



Научная статья

Геотехнология и инженерная геология

Экологическая оценка применения биочара для ремедиации нефтезагрязненных почв при различном хозяйственном использовании

Т.В.Минникова✉, С.И.Колесников

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

Как цитировать эту статью: Минникова Т.В., Колесников С.И. Экологическая оценка применения биочара для ремедиации нефтезагрязненных почв при различном хозяйственном использовании // Записки Горного института. 2025. Т. 271. № 16293. С. 84-94. [EDN UOQKTG](#)

Аннотация

Ремедиация – важное направление восстановления нефтезагрязненных почв в России, поскольку нефтеперерабатывающая отрасль является основной для России и соседних стран, а вопросы экологически эффективной и экономически рентабельной ремедиации нефтяного загрязнения до сих пор не разработаны. Почвы разного хозяйственного использования обладают разными площадью поверхности и степенью обволакивания почвенных частиц нефтью ввиду наличия или отсутствия обработки, количества атмосферных осадков и растительного опада. Внесение разнообразных веществ с целью ремедиации в нефтезагрязненные почвы степей (пашня), лесов и полупустынь с учетом различий дают неодинаковый результат. Биочар – это уголь, получаемый путем пиролиза при высоких температурах и отсутствии кислорода. Уникальность этого угля состоит в сочетании свойств биостимулятора и адсорбента. Цель исследования – провести экологическую оценку применения биочара для ремедиации нефтезагрязненных почв при различном хозяйственном использовании. Представлены результаты сравнения экологической оценки использования биочара в нефтезагрязненных почвах разного гранулометрического состава. Определены показатели биологической активности почвы: ферменты, показатели интенсивности начального роста и развития редиса, микробиологические показатели. Установлено, что наиболее информативный биологический показатель, коррелирующий с остаточным содержанием нефти – общая численность бактерий, а наиболее чувствительные – длина корней (чернозем обыкновенный и бурая лесная почва) и длина побегов (бурая полупустынная почва). Применение биочара на пашне и в лесной почве (чернозем обыкновенный и бурая лесная почва) менее экологически эффективно, чем в почве полупустыни (бурая полупустынная почва). Результаты исследования могут быть использованы для разработки мероприятий и организационно-технических решений при ремедиации нефтезагрязненных почв различного хозяйственного использования.

Ключевые слова

загрязнение почв; нефть; чернозем обыкновенный; бурая лесная почва; бурая полупустынная почва; остаточное содержание нефти; интегральный показатель биологического состояния

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта Программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета («Приоритет 2030») № СП-12-23-01; Министерства науки и высшего образования РФ в лаборатории «Здоровье почвы» Южного федерального университета, соглашение № 075-15-2022-1122; проекта Министерства науки и высшего образования РФ по поддержке молодежной лаборатории в рамках Межрегионального научно-образовательного центра Юга России, № FENW-2024-0001.

Поступила: 31.07.2023

Принята: 07.11.2024

Онлайн: 05.02.2025

Опубликована: 25.02.2025

Введение

Нефть – это самое распространенное сырье для производства топлива в мире [1]. Несмотря на современные системы защиты танкеров и нефтепроводов при транспортировке нефти, количество аварий за последние пару лет участилось в разы как за рубежом^{1,2}, так и в России³. Кроме того,

¹ Пять крупных экологических аварий 2022 года. URL: <https://www.angi.ru/news/2904237-Пять%20крупных%20экологических%20аварий%202022%20года/> (дата обращения 31.07.2023).

² 800 тонн мазута оказались в море после крушения нефтяного танкера MT Princess Empress на Филиппинах. URL: <https://ecosphere.press/2023/03/09/800-tonn-mazuta-okazalis-v-more-posle-krusheniya-neftyanogo-tankera-mt-princess-empress-na-filippinah> (дата обращения 31.07.2023).

³ В российском регионе произошел разлив нефти. URL: <https://lenta.ru/news/2023/01/30/razliv/> (дата обращения 31.07.2023).



в чистых почвах без внешнего источника загрязнения также содержатся углеводороды, имеющие преимущественно автохтонное природное происхождение [2]. В результате загрязнения нефтью и нефтепродуктами происходит ухудшение биологического состояния почв за счет нарушения экологических и сельскохозяйственных функций [3]. Для снижения уровня загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами существует два направления: 1) предупреждение загрязнения; 2) ликвидация последствий загрязнения с нанесением минимального ущерба окружающей среде [4-6].

На территории Пермского края мониторинг различных источников загрязнения окружающей среды нефтью и нефтепродуктами осуществляется с помощью беспилотных летательных аппаратов [7]. Для очистки почвы применение радикальных методов санации как изъятие загрязненного слоя недопустимо, поскольку приводит к деградации верхнего слоя почвы и ее отчуждению. Фиторемедиация – один из малоэффективных, но очень щадящих методов восстановления состояния почв [8]. Эффективность фиторемедиации ограничивается высокой концентрацией нефти (не более 1,5 %), гидрофобностью почв, необходимостью отбора растений применительно к каждой ситуации загрязнения [9, 10]. Высокая гидрофобность почв обуславливает снижение роста и развития растений за счет нарушения водного обмена в клетках как фотосинтетического аппарата, так и в стеблях и корневой системе [11, 12]. В связи с этим применение фиторемедиации рекомендуется сочетать с другими видами ремедиации, например внесением оксида кальция или карбонатным капсулированием [13].

Необходимо оценить применение современных методов биоремедиации нефтезагрязненных почв без дорогостоящего удаления верхнего плодородного слоя или применения малоэффективных фиторемедиантов [14, 15]. Методы биоремедиации предполагают применение биостимуляторов и биоаугментаторов, которые снижают количественное содержание нефти и возвращают почву в состояние, близкое к экологическому до момента загрязнения. Одним из веществ, часто применяемых для биоремедиации почвы, загрязненной нефтью и нефтепродуктами, тяжелыми металлами, является биочар [16, 17]. Производство биочара в основном реализуется за счет сельскохозяйственных отходов (рисовая и пшеничная солома, кукурузный и хлопковый стебли, другие остатки травяной растительности), лесных отходов (древесина различных пород деревьев), отходов животноводства (свиной, коровий навоз) и осадков городских сточных вод. Применение биочара из рисовой шелухи вместе с бактериальными препаратами (БП) в нефтезагрязненной почве регулирует процесс сукцессии микробного сообщества и увеличивает численность микроорганизмов, связанных с разложением нефти на уровне рода [18]. Биочар из рисовой шелухи также способствует увеличению численности почвенных грибов [19]. Внесение биочара с компостом вместе со снижением содержания нефти увеличивает показатели роста и развития пшеницы (*Triticum aestivum* L.), кукурузы (*Zea mays* L.), белого клевера (*Trifolium repens* L.), люцерны (*Medicago sativa* L.) и райграса (*Lolium multiflorum* Lam.) [20]. Биочар, внесенный вместе с микоризой в загрязненную почву, благотворно влиял на рост и развитие клевера (*Trifolium arvense* L.) и мальвы (*Malva sylvestris* L.), а также способствовал разложению нефти [21]. Биочар, полученный из кукурузы, выбран в качестве носителя для иммобилизации микроорганизмов-нефтедеструкторов: наилучший размер частиц составил 0,08 мм, а наилучшее время иммобилизации – 18 ч [22]. Внесение биочара и рамнолипида в заболоченную почву, загрязненную нефтью водно-болотных угодий Луизианы (США), позволило увеличить биомассу водорослей, привело к росту грамположительных бактерий, актиномицетов, арбускулярных микоризных грибов и к снижению концентрации нефти [23]. Несмотря на преимущества биочара по сравнению с другими веществами, при ремедиации почвы, загрязненной нефтью и нефтепродуктами, не всегда его применение экологически целесообразно [24-26]. При ремедиации биочаром важную роль играют тип почв и концентрация вещества [27-29]. Внесение биочара может как способствовать восстановлению, так и оказать токсическое воздействие на почвенную биоту и вызвать отчуждение почвы [30-32].

