ (Казань, 17 марта 2021 г.). Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2021. С. 22–25.

Еремченко О.З., Митракова Н.В. Способ оценки биологической активности и токсичности почв и техногенных грунтов. Патент на изобретение RU 2620555 C1, 26.05.2017. Заявка № 2016113050 от 05.04.2016, опубл. 26.05.2017.

Еремченко О.З., Шестаков И.Е., Москвина Н.В. Систематика и распространение редких почв в связи с развитием «почвенно-краснокнижных» работ в Пермском крае // Вестник Пермского университета. Серия: Биология. 2015. № 1. С. 41–48.

Замотаев И.В., Иванов И.В., Михеев П.В. Никонова А.Н. Химическое загрязнение и трансформация почв в районах добычи углеводородного сырья (обзор литературы) // Почвоведение. 2015. № 12. С. 1505–1518. https://doi.org/10.7868/S0032180X1512014X

Звягинцев Д.Г. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение. 1978. № 6. С. 48–54.

Иванова Н.А., Усачева Ю.Н. Абиотические и биотические факторы почвы в условиях нефтяного загрязнения // Вестник Оренбургского государственного университета. 2012. № 10(146). С. 143–148.

Классификация и диагностика почв России / Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

Коротаев Н.Я. Почвы Пермской области. Пермь: Книжное издательство, 1962. 278 с.

Об утверждении Порядка и мер охраны редких и находящихся под угрозой исчезновения почв, занесенных в Красную книгу почв Пермского края, перечня редких и находящихся под угрозой исчезновения почв, занесенных в Красную книгу почв Пермского края. Постановление Правительства Пермского края № 447-п от 27.05.2022 [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/406075140?ysclid=m3flczsbpy145069777 (дата обращения 03.03.2025).

Об утверждении региональных нормативов допустимого остаточного содержания нефти и продуктов ее трансформации в почвах Пермского края и порядка их применения. Постановление Правительства Пермского края № 813-п от 20.12.2018 [Электронный ресурс]. URL: https://publication.pravo.gov.ru/Document/View/5900201812240016 (дата обращения 03.03.2025).

Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Лозановская И.Н. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении. Учебное пособие для студентов химических, химико-технологических и биологических специальностей и направлений вузов. 2-е издание, переработанное и дополненное. Москва: Высшая школа, 2002. 334 с.

Певнева А.Г., Калинкина М.Е. Методы оптимизации. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2020. 64 с.

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

Поляк Ю.М., Бакина Л.Г. Оценка биоразнообразия микробоценозов нефтезагрязненных почв на разных этапах их восстановления // Почвы и окружающая среда: Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 55-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск, 2–6 октября 2023 года). Новосибирск: ФГБУН ИПА СО РАН, 2023. С. 565–568. https://doi.org/10.31251/conf1-2023

Почвообразовательные процессы: Научный материал процессов переорганизации почвенной массы / Российская академия сельскохозяйственных наук, Почвенный институт им. В.В. Докучаева / под ред. М.С. Симаковой, В.Д. Тонконогова. Москва: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2006. 13–37 с.

Протасова Л.А. Генетическая характеристика и диагностика дерново-бурых и дерново-карбонатных почв Пермского края. Пермь: Пермская государственная сельскохозяйственная академия имени академика Д.Н. Прянишникова, 2009. 135 с.

Сапцын Р.В., Еремченко О.З. Индикаторы эколого-биологического состояния нефтезагрязненной дерново-подзолистой почвы // АгроЭкоИнфо. 2023. № 4(58). https://doi.org/10.51419/202134410

Середина В.П. Оценка техногенного воздействия нефти на свойства почв Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. 2003. Том 306. № 2. С. 34–37.

Середина В.П. Загрязнение почв: учебное пособие. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2015. 346 с.

Структурно-функциональная роль почв и почвенной биоты в биосфере / Г.В. Добровольский, И.П. Бабьева, Л.Г. Богатырев и др.; Российская академия наук, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. Институт почвоведения. Москва: Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр Российской академии наук "Издательство "Наука", 2003. С. 335–346 с.

Тазетдинова Д.И., Антонов В.В., Газизов И.С., Алимова Ф.К. Ферментативная активность выщелоченных черноземов Восточного Закамья Волжско-Камской степи при синергетическом загрязнении тяжелыми металлами и углеводородами // Фундаментальные исследования. 2013. № 8–2. С. 364–369.