Цель – провести экологическую оценку применения биочара для ремедиации нефтезагрязненных почв при различном хозяйственном использовании. Были поставлены следующие задачи: оценить остаточное содержание нефти в почвах различного хозяйственного использования (пашня, лес и полупустыня) после применения биочара; проанализировать изменение биологических показателей состояния почв; оценить экологическую эффективность биочара в почвах после нефтезагрязнения.



Методы

Для исследования эффективности биочара при ремедиации нефтезагрязненных почв при разном хозяйственном использовании (пашня, лес и полупустыня) были рассмотрены: чернозем обыкновенный (Haplic Chernozem Loamic), бурая лесная (Haplic Cambisols) и бурая полупустынная почвы (Endosalic Calcisols Yermic) [33] (табл.1). Выбор типов почв обусловлен тем, что как в Ростовской обл. (чернозем обыкновенный), так и в буково-грабовом лесу Республики Адыгея (бурая лесная почва), и в степях Республики Калмыкия (бурая полупустынная почва) добывают, перерабатывают или транспортируют нефть и нефтепродукты [34, 35]. Типы почв различаются типом угодья, видами растительности, гранулометрическим составом, реакцией почвенной среды (рН), емкостью катионного обмена (ЕКО) и содержанием органического вещества $C_{орг}$.

Воздушно-сухая почва каждого типа просеивалась через сито 2 мм и увлажнялась, затем в вегетационный сосуд вносилась нефть концентрации 5 % от массы почвы. После того, как почва была загрязнена, в нее вносился биочар в трех концентрациях: рекомендуемая – 5 %; в два раза меньше рекомендуемой – 2,5 %; в два раза больше рекомендуемой – 10 % от массы почвы.

Таблица 1

Места отбора и характеристики незагрязненных почв

Тип почвы	Координаты	Место отбора	Тип угодья	рН	$C_{орг}$, %	ЕКО, мг-экв/100 г [36]	Гранулометрический состав
Чернозем обыкновенный	47°14'17.54"N; 39°38'33.22"E	Ростовская обл., Ростов-на-Дону, Ботанический сад ЮФУ	Пашня	7,3	7,6	33,6	Тяжелый суглинок
Буряя лесная	44°10'39.76"N; 40° 9'27.47"E	Республика Адыгея, Майкопский район, п. Никель	Буково-грабовый лес	5,3	1,3	24,3	Тяжелый суглинок
Буряя полупустынная	46°17'48.65"N; 46°41'40.06"E	Республика Калмыкия, Наримановский район, п. Дрофиный	Полупустыня	6,7	1,0	6,5	Легкий суглинок

После инкубации загрязненных почв проводился анализ остаточного содержания нефти и нефтепродуктов методом инфракрасной спектроскопии с использованием в качестве экстрагента четыреххлористого углерода (ПНД Ф 16.1: 2.2.22-98).

Для оценки экологической эффективности применения биочара исследовались остаточное содержание нефти и биологические показатели, характеризующие экологическое состояние почвы (табл.2).

Таблица 2

Методы оценки экологического состояния нефтезагрязненных почв после ремедиации

Биологический показатель	Метод измерения	Источник
Активность каталазы (H_2O_2 : H_2O_2 – оксидоредуктаза, КФ 1.11.1.6)	Волюметрический, оценивающий объем вытесненной кислородом воды в результате разложения перекиси водорода при контакте с почвой, мл O_2 /1 г почвы за 1 мин	[37]
Активность дегидрогеназ (субстрат: НАД (Ф) – оксидоредуктаза, КФ 1.1.1.1)	Восстановление в анаэробных условиях трифенилтетразолия хлористого (ТТХ) до трифенилформазанов (ТФФ) со спектрофотометрическим окончанием, мг ТФФ/10 г почвы за 24 ч	[38]
Общая численность бактерий	Люминесцентная микроскопия с использованием красителя акридин-оранжевый при увеличении $\times 40$. Численность бактерий, млрд бактерий/1 г почвы	[39]
Длина побегов редиса	Через 7 дней после начала фитотоксического эксперимента измерялась длина побегов редиса (<i>Raphanus sativus</i> L.), мм	[40]
Длина корней редиса	Через 7 дней после начала фитотоксического эксперимента измерялась длина корней редиса (<i>Raphanus sativus</i> L.), мм	[40]
Всхожесть редиса	Оценка всхожести редиса (<i>Raphanus sativus</i> L.) через 7 дней эксперимента, %	[40]



По результатам определения биологических показателей вычислялся интегральный показатель биологического состояния почв (ИПБС) [41]. Для ИПБС чернозема обыкновенного рассчитывались относительные значения каждого показателя в сравнении с незагрязненной почвой (контроль – 100 %). Относительные значения этого показателя для других вариантов опытов:

$$B_1 = \frac{B_x}{B_{\max}} \cdot 100 \%,$$

где B_1 – относительный балл показателя; B_x – фактическое значение биологического показателя; B_{\max} – максимальное значение показателя в контроле.

Следующий этап расчета ИПБС – суммирование относительных значений биологических показателей и расчет средних баллов:

$$B_{\text{ср}} = \frac{B_1 + B_2 + \dots + B_n}{N},$$

где $B_{\text{ср}}$ – средний оценочный балл показателей; N – количество показателей.

Итоговый этап расчета:

$$\text{ИПБС} = \frac{B_{\text{ср}}}{B_{\text{ref}}} \cdot 100 \%,$$

где B_{ref} – значение контроля, усредненное по всем биологическим показателям.

Статистическая обработка результатов выполнена в программе Statistica 12.0. Средние значения и дисперсия были определены с использованием дисперсионного анализа (Student's t-test).

Обсуждение результатов

Остаточное содержание нефти (рис.1) после 30 сут эксперимента и добавления биочара снижалось на 10-27 % (чернозем обыкновенный), 7-24 % (бурая лесная) и 7-27 % (бурая полупустынная). Чем больше доза биочара, тем эффективнее процесс разложения нефти в почве.

Согласно уравнениям регрессии и коэффициентам детерминации, наиболее тесная связь между разложением нефти и воздействием биочара в разных дозах соответствует бурой лесной почве ($R^2 = 0,9985$), наименее – бурой полупустынной ($R^2 = 0,9423$), а чернозем обыкновенный соответствует промежуточному значению ($R^2 = 0,9735$). Разница в разложении нефти в почвах связана с гранулометрическим составом, содержанием органического вещества и реакцией почвенной

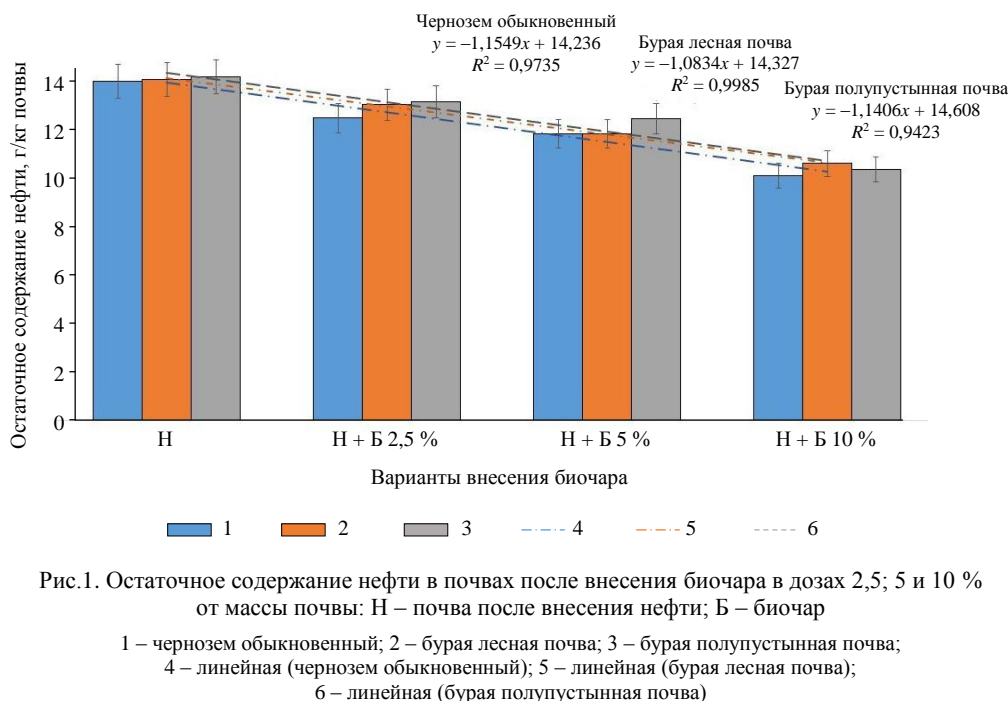


Рис.1. Остаточное содержание нефти в почвах после внесения биочара в дозах 2,5; 5 и 10 % от массы почвы: Н – почва после внесения нефти; Б – биочар

1 – чернозем обыкновенный; 2 – бурая лесная почва; 3 – бурая полупустынная почва;
 4 – линейная (чернозем обыкновенный); 5 – линейная (бурая лесная почва);
 6 – линейная (бурая полупустынная почва)



среды [32]. В тяжелосуглинистых почвах, как бурая лесная и чернозем обыкновенный, внесение биочара снижает содержание нефти в большей степени, чем в бурой полупустынной, имеющей супесчаный гранулометрический состав. Таким образом, ряд эффективности биочара для разложения нефти в почвах имеет вид: бурая лесная почва > чернозем обыкновенный > бурая полупустынная почва.

Биологические показатели исследуемых почв после внесения биочара представлены в табл.3. После внесения нефти в чернозем обыкновенный снижение биологических показателей относительно контроля составило от 34 % (активность каталазы) до 99 % (длина побегов и длина корней редиса). При ремедиации нефтезагрязненной бурой лесной почвы биологическая активность варьировалась от 12 % (активность дегидрогеназ) до 74 и 87 % (длина побегов и длина корней соответственно) относительно контроля. В бурой полупустынной почве нефть ингибировала биологическую активность в диапазоне от 11 % (активность дегидрогеназ) до 44 % (длина побегов). Разница в чувствительности биологических показателей обусловлена структурой почв: в тяжелосуглинистых почвах наблюдалось значительное снижение длины побегов и корней редиса, в то время как в легкосуглинистой почве снижение установлено по численности бактерий и длине побегов редиса.

При добавлении биочара 2,5; 5 и 10 % от массы чернозема обыкновенного было отмечено, что с ростом концентрации биочара биологическая активность повышается: активность каталазы – на 5-19 %; активность дегидрогеназ – на 0,5-9 %; общая численность бактерий – на 17-50 %; всхожесть – на 33-600 %; длина побегов – в 2-39 раз; длина корней – в 2-54 раза по сравнению с нефтезагрязненным фоном.

В бурой лесной почве биочар так же, как в черноземе, стимулировал биологические показатели с ростом концентрации: активность каталазы – на 8-20 %; активность дегидрогеназ – на 10-203 %; общая численность бактерий – на 84-133 %; всхожесть редиса – на 72-105 %; длина побегов – на 43-156 %; длина корней – на 73-274 % по сравнению с нефтезагрязненным фоном. В бурой полупустынной почве биочар стимулировал: активность каталазы – на 7-31 %; активность дегидрогеназ – на 3-8 %; общую численность бактерий – на 11-18 %; всхожесть – на 15-28 %; длину побегов – на 20-31 %; длину корней – на 5-18 % по сравнению с нефтезагрязненным фоном.

Таблица 3

Изменение биологических показателей после внесения биочара, абс. ед.