Теория и практика химического анализа почв / Под ред. Л.А. Воробьёвой. Москва: ГЕОС, 2006. 399 с.

Трофимов С.Я., Ковалева Е.И., Аветов Н.А. Толпешта И.И. Исследования нефтезагрязненных почв и перспективные подходы к их ремедиации // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2023. № 4. С. 83–93. https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-4-83-93

Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии / Российская академия наук, Уфимский научный центр, Институт биологии. Москва: Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр Российской академии наук "Издательство "Наука", 2005. 256 с.

Хазиев Ф.Х., Тишкина Е.И., Киреева Н.А., Кузяхметов Г.Г. Влияние нефтяного загрязнения на некоторые компоненты агроэкосистемы // Агрохимия. 1988. № 2. С. 56–61.

Шулаев Н.С., Пряничникова В.В., Кадыров Р.Р., Быковский Н.А., Даминева Р.М. Оценка изменения фитотоксичных свойств нефтезагрязненных почв по показателям всхожести и длины проростков *Lepidium sativum* L. после электрохимической очистки // Самарский научный вестник. 2019. Том 8. № 4(29). С. 103–107. https://doi.org/10.24411/2309-4370-2019-14118

Abioye O.P. Biological Remediation of Hydrocarbon and Heavy Metals Contaminated Soil // Soil Contamination. 2011. Vol. 7. P. 127–142. https://doi.org/10.5772/24938

Akhanova T.R., Lyubchenko N.P., Sarmurzina R.V., Karabalin U.S., Muhr H., Boiko G.I. Complex restoration of oil-contaminated soils with new organomineral reagents // Water, Air, and Soil Pollution. 2023. Vol. 234. No. 11. Article number 686. https://doi.org/10.1007/s11270-023-06689-8

Bünemann E.K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R.E., de Deyn G., de Goede R.G.M., Fleskens L., Geissen V., Kuyper T.W., Mäder P., Pulleman M., Sukkel W., van Groenigen J.W., Brussaard L. Soil quality – A critical review // Soil Biology and Biochemistry. 2018. Vol. 120. P. 105–125. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030

Daryaee R., Moosavi A.A., Ghasemi-Fasaei R., Riazi M. Review of the effects of oil pollutants on physicochemical and biological soil properties. In book: Biotechnology of Emerging Microbes. Prospects for Agriculture and Environment. Progress in Biochemistry and Biotechnology. Academic Press, 2024. P. 263–297. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15397-6.00014-0

Coulon F., Pelletier E., Gourhant L., Delille D. Effects of nutrient and temperature on degradation of petroleum hydrocarbons in contaminated sub-Antarctic soil // Chemosphere. 2005. Vol. 58. No. 10. P. 1439–1448. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.10.007

Itrich N.R., McDonough K.M., van Ginkel C.G., Bisinger E.C., LePage J.N., Schaefer E.C., Menzies J.Z., Casteel K.D., Federle T.W. Widespread microbial adaptation to l-Glutamate-N, N-diacetate (L-GLDA) following its market introduction in a consumer cleaning product // Environmental Science and Technology. 2015. Vol. 49. No. 22. P. 13314–13321. https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03649

Jain P.K., Gupta V.K., Gaur R.K., Lowry M., Jaroli D.P., Chauhan U.K. Bioremediation of Petroleum Oil Contaminated Soil and Water // Research Journal of Environmental Toxicology. 2011. Vol. 5. No. 1. P. 1–26.

Janků J., Kosánová M., Kozák J., Herza T., Jehlička J., Maitah M., Vopravil J., Němeček K., Toth D., Jacko K., Vácha R., Poláková J. Using soil quality indicators to assess their production and ecological functions // Soil and Water Research. 2022. Vol. 17. No. 1. P. 45–58. https://doi.org/10.17221/146/2021-SWR

IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 2022. 236 p.

Karlapudi A.P., Venkateswarulu T.C., Tammineedi J., Kanumuri L., Ravuru B.K., Ramu Dirisala V., Kodali V.P. Role of biosurfactants in bioremediation of oil pollution-a review // Petroleum. 2018. Vol. 4. No. 3. P. 241–249. https://doi.org/10.1016/j.petlm.2018.03.007

Karlen D.L., Mausbach M.J., Doran J.W., Cline R.G., Harris R.F., Schuman G.E. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation // Soil Science Society of America Journal. 1997. Vol. 61. No. 1. P. 4–10. https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x

Koohkan H., Mortazavi M.S., Golchin A., Najafi-Ghiri M., Golkhandan M., Akbarzadeh-Chomachaei G., Saraji F.The effect of petroleum levels on some soil biological properties under phytoremediation and bioaugmentation // Environmental Science and Pollution Research. 2023. Vol. 30. P. 60618–60637. https://doi.org/10.1007/s11356-023-26730-x

Leewis M.-C., Kasanke C., Uhlík O., Leigh M. B. Long-term legacy of phytoremediation on plant succession and soil microbial communities in petroleum-contaminated sub-Arctic soils // Soil. 2024. Vol. 10. No. 2. P. 551–566. https://doi.org/10.5194/soil-10-551-2024

Mbachu A.E., Chukwura E.I., Mbachu N.A. Role of microorganisms in the degradation of organic pollutants: a review // Energy and Environmental Engineering. 2020. Vol. 7. No. 1. P. 1–11. https://doi.org/10.13189/eee.2020.070101

Mekkiyah H.M., Al-Hamadani Y.A.J., Abdulhameed A.A., Resheq A.S., Mohammed Z.B. Effect of crude oil on the geotechnical properties of various soils and developed remediation methods // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. No. 16. P. 9103. https://doi.org/10.3390/app13169103

Morachevskaya E.V., Voronina L.P. Bioassay as a method of integral assessment for remediation of oil-contaminated ecosystems // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 34–43. https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-1-034-043

Polyak Y.M., Bakina G.L., Chugunova M.V., Mayachkina N.V. Gerasimov A.O., Bure V.M. Effect of remediation strategies on biological activity of oil-contaminated soil-A field study // International Biodeterioration & Biodegradation. 2018. Vol. 126. P. 57–68. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.10.004

Sajadi Bami M., Raeisi Estabragh M.A., Ohadi M., Banat I.M., Dehghannoudeh G. Biosurfactants aided bioremediation mechanisms: A mini-review // Soil and Sediment Contamination: An International Journal. 2022. Vol. 31. No. 7. P. 801–817. https://doi.org/10.1080/15320383.2021.2016603

Sánchez Mata O., Aguilera-Flores M.M., Ureño-García B.G., Ávila-Vázquez V., Cabañas-García E., Franco-Villegas E.A. Bioremediation of automotive residual oil-contaminated soils by biostimulation with enzymes, surfactant, and vermicompost // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2023. Vol. 20. No. 16. Article number 6600. https://doi.org/10.3390/ijerph20166600

Selva Filho A.A.P., Converti A., Soares da Silva R.D.C.F., Sarubbo L.A. Biosurfactants as multifunctional remediation agents of environmental pollutants generated by the petroleum industry // Energies. 2023. Vol. 16. No. 3. P. 1209. https://doi.org/10.3390/en16031209

Wu M., Dick W.A., Li W., Wang X., Yang Q., Wang T., Xu L., Zhang M., Chen L. Bioaugmentation and biostimulation of hydrocarbon degradation and the microbial community in a petroleum-contaminated soil // International Biodeterioration and Biodegradation. 2016. Vol. 107. P. 158–164. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.11.019

*Поступила в редакцию 18.03.2025*
*Принята 20.11.2025*
*Опубликована 12.01.2026*

**Сведения об авторах:**

**Сапцын Руслан Вячеславович** – учитель, Лицей с углубленным изучением отдельных предметов ФГАОУ ВО ««Пермский государственный национальный исследовательский университет» (г. Пермь, Россия); ruslansaptsyn@gmail.com

**Еремченко Ольга Зиновьевна** – доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры физиологии растений и экологии почв ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (г. Пермь, Россия); eremch@psu.ru; https://orcid.org/0000-0003-3581-0874

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License

# Investigation of the oil-polluted dark-humus soil properties

**© 2026 R. V. Saptsyn, O. Z. Eremchenko**

*Perm State University, st. Bukireva, 15, Perm, 614068, Russia. E-mail: ruslansaptsyn@gmail.com, eremch@mail.psu.ru*

***The aim of the study*** *was to assess the properties and ability to perform ecological functions by dark-humus soil (Rendzic Phaeozem) exposed to oil contamination and subsequent reclamation by cutting the contaminated layer.*