Варианты	Активность каталазы, мл О ₂ /1 г за 1 мин	Активность дегидрогеназ, мг ТФФ/10 г за 24 ч	Всхожесть редиса (<i>Raphanus sativus</i> L.), %	Длина побегов редиса (<i>Raphanus sativus</i> L.), мм	Длина корней редиса (<i>Raphanus sativus</i> L.), мм	Общая численность бактерий, млрд/1 г почвы
Чернозем обыкновенный						
Контроль	7,4	29,9	84	24,7	50,7	1,60
Н	4,9	18,6	6	0,2	0,3	0,60
Н + Б 2,5 %	5,1	18,7	8	0,5	0,9	0,70
Н + Б 5 %	5,6	20,1	12	1,5	1,4	0,75
Н + Б 10 %	5,8	20,3	42	8,2	16,6	0,90
Бурая лесная почва						
Контроль	6,4	9,8	90	27,1	44,2	1,20
Н	3,8	8,7	36	7,0	5,8	0,48
Н + Б 2,5 %	4,1	9,6	62	10,1	10,2	0,89
Н + Б 5 %	4,3	10,7	70	13,1	13,8	1,08
Н + Б 10 %	4,6	26,5	74	18,1	21,9	1,13
Бурая полупустынная почва						
Контроль	2,1	18,9	86	25,0	27,4	1,00
Н	1,3	16,9	66	14,0	24,2	0,62
Н + Б 2,5 %	1,4	17,4	76	16,8	25,4	0,69
Н + Б 5 %	1,52	17,8	78	18,3	26,9	0,70
Н + Б 10 %	1,77	18,3	85	18,4	28,5	0,73

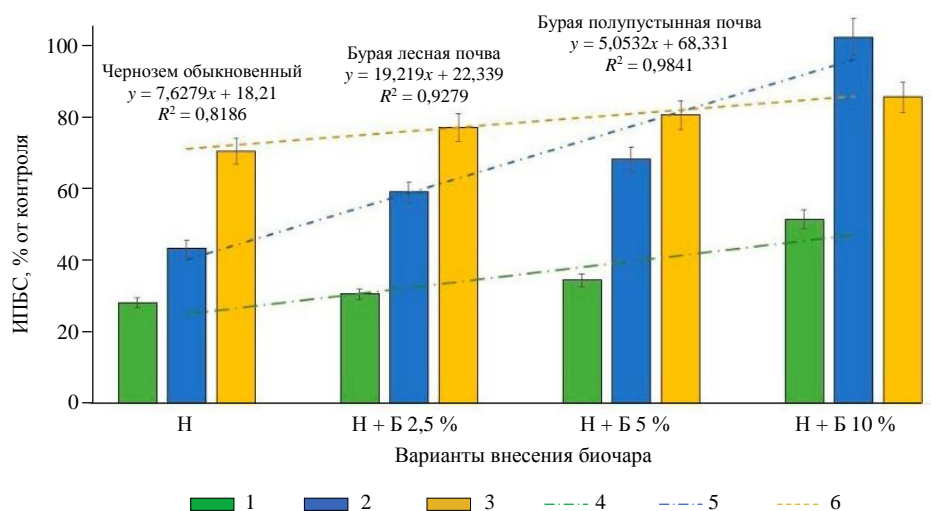


Рис.2. Изменение интегрального показателя биологического состояния почв после внесения биочара в разных дозах

1 – чернозем обыкновенный; 2 – бурья лесная почва; 3 – бурья полупустынная почва;
4 – линейная (чернозем обыкновенный); 5 – линейная (бурья лесная почва);
6 – линейная (бурья полупустынная почва)

При ремедиации чернозема обыкновенного и бурой лесной почвы установлено снижение фитотоксичности почвы за счет увеличения длины побегов и корней редиса в 15-399 и 27-543 раза по сравнению с нефтезагрязненным фоном. Такой эффект вероятно обусловлен пористой структурой биочара, позволяющей частично адсорбировать нефть и стимулировать ее разложение, а также улучшить структуру почвы, что важно для роста и развития корневой системы растений [17, 31]. Однако стимуляция фитотоксических показателей относительно нефтезагрязненных почв не позволила достичь уровня контроля, что является индикатором состояния почв с тяжелосуглинистым составом при нефтяном загрязнении. В бурой полупустынной почве значения контроля были достигнуты уже при дозе биочара 5 % по всхожести и длине корней редиса.

По данным табл.3 определялся интегральный показатель биологического состояния для каждого типа почв после внесения биочара (рис.2). Согласно расчетам, в почве без ремедиантов ИПБС чернозема обыкновенного, бурой лесной и бурой полупустынной почв составляет 70; 55 и 27 % относительно контроля. При внесении биочара 2,5; 5 и 10 % ИПБС чернозема обыкновенного изменился на 46-68 % относительно контроля. Значение ИПБС чернозема при добавлении биочара, близкое к значению контроля, не обнаружено. ИПБС бурой лесной почвы увеличивался при дозах биочара 2,5 и 5 % на 16 и 25 % относительно нефтезагрязненного фона (на 39 и 29 % ниже контроля соответственно). При дозе биочара 10 % ИПБС бурой лесной почвы достиг контроля. В бурой полупустынной почве значение ИПБС повышалось пропорционально росту дозы биочара 2,5; 5 и 10 % на 20; 16 и 11 % ниже контроля соответственно.

По уравнениям регрессии, представленным на рис.2, очевидно, что изменение ИПБС каждой почвы после ремедиации по-разному коррелировало с содержанием нефти: от наиболее тесной корреляции у бурой полупустынной ($R^2 = -0,98$) до наименее тесной среди трех почв у чернозема обыкновенного ($R^2 = -0,82$). По эффективности применения биочара, согласно значению ИПБС, был составлен ряд почв: бурья полупустынная почва > бурья лесная почва > чернозем обыкновенный.

Информативность каждого показателя и каждого типа почв оценивалась по силе корреляции между остаточным содержанием нефти и значением всех биологических показателей (табл.4).

Все биологические показатели при ремедиации чернозема обыкновенного являются наиболее информативными ($r > 0,90$), но самым информативным – общая численность бактерий ($r = -1,00$). При ремедиации бурой лесной почвы самый информативный показатель – активность каталазы ($r = -1,00$), а менее информативный – активность дегидрогеназ ($r = 0,04$). Для бурой полупустынной почвы самый информативный биологический показатель – общая численность бактерий ($r = -0,99$), а наименее информативный – длина корней редиса ($r = -0,51$).



Таблица 4

Коэффициент корреляции r между значением биологического показателя и остаточным содержанием нефти

Активность каталазы	Активность дегидрогеназ	Всхожесть редиса	Длина побегов редиса	Длина корней редиса	Общая численность бактерий
Чернозем обыкновенный					
-0,98**	-0,99**	-0,97**	-0,99**	-0,99**	-1,00**
Буряя лесная почва					
-1,00**	0,04	-0,80*	-0,95**	-0,98**	-0,64*
Буряя полупустынная почва					
-0,96**	-0,88**	-0,72*	-0,96**	-0,51	-0,99**

Примечания:

Достоверность отличия от контроля: * $p < 0,05$; ** $p < 0,001$.

■ Наиболее информативный показатель.

■ Наименее информативный показатель.