***Location and time of the study.*** *An accidental oil spill in the southern taiga subzone of the Perm Krai in 2020 resulted in the contamination of the dark-humus soil over an area of 0,52 hectares. The contaminated vegetation and topsoil were removed and transported for remediation to a specialized organization. Dark-humus soil is classified as a specially protected category of soil in the region. In 2023, soil samples were collected from the 0–20 cm and 20–40 cm layers at seven sites within the contaminated area; a post-agrogenic dark-humus soil was used as the reference standard.*

***Methods****. The soil samples were analyzed for the following parameters: residual petroleum hydrocarbon content, pH (water and salt suspension), hydrolytic acidity, total exchangeable bases, organic matter content, available phosphates and potassium, catalase, urease, and invertase activity, soil bulk density, particle density, aggregate composition, porosity, and particle-size distribution. Soil phytotoxicity was assessed using a garden cress (Lepidium sativum L.) bioassay by measuring the shoot length and fresh biomass. The significance of differences from the baseline (control) soil was determined by one-way ANOVA using the Kruskal-Wallis test at a significance level of $p<0,05$. An integrated assessment of the oil-contaminated soil condition was performed using a mathematical optimization method.*

***Results.*** *The background soil was diagnosed according to the classification and diagnostics of soils of Russian (2004) as post-agrogenic, metamorphic, unsaturated, medium-thick, highly humic, weakly saturated, clayey*

*dark-humus soil. The dynamics of residual oil content in the 0–20 cm layer of the soil showed a 50% average reduction during the first year. Subsequently, the soil self-cleaning process slowed down, with only a 12% average reduction in oil content by 2022. The following annual 42% reduction in residual oil content resulted from soil loosening, which appeared to activate hydrocarbon-oxidizing microorganisms.The negative status of the upper contaminated soil layers manifested through reduced porosity, deteriorated aggregate composition, and impaired mineral nutrition (based on available phosphate and potassium content, and urease activity) compared to the background post-agrogenic soil. After removing the surface contaminated layer, the residual dark-humus horizon showed similarity to the background soil at 20-40 cm depth in particle-size distribution, bulk density and particle density. Phytotesting results indicated that the oil-contaminated soil had diminished capacity to support normal plant growth and development.*

***Conclusions.*** *After the removal of the upper oil-contaminated layer, residual oil pollution, the complex of soil properties and calculated optimization coefficients indicated a reduced ecological potential of the specially protected dark-humus soil.*

***Keywords:*** *oil pollution; dark humus soil (Rendzic Phaeozem); property changes; ecological functions.*

***How to cite:*** *Saptsyn R.V., Eremchenko O.Z. Investigation of the oil-polluted dark-humus soil properties. The Journal of Soils and Environment. 2026. 9(1). e305. DOI: 10.31251/pos.v9i1.305 (in Russian with English abstract).*

REFERENCES

Anchugova E.M., Melekhina E.N., Markarova M.Y., 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

Arzamazova A.V., Kinzhaev R.R., Beletskaya D.V. Estimation of toxicity of oil-contaminated soils by indicators of seed germination rate and root length of wheat (*Triticum aestivum L.*) sprouts. Agrochemistry and Ecology Problems. 2020. No. 4. P. 51–55. (in Russian). https://doi.org/10.26178/AE.2020.51.76.007

Valkov V.F., Eliseeva N.V., Imgrunt I.I., Kazeev K.S., Kolesnikov S.I. Handbook of soil assessment. Maykop: "Adygeya", 2004. 236 p. (in Russian).

Gilyazov M.Yu., Gaysin I.A. Main results of the study of oil-contaminated soils of the Republic of Tatarstan. In book: Soil fertility restoration and food security in modern conditions. Collection of works of the International scientific and practical conference dedicated to the 100th anniversary of the Department of Agrochemistry and Soil Science of Kazan State Agrarian University (Kazan, 17 March, 2021). Kazan: Publishing House of Kazan State Agrarian University, 2021. P. 22–25. (in Russian).

Eremchenko O.Z., Mitrakova N.V. Method for assessing the biological activity and toxicity of soils and technogenic grounds. Patent for invention RU 2620555 C1, 26 May, 2017. Application No. 2016113050 dated 5 April, 2016, published 26 May, 2017. (in Russian).

Eremchenko O.Z., Shestakov I.E., Maximova S.E. Systematization and spreading of rare soils in connection with development "soil - red book" works in the Perm krai. Bulletin of Perm University. Biology 2015. No. 1. P. 41–48. (in Russian).

Zamotaev I.V., Nikonova A.N., Ivanov I.V., Mikheev P.V. Chemical contamination and transformation of soils in hydrocarbon production regions. Eurasian Soil Science. 2015. Vol. 48. No. 12. P. 1370–1382. https://doi.org/10.1134/S1064229315120133

Zvyagintsev D.G. Biological activity of soils and scales for assessing some of its indicators. Pochvovedenie. 1978. No. 6. P. 48–54. (in Russian).

Ivanova N.A., Usacheva Yu.N. Abiotic and biotic factors of oil contaminated soil. Vestnik of the Orenburg State University. 2012. No. 10(146). P. 143–148. (in Russian).

Classification and diagnostics of soils of Russian / Authors and compilers: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimov. Smolensk: Oykumena Publ., 2004. 342 p. (in Russian).

Korotaev N.Ya. Soils of the Perm Region. Perm: Book Publishing House, 1962. 278 p. (in Russian).

On approval of the Procedure and measures for the protection of rare and endangered soils listed in the Red Book of Soils of Perm Krai, the list of rare and endangered soils listed in the Red Book of Soils of Perm Krai. Resolution of the Government of Perm Krai No. 447-p of 27 May, 2022 [Electronic resource]. URL: https://docs.cntd.ru/document/406075140?ysclid=m3flczsbpy145069777 (accessed on 03.03.2025). (in Russian).

On approval of regional standards for permissible residual oil and oil transformation products content in soils of Perm Krai and the procedure for their application. Resolution of the Government of Perm Krai No. 813-p of December 20,

2018 [Electronic resource]. URL: https://publication.pravo.gov.ru/Document/View/5900201812240016 (accessed on 03.03.2025). (in Russian).

Orlov D.S., Sadovnikova L.K., Lozanovskaya I.N. Ecology and Protection of the Biosphere during Chemical Pollution. Textbook for students of chemical, chemical-engineering, and biological specialties and areas of study at universities. 2nd edition, revised and supplemented. Moscow: Vysshaya shkola, 2002. 334 p. (in Russian).

Pevneva A.G., Kalinkina M.E. Optimization Methods. St. Petersburg: St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2020. 64 p. (in Russian).

Pikovskii Yu.I., Gennadiev A.N., Chernyanskii S.S., Sakharov G.N. The problem of diagnostics and standardization of the levels of soil pollution by oil and oil products. Eurasian Soil Science. 2003. Vol. 36. No. 9. P. 1010–1017.

Polyak Yu.M., Bakina L.G. Assessment of biodiversity of microbocenoses of oil-contaminated soils at different stages of their restoration. In book: Soils and the Environment. Collection of scientific papers of the All-Russian scientific conference with international participation dedicated to the 55th anniversary of the Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS (Novosibirsk, 2–6 October, 2023). Novosibirsk: ISSA SB RAS, 2023. P. 565–568. (in Russian). https://doi.org/10.31251/conf1-2023

Soil-forming processes: Scientific material on the processes of soil mass reorganization / Russian Academy of Agricultural Sciences, V.V. Dokuchaev Soil Institute / edited by M.S. Simakova, V.D. Tonkonogov. Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Institute, 2006. 13–37 p. (in Russian).

Protasova L.A. Genetic characteristics and diagnostics of sod-brown and sod-carbonate soils of Perm Krai. Perm: Perm State Agricultural Academy named after Academician D.N. Pryanishnikov, 2009. 135 p. (in Russian).

Saptsyn R.V., Eremchenko O.Z. Indicators of the ecological and biological state of oil-contaminated sod-podzolic soil. AgroEcoInfo. 2023. No. 4(58). (in Russian). https://doi.org/10.51419/202134410

Seredina V.P. Estimation of technogenic influence of oil on the soil properties in the Western Siberia. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2003. Vol. 306. No. 2. P. 34–37. (in Russian).

Seredina V.P. Soil Pollution: A Textbook. Tomsk: Publishing House of Tomsk State University, 2015. 346 p. (in Russian).

Structural and functional role of soils and soil biota in the biosphere / G.V. Dobrovolsky, I.P. Babeva, L.G. Bogatyrev, et al.; Russian Academy of Sciences, M.V. Lomonosov Moscow State University. Institute of Soil Science. Moscow: Academic Scientific Publishing, Production, Printing and Book Distribution Center of the Russian Academy of Sciences "Nauka Publishing House", 2003. P. 335–346. (in Russian).