При ремедиации биочаром нефтезагрязненных чернозема обыкновенного и бурой полупустынной почвы наиболее информативным показателем является общая численность бактерий, а бурой лесной почвы – активность каталазы. Различия в информативности показателей для каждого типа почв обусловлены не только их структурой, но и содержанием органического вещества, реакцией почвенной среды [42]. Среди изученных образцов только в бурой лесной почве реакция почвенной среды кислая ($pH = 5,7$), а в бурой полупустынной почве ($pH = 6,7$) и черноземе обыкновенном ($pH = 7,3$) – щелочная (см. табл.1). Численность почвенных бактерий – информативный биологический индикатор процесса ремедиации нефтезагрязненных почв [43].

Чувствительность биологических показателей оценивали по отличию с контролем: чем значение выше контроля, тем более чувствительна почва к ремедиации (табл.5). Чем больше отличие от нефтезагрязненной почвы без ремедиантов, тем более чувствителен показатель. Таким образом, при ремедиации биочаром чернозема обыкновенного и бурой лесной почвы наиболее чувствительным биологическим показателем является длина корней, а наименее чувствительными – активность дегидрогеназ и каталазы.

Таблица 5

Относительные значения биологических показателей для каждого типа почв (усреднены по дозам биочара), % от нефтезагрязненной почвы без ремедиантов

Активность каталазы	Активность дегидрогеназ	Всхожесть редиса	Длина побегов редиса	Длина корней редиса	Общая численность бактерий
Чернозем обыкновенный					
113	106	344	1697	2104	131
Буряя лесная почва					
113	179	191	195	261	214
Буряя полупустынная почва					
117	106	121	127	111	114

Примечания:

■ Наиболее чувствительный показатель.

■ Наименее чувствительный показатель.

При ремедиации бурой полупустынной почвы самый чувствительный биологический показатель – длина побегов, а наименее чувствительный – активность дегидрогеназ. Буряя полупустынная почва Черноземельского района Республики Калмыкия при загрязнении мазутом и керосином 2,5 % от массы почвы стимулировала рост побегов и корней редиса [44]. Ранее также было установлено, что применение комплексной обработки биочаром и рамнолипидом имеет самую низкую экотоксичность для растений и водорослей при использовании для ремедиации нефтезагрязненных водно-болотных угодий [23].



Наиболее чувствительным показателем при ремедиации биочаром нефтезагрязненного чернозема обыкновенного (пашня, степная почва) и бурой лесной почвы (лесная почва) является длина корней редиса, а бурой полупустынной почвы (полупустыня) – длина побегов редиса.

Результаты исследования имеют важное значение, поскольку ежегодно тысячи гектаров почв при различном хозяйственном использовании подвергаются загрязнению нефтью и нефтепродуктами. При этом внесение биочара единой концентрации для всех типов почв экологически неэффективно. Использование биочара для очистки нефтезагрязненной почвы зависит от типа почвы, природного материала, из которого изготовлен биочар, и уровня загрязнения [45]. При ремедиации нефтезагрязненных почв с помощью биочара помимо концентрации нефти следует учитывать еще агроклиматические (температура воздуха, количество атмосферных осадков, скорость ветра), агрохимические (содержание N) и физико-химические параметры почв (гумус, pH, гранулометрический состав, БПК, ХПК, содержание легкорастворимых солей). Биочар, благодаря свойствам адсорбента, может применяться в любой климатической зоне, поскольку скорость адсорбции не зависит от температуры и влажности почв [46-48]. Биочар как биостимулятор более эффективен в почвах, образованных в климатических условиях с достаточным количеством солнечных дней и осадков, как в почвах степной и лесной зон.

Применение биочара неразрывно связано с типом почв (чернозем обыкновенный, бурая лесная, каштановая, бурая полупустынная, солончак и др.) и типом сельскохозяйственного использования (степь, лес и полупустыня). В степной зоне России (например, в Ростовской области и Краснодарском крае) преобладают пахотные и целинные почвы, представленные различными подтипами черноземов и каштановых почв, имеющие тяжелосуглинистый гранулометрический состав, высокое и среднее содержание гумуса и азота в почве, высокую буферность почв. Как следствие при нефтяном загрязнении таких почв применение биочара эффективно и результативность увеличивается в сочетании с микробными препаратами и гуминовыми веществами [49-53]. На процесс деградации нефтяных углеводородов в лесных почвах оказывает влияние соотношение между углеродом и азотом, способствующее развитию аборигенной микробиоты, в том числе бактерий-нефтедеструкторов [54-56]. Применение биочара для ремедиации лесов и лесостепей, как в Республике Адыгея, позволяет за счет внесенного углерода в почву простимулировать аборигенную микробиоту. Использование биочара в полупустынных почвах, например, в Республике Калмыкия и Астраханской обл., менее эффективно, поскольку непосредственно связано с легким гранулометрическим составом почв, практически отсутствием растительности в почвенном покрове, низким содержанием гумуса и азота. Поэтому наиболее чувствительным биологическим показателем при ремедиации бурой полупустынной почвы является не длина корней, как в степных и лесных почвах, а длина побегов редиса. Большая чувствительность длины побегов сопряжена с большей продолжительностью солнечных дней в регионе. Таким образом, применение биочара для ремедиации нефтяного загрязнения и восстановления экологического состояния почвы способствует снижению концентрации загрязнителя и имеет большое значение для устойчивого развития растений.

Информативность биологического показателя при загрязнении нефтью и нефтепродуктами важна прежде всего, поскольку учитывается связь между количеством разложившейся нефти и откликом биологического показателя [53, 57, 58]. Активность микроорганизмов (грибов и бактерий) является одним из наиболее информативных, но не самых чувствительных показателей [59]. Чувствительность биологического показателя определяется стимуляцией показателя относительно контроля. При нефтяном загрязнении о чувствительности судят по соотношению биологического показателя и нефтезагрязненного фона, а также контроля. Применение микробиологических препаратов, содержащих бактерии, грибы и водоросли, т.е. микробные консорциумы, наиболее эффективно [60]. При загрязнении нефтью дерново-подзолистой, светло-серой, дерново-карбонатной, темно-серой и пойменной почв методами фитотестирования (кресс-салат посевной (*Lepidium sativum* L.), пшеница мягкая (*Triticum aestivum* L.), ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.) и сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) – наибольшая устойчивость к нефтезагрязнению была установлена у пойменной почвы, а наибольшая уязвимость – у дерново-карбонатной и светло-серой почв [61]. В отдельных случаях, несмотря на проведение комплекса таких мероприятий, как сбор и вывоз разлитой нефти, применение специализированных экстрагирующих нефть установок, внесение азотных удобрений, рыхление и фиторемедиацию, содержание нефти в торфяно-глеязной почве снижается недостаточно и является опасным для окружающей экосистемы [62].



Применение биочара, инокулированного микроорганизмами *Bacillus* и *Paenibacillus*, также эффективно с предварительной инокуляцией БП в биоугле – стимуляция активности дегидрогеназ на 27 % от фонового значения. Наиболее информативны биологические показатели почвы при внесении биочара с *Bacillus* и *Paenibacillus*, внесение которых стимулирует активность каталазы, общую численность бактерий нефтезагрязненного чернозема, увеличивает длину корней ячменя, демонстрируя наибольшую чувствительность [63].

Заключение

Применение биочара для ремедиации нефтяного загрязнения почв различного хозяйственного использования имеет разную экологическую эффективность. Содержание нефти после применения биочара снижается во всех почвах, независимо от типа хозяйственного использования. Наиболее чувствительные биологические показатели при ремедиации биочаром пашни и лесной почвы – длина корней, для полупустыни – длина побегов. Наиболее информативными показателями при ремедиации биочаром нефтезагрязненных чернозема обыкновенного и бурой полупустынной почвы является общая численность бактерий, а бурой лесной почвы – активность каталазы. С точки зрения экологической эффективности, оцененной по интегральному показателю биологического состояния почв, применение биочара на пашне и в лесной почве (чернозем обыкновенный и бурая лесная почва) менее экологически эффективно, чем в полупустыне (бурая полупустынная почва). Полученные результаты могут быть применены при разработке мероприятий и организационно-технических решений для ремедиации нефтезагрязненных почв различного хозяйственного использования.

Авторы благодарят за помощь в проведении лабораторно-аналитических исследований аспиранта А.С.Русеву и магистранта С.Ю.Ревину.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильева Г.К., Стрижакова Е.Р., Бочарникова Е.А. и др. Нефть и нефтепродукты как загрязнители почв. Технология комбинированной физико-биологической очистки загрязненных почв // Российский химический журнал. 2013. Т. 57. № 1. С. 79-104.
2. Пиковский Ю.И., Смирнова М.А., Геннадиев А.Н. и др. Параметры нативного углеводородного состояния почв различных биоклиматических зон // Почвоведение. 2019. № 11. С. 1307-1321. DOI: 10.1134/S0032180X1911008X
3. Водяницкий Ю.Н., Шоба С.А. Биогеохимические барьеры для ремедиации почв и очистки почвенно-грунтовых вод // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2016. № 3. С. 3-15.
4. Быкова М.В., Пашкевич М.А. Оценка нефтезагрязненности почв производственных объектов различных почвенно-климатических зон Российской Федерации // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. 2020. № 1. С. 46-59. DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-46-59
5. Поляков Р.Ю., Хотников Е.Л., Мозговой Н.В., Бокадаров С.А. Современные средства и технологии для ликвидации последствий загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2013. № 1 (4). С. 343-345.
6. Shuguang Wang, Yan Xu, Zhaofeng Lin et al. The harm of petroleum-polluted soil and its remediation research // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1864. Iss. 1. № 020222. DOI: 10.1063/1.4993039
7. Бузмаков С.А., Санников П.Ю., Кучин Л.С. и др. Применение беспилотной аэрофотосъемки для диагностики техногенной трансформации природной среды при эксплуатации нефтяного месторождения // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 180-193. DOI: 10.31897/PMI.2023.22
8. Ahmad A.A., Muhammad I., Shah T. et al. Remediation Methods of Crude Oil Contaminated Soil // World Journal of Agriculture and Soil Science. 2020. Vol. 4. Iss. 4. № WJASS.MS.ID.000595. DOI: 10.33552/WJASS.2020.04.000595
9. Okoye P.C., Ikhajiagbe B., Obayuwana H.O., Ehiaimwian R.I. Plant-assisted remediation of oil-polluted soil by five commonly cultivated local edible shrubs // Nigerian Journal of Scientific Research. 2018. Vol. 17 (1). P. 55-63.
10. Telysheva G., Jashina L., Lebedeva G. et al. Use of Plants to Remediate Soil Polluted With Oil // Environment. Technology. Resources. Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference, 20-22 June 2011, Rēzekne, Latvia. Rēzekne, 2011. Vol. 1. P. 38-45. DOI: 10.17770/ETR2011VOL1.925
11. Высоцкая Л.Б., Архипова Т.Н., Кузина Е.В. и др. Сравнение реакции растений различных видов на нефтяное загрязнение // Биомика. 2019. Т. 11. № 1. С. 86-100. DOI: 10.31301/2221-6197.bmc.2019-06
12. Tang K.H.D., Angela J. Phytoremediation of crude oil-contaminated soil with local plant species // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 495. № 012054. DOI: 10.1088/1757-899X/495/1/012054
13. Пашаян А.А., Нестеров А.В., Щетинская О.С., Мельникова Е.А. Рекультивация загрязненных нефтью почв реагентным капсулированием с их последующей фиторемедиацией // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26. № 9. С. 20-25. DOI: 10.18412/1816-0395-2022-9-20-25
14. Слюсаревский А.В., Зиннатшина Л.В., Васильева Г.К. Сравнительный эколого-экономический анализ методов рекультивации нефтезагрязненных почв путем биорекультивации in situ и механической замены грунта // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 11. С. 40-45. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-11-40-45