Tazetdinova D.I., Antonov V.V., Gazizov I.S., Alimova F.K. The enzymatic activity of leached chernozem of Eastern Zakamye of Volga-Kama steppe under synergetic contamination with heavy metals and hydrocarbons. Fundamental research. 2013. No. 8–2. P. 364–369. (in Russian).

Theory and practice of chemical analysis of soils / L.A. Vorobyova (ed.). Moscow: GEOS, 2006. 399 p. (in Russian).

Trofimov S.Ya., Kovaleva E.I., Awetov N.A., Tolpeshta I.I. Studies of oilcontaminated soils and forwardlooking approaches to their remediation. Lomonosov Soil Science Journal. 2023. No. 4. P. 83–93. (in Russian). https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-4-83-93

Khaziev F.Kh. Methods of soil enzymology / Russian Academy of Sciences, Ufa Research Center, Institute of Biology. Moscow: Academic Scientific Publishing, Production, Printing and Book Distribution Center of the Russian Academy of Sciences "Nauka Publishing House", 2005. 256 p. (in Russian).

Khaziev F.Kh., Novoselova E.I., Kireeva N.A., Kuzyakhmetov G.G. Effect of oil pollution on some components of agroecosystems. Agrokhimia. 1988. No. 2. P. 56–61. (in Russian).

Shulaev N.S., Pryanichnikova V.V., Kadyrov R.R., Bykovskiy N.A., Damineva R.M. Assessment of changes in the phytotoxic properties of oil-contaminated soils in terms of germination and seedlings length of Lepidium sativum L. after electrochemical cleaning. Samara Journal of Science. 2019. Vol. 8. No. 4(29). P. 103–107. (in Russian). https://doi.org/10.24411/2309-4370-2019-14118

Abioye O.P. Biological Remediation of Hydrocarbon and Heavy Metals Contaminated Soil. Soil Contamination. 2011. Vol. 7. P. 127–142. https://doi.org/10.5772/24938

Akhanova T.R., Lyubchenko N.P., Sarmurzina R.V., Karabalin U.S., Muhr H., Boiko G.I. Complex restoration of oil-contaminated soils with new organomineral reagents. Water, Air, and Soil Pollution. 2023. Vol. 234. No. 11. Article number 686. https://doi.org/10.1007/s11270-023-06689-8

Bünemann E.K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R.E., de Deyn G., de Goede R.G.M., Fleskens L., Geissen V., Kuyper T.W., Mäder P., Pulleman M., Sukkel W., van Groenigen J.W., Brussaard L. Soil quality – A critical review. Soil Biology and Biochemistry. 2018. Vol. 120. P. 105–125. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030

Daryaee R., Moosavi A.A., Ghasemi-Fasaei R., Riazi M. Review of the effects of oil pollutants on physicochemical and biological soil properties. In book: Biotechnology of Emerging Microbes. Prospects for Agriculture and Environment. Progress in Biochemistry and Biotechnology. Academic Press, 2024. P. 263–297. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15397-6.00014-0

Coulon F., Pelletier E., Gourhant L., Delille D. Effects of nutrient and temperature on degradation of petroleum hydrocarbons in contaminated sub-Antarctic soil. Chemosphere. 2005. Vol. 58. No. 10. P. 1439–1448. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.10.007

Itrich N.R., McDonough K.M., van Ginkel C.G., Bisinger E.C., LePage J.N., Schaefer E.C., Menzies J.Z., Casteel K.D., Federle T.W. Widespread microbial adaptation to l-Glutamate-N, N-diacetate (L-GLDA) following its market introduction in a consumer cleaning product. Environmental Science and Technology. 2015. Vol. 49. No. 22. P. 13314–13321. https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03649

Jain P.K., Gupta V.K., Gaur R.K., Lowry M., Jaroli D.P., Chauhan U.K. Bioremediation of Petroleum Oil Contaminated Soil and Water. Research Journal of Environmental Toxicology. 2011. Vol. 5. No. 1. P. 1–26.

Janků J., Kosánová M., Kozák J., Herza T., Jehlička J., Maitah M., Vopravil J., Němeček K., Toth D., Jacko K., Vácha R., Poláková J. Using soil quality indicators to assess their production and ecological functions. Soil and Water Research. 2022. Vol. 17. No. 1. P. 45–58. https://doi.org/10.17221/146/2021-SWR

IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 2022. 236 p.