15. Кузина Е.В., Рафикова Г.Ф., Столярова Е.А., Логинов О.Н. Эффективность ассоциаций растений семейства бобовых и ростстимулирующих бактерий для восстановления нефтезагрязненных почв // Агрохимия. 2021. № 4. С. 87-96. DOI: [10.31857/S0002188121040074](https://doi.org/10.31857/S0002188121040074)
16. Anae J., Ahmad N., Kumar V. et al. Recent advances in biochar engineering for soil contaminated with complex chemical mixtures: Remediation strategies and future perspectives // Science of the Total Environment. 2021. Vol. 767. № 144351. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.144351](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144351)
17. Zahed M.A., Salehi S., Madadi R., Hejabi F. Biochar as a sustainable product for remediation of petroleum contaminated soil // Current Research in Green and Sustainable Chemistry. 2021. Vol. 4. № 100055. DOI: [10.1016/j.crgsc.2021.100055](https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100055)
18. Yuanfei Lv, Jianfeng Bao, Dongyang Liu et al. Synergistic effects of rice husk biochar and aerobic composting for heavy oil-contaminated soil remediation and microbial community succession evaluation // Journal of Hazardous Materials. 2023. Vol. 448. № 130929. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2023.130929](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130929)
19. Chuan Yin, Huan Yan, Yuancheng Cao, Huanfang Gao. Enhanced bioremediation performance of diesel-contaminated soil by immobilized composite fungi on rice husk biochar // Environmental Research. 2023. Vol. 226. № 115663. DOI: [10.1016/j.envres.2023.115663](https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115663)
20. Yousaf U., Khan A.H.A., Farooqi A. et al. Interactive effect of biochar and compost with Poaceae and Fabaceae plants on remediation of total petroleum hydrocarbons in crude oil contaminated soil // Chemosphere. 2022. Vol. 286. Part 2. № 131782. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2021.131782](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131782)
21. Abbaspour A., Zohrabi F., Dorostkar V. et al. Remediation of an oil-contaminated soil by two native plants treated with biochar and mycorrhizae // Journal of Environmental Management. 2020. Vol. 254. № 109755. DOI: [10.1016/j.jenvman.2019.109755](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109755)
22. Hongyang Ren, Yuanpeng Deng, Liang Ma et al. Enhanced biodegradation of oil-contaminated soil oil in shale gas exploitation by biochar immobilization // Biodegradation. 2022. Vol. 33. Iss. 6. P. 621-639. DOI: [10.1007/s10532-022-09999-6](https://doi.org/10.1007/s10532-022-09999-6)
23. Zhuo Wei, Jim J. Wang, Yili Meng et al. Potential use of biochar and rhamnolipid biosurfactant for remediation of crude oil-contaminated coastal wetland soil: Ecotoxicity assessment // Chemosphere. 2020. Vol. 253. № 126617. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2020.126617](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126617)
24. Смирнова Е.В., Окунев Р.В., Гуниятуллин К.Г. Влияние углеродных сорбентов на потенциальную способность почв к самоочищению от нефтяного загрязнения // Георесурсы. 2022. Т. 24. № 3. С. 210-218. DOI: [10.18599/grs.2022.3.18](https://doi.org/10.18599/grs.2022.3.18)
25. Dike C.C., Shahsavari E., Surapaneni A. et al. Can biochar be an effective and reliable biostimulating agent for the remediation of hydrocarbon-contaminated soils? // Environment International. 2021. Vol. 154. № 106553. DOI: [10.1016/j.envint.2021.106553](https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106553)
26. Dike C.C., Hakeem I.G., Rani A. et al. The co-application of biochar with bioremediation for the removal of petroleum hydrocarbons from contaminated soil // Science of the Total Environment. 2022. Vol. 849. № 157753. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2022.157753](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157753)
27. Gorovtsov A.V., Minkina T.M., Mandzhieva S.S. et al. The mechanisms of biochar interactions with microorganisms in soil // Environmental Geochemistry and Health. 2020. Vol. 42. Iss. 8. P. 2495-2518. DOI: [10.1007/s10653-019-00412-5](https://doi.org/10.1007/s10653-019-00412-5)
28. Hongyang Lin, Yang Yang, Zhenxiao Shang et al. Study on the Enhanced Remediation of Petroleum-Contaminated Soil by Biochar/g-C₃N₄ Composites // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. Vol. 19. Iss. 14. № 8290. DOI: [10.3390/ijerph19148290](https://doi.org/10.3390/ijerph19148290)
29. Minnikova T., Ruseva A., Kolesnikov S. Assessment of Ecological State of Soils Contaminated by Petroleum Hydrocarbons after Bioremediation // Environmental Processes. 2022. Vol. 9. Iss. 3. № 49. DOI: [10.1007/s40710-022-00604-9](https://doi.org/10.1007/s40710-022-00604-9)
30. Haider F.U., Xiukang Wang, Zulfiqar U. et al. Biochar application for remediation of organic toxic pollutants in contaminated soils: An update // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2022. Vol. 248. № 114322. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2022.114322](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114322)
31. Murtaza G., Ahmed Z., Eldin S.M. et al. Biochar as a Green Sorbent for Remediation of Polluted Soils and Associated Toxicity Risks: A Critical Review // Separations. 2023. Vol. 10. Iss. 3. № 197. DOI: [10.3390/separations10030197](https://doi.org/10.3390/separations10030197)
32. Xin Sui, Xuemei Wang, Yuhuan Li, Hongbing Ji. Remediation of Petroleum-Contaminated Soils with Microbial and Microbial Combined Methods: Advances, Mechanisms, and Challenges // Sustainability. 2021. Vol. 13. Iss. 16. № 9267. DOI: [10.3390/su13169267](https://doi.org/10.3390/su13169267)
33. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Vienna: International Union of Soil Sciences, 2022. 236 p. URL: https://www.isric.org/sites/default/files/WRB_fourth_edition_2022-12-18.pdf
34. Дауд Р.М., Колесников С.И., Минникова Т.В. и др. Биодиагностика устойчивости аридных почв Юга России к загрязнению тяжелыми металлами, нефтяными углеводородами и биоцидами. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2021. 217 с.
35. Сангаджиева Л.Х., Даваева Ц.Д., Булуктаев А.А. Влияние нефтяного загрязнения на фитотоксичность светло-каштановых почв Калмыкии // Вестник Калмыцкого университета. 2013. № 1 (17). С. 44-47.
36. Вальков В.Ф., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Почвы Юга России. Ростов-на-Дону: Эверест, 2008. 276 с.
37. Байхамурова М.О., Юлдашбек Д.Х., Саинова Г.А., Анарбекова Г.Д. Изменение активности каталазы и уреазы при повышенных содержаниях тяжелых металлов (Pb, Zn, Cd) в сероземе // European Journal of Natural History. 2020. № 3. С. 70-73 (in English).
38. Malachowska-Jutysz A., Matyja K. Discussion on methods of soil dehydrogenase determination // International Journal of Environmental Science and Technology. 2019. Vol. 16. Iss. 12. P. 7777-7790. DOI: [10.1007/s13762-019-02375-7](https://doi.org/10.1007/s13762-019-02375-7)
39. Полянская Л.М., Пинчук И.П., Степанов А.Л. Сравнительный анализ методов люминесцентной микроскопии и каскадной фильтрации для оценки численности и биомассы бактерий в почве: роль разведения почвенной суспензии // Почвоведение. 2017. № 10. С. 1216-1219. DOI: [10.7868/S0032180X17100082](https://doi.org/10.7868/S0032180X17100082)
40. Quintela-Sabaris C., Marchand L., Kidd P.S. et al. Assessing phytotoxicity of trace element-contaminated soils phytomanaged with gentle remediation options at ten European field trials // Science of the Total Environment. 2017. Vol. 599-600. P. 1388-1398. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.04.187](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.187)
41. Kolesnikov S.I., Kazeev K.S., Akimenko Y.V. Development of regional standards for pollutants in the soil using biological parameters // Environmental Monitoring and Assessment. 2019. Vol. 191. Iss. 9. № 544. DOI: [10.1007/s10661-019-7718-3](https://doi.org/10.1007/s10661-019-7718-3)
42. Tunç E., Şahin E.Z., Demir M. et al. Investigation of Factors Affecting Catalase Enzyme Activity In Different Agricultural Soils // 1st International Congress on Sustainable Agriculture and Technology, 1-3 April 2019, Gaziantep, Turkey. Gaziantep University, 2019. P. 103-116.
43. Бакаева М.Д., Кузина Е.В., Рафикова Г.Ф. и др. Применение продуцирующих ауксины бактерий при фиторемедиации загрязненной нефтью почвы // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 1. С. 144-150. DOI: [10.25750/1995-4301-2020-1-144-150](https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-1-144-150)



44. Булуктаев А.А. Фитотоксичность нефтезагрязненных почв аридных территорий (в условиях модельного эксперимента) // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2019. Т. 4 (3). 10 с. DOI: [10.21685/2500-0578-2019-3-5](https://doi.org/10.21685/2500-0578-2019-3-5)
45. Xue Yang, Shiqiu Zhang, Meiting Ju, Le Liu. Preparation and Modification of Biochar Materials and their Application in Soil Remediation // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. Iss. 7. № 1365. DOI: [10.3390/app9071365](https://doi.org/10.3390/app9071365)
46. Masiello C.A., Dugan B., Brewer C.E. et al. Biochar effects on soil hydrology // Biochar for Environmental Management. Science, Technology and Implementation. Routledge. 2015. P. 543-562. DOI: [10.4324/9780203762264](https://doi.org/10.4324/9780203762264)
47. Kinney T.J., Masiello C.A., Dugan B. et al. Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures // Biomass and Bioenergy. 2012. Vol. 41. P. 34-43. DOI: [10.1016/j.biombioe.2012.01.033](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.01.033)
48. Van Gestel M., Ladd J.N., Amato M. Microbial biomass responses to seasonal change and imposed drying regimes at increasing depths of undisturbed topsoil profiles // Soil Biology and Biochemistry. 1992. Vol. 24. Iss. 2. P. 103-111. DOI: [10.1016/0038-0717\(92\)90265-Y](https://doi.org/10.1016/0038-0717(92)90265-Y)
49. Муратова А.Ю., Панченко Л.В., Дубровская Е.В. и др. Биоремедиационный потенциал иммобилизованных на биочаре бактерий *Azospirillum brasilense* // Микробиология. 2022. Т. 91. № 5. С. 554-564. DOI: [10.31857/S0026365622100263](https://doi.org/10.31857/S0026365622100263)
50. Минникова Т.В., Колесников С.И., Минин Н.С. Оценка активности дегидрогеназ и инвертазы нефтезагрязненного чернозема при внесении биочара и бактериального препарата // Биосфера. 2024. Т. 16. № 1. С. 36-44. DOI: [10.24855/biosfera.v16i1.891](https://doi.org/10.24855/biosfera.v16i1.891)
51. Minnikova T., Kolesnikov S., Minkina T., Mandzhieva S. Assessment of Ecological Condition of Haplic Chernozem Calcic Contaminated with Petroleum Hydrocarbons during Application of Bioremediation Agents of Various Natures // Land. 2021. Vol. 10. Iss. 2. № 169. DOI: [10.3390/land10020169](https://doi.org/10.3390/land10020169)
52. Minnikova T., Kolesnikov S., Minin N. et al. The Influence of Remediation with *Bacillus* and *Paenibacillus* Strains and Biochar on the Biological Activity of Petroleum-Hydrocarbon-Contaminated Haplic Chernozem // Agriculture. 2023. Vol. 13. Iss. 3. № 719. DOI: [10.3390/agriculture13030719](https://doi.org/10.3390/agriculture13030719)
53. Ruseva A., Minnikova T., Kolesnikov S. et al. Assessment of the ecological state of haplic chernozem contaminated by oil, fuel oil and gasoline after remediation // Petroleum Research. 2024. Vol. 9. Iss. 1. P. 155-164. DOI: [10.1016/j.ptlrs.2023.03.002](https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2023.03.002)
54. Кудеяров В.Н. Агрогеохимические циклы углерода и азота в современном земледелии России // Агрохимия. 2019. № 12. С. 3-15. DOI: [10.1134/S000218811912007X](https://doi.org/10.1134/S000218811912007X)
55. Улигова Т.С., Цепкова Н.Л., Рапопорт И.Б. и др. Лесные биогеоценозы в ареале бурых лесных почв Западного Кавказа // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2023. № 1. С. 80-92. DOI: [10.31857/S1026347023010134](https://doi.org/10.31857/S1026347023010134)
56. Рыжова И.М., Подвезенная М.А., Кириллова Н.П. Вариабельность запасов углерода в автоморфных и полугидроморфных почвах лесных экосистем европейской территории России на основе баз данных: сравнительный статистический анализ // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2022. № 2. С. 20-27.
57. Лукошкова А.А., Попова Л.Ф. Микробиологическая активность почв, загрязненных нефтепродуктами // Научные междисциплинарные исследования. Сборник статей VI Международной научно-практической конференции, 25 октября 2020, Саратов, Россия. Саратов: Научно-образовательная организация «Цифровая наука», 2020. С. 11-15. DOI: [10.24412/cl-36007-2020-6-11-15](https://doi.org/10.24412/cl-36007-2020-6-11-15)
58. Морачевская Е.В., Воронина Л.П. Биотестирование как способ интегральной оценки приемов рекультивации загрязненных нефтью экосистем // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 34-43 (in English). DOI: [10.25750/1995-4301-2022-1-034-043](https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-1-034-043)
59. Усачева Ю.Н. Методы биоиндикации в оценке состояния нефтезагрязненных почв при рекультивационных работах // Экология и промышленность России. 2012. № 11. С. 40-43. DOI: [10.18412/1816-0395-2012-11-40-43](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2012-11-40-43)
60. Созина И.Д., Данилов А.С. Микробиологическая ремедиация нефтезагрязненных почв // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 297-312. DOI: [10.31897/PMI.2023.8](https://doi.org/10.31897/PMI.2023.8)
61. Бузмаков С.А., Андреев Д.Н., Назаров А.В. и др. Реакция разных тест-объектов на экспериментальное загрязнение почв нефтью // Экология. 2021. № 4. С. 254-262. DOI: [10.31857/S0367059721040053](https://doi.org/10.31857/S0367059721040053)
62. Маслов М.Н., Маслова О.А., Ежелев З.С. Микробиологическая трансформация органического вещества в нефтезагрязненных тундровых почвах после рекультивации // Почвоведение. 2019. № 1. С. 70-78. DOI: [10.1134/S0032180X19010106](https://doi.org/10.1134/S0032180X19010106)
63. Minnikova T., Kolesnikov S., Revina S. et al. Enzymatic Assessment of the State of Oil-Contaminated Soils in the South of Russia after Bioremediation // Toxics. 2023. Vol. 11. Iss. 4. № 