Karlapudi A.P., Venkateswarulu T.C., Tammineedi J., Kanumuri L., Ravuru B.K., Ramu Dirisala V., Kodali V.P. Role of biosurfactants in bioremediation of oil pollution-a review. Petroleum. 2018. Vol. 4. No. 3. P. 241–249. https://doi.org/10.1016/j.petlm.2018.03.007

Karlen D.L., Mausbach M.J., Doran J.W., Cline R.G., Harris R.F., Schuman G.E. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation. Soil Science Society of America Journal. 1997. Vol. 61. No. 1. P. 4–10. https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x

Koohkan H., Mortazavi M.S., Golchin A., Najafi-Ghiri M., Golkhandan M., Akbarzadeh-Chomachaei G., Saraji F.The effect of petroleum levels on some soil biological properties under phytoremediation and bioaugmentation. Environmental Science and Pollution Research. 2023. Vol. 30. P. 60618–60637. https://doi.org/10.1007/s11356-023-26730-x

Leewis M.-C., Kasanke C., Uhlík O., Leigh M. B. Long-term legacy of phytoremediation on plant succession and soil microbial communities in petroleum-contaminated sub-Arctic soils. Soil. 2024. Vol. 10. No. 2. P. 551–566. https://doi.org/10.5194/soil-10-551-2024

Mbachu A.E., Chukwura E.I., Mbachu N.A. Role of microorganisms in the degradation of organic pollutants: a review. Energy and Environmental Engineering. 2020. Vol. 7. No. 1. P. 1–11. https://doi.org/10.13189/eee.2020.070101

Mekkiyah H.M., Al-Hamadani Y.A.J., Abdulhameed A.A., Resheq A.S., Mohammed Z.B. Effect of crude oil on the geotechnical properties of various soils and developed remediation methods. Applied Sciences. 2023. Vol. 13. No. 16. P. 9103. https://doi.org/10.3390/app13169103

Morachevskaya E.V., Voronina L.P. Bioassay as a method of integral assessment for remediation of oil-contaminated ecosystems. Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 1. P. 34–43. https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-1-034-043

Polyak Y.M., Bakina G.L., Chugunova M.V., Mayachkina N.V. Gerasimov A.O., Bure V.M. Effect of remediation strategies on biological activity of oil-contaminated soil-A field study. International Biodeterioration & Biodegradation. 2018. Vol. 126. P. 57–68. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.10.004

Sajadi Bami M., Raeisi Estabragh M.A., Ohadi M., Banat I.M., Dehghannoudeh G. Biosurfactants aided bioremediation mechanisms: A mini-review. Soil and Sediment Contamination: An International Journal. 2022. Vol. 31. No. 7. P. 801–817. https://doi.org/10.1080/15320383.2021.2016603

Sánchez Mata O., Aguilera-Flores M.M., Ureño-García B.G., Ávila-Vázquez V., Cabañas-García E., Franco-Villegas E.A. Bioremediation of automotive residual oil-contaminated soils by biostimulation with enzymes, surfactant, and vermicompost. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2023. Vol. 20. No. 16. Article number 6600. https://doi.org/10.3390/ijerph20166600

Selva Filho A.A.P., Converti A., Soares da Silva R.D.C.F., Sarubbo L.A. Biosurfactants as multifunctional remediation agents of environmental pollutants generated by the petroleum industry. Energies. 2023. Vol. 16. No. 3. P. 1209. https://doi.org/10.3390/en16031209

Wu M., Dick W.A., Li W., Wang X., Yang Q., Wang T., Xu L., Zhang M., Chen L. Bioaugmentation and biostimulation of hydrocarbon degradation and the microbial community in a petroleum-contaminated soil. International Biodeterioration and Biodegradation. 2016. Vol. 107. P. 158–164. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.11.019

*Received 18 March 2025*
*Accepted 20 November 2025*
*Published 12 January 2026*

**About the authors:**

**Ruslan V. Saptsyn –** Teacher of the Lyceum with advanced studies in specific subjects of the Perm State University (Perm, Russia); ruslansaptsyn@gmail.com

**Olga Z. Eremchenko –** Doctor of Biological Sciences, Professor, Professor of the Department of Plant Physiology and Soil Ecology of the Perm State University (Perm, Russia); eremch@psu.ru; https://orcid.org/0000-0003-3581-0874

*The authors read and approved the final manuscript*

The article is available under Creative Commons Attribution 4.0 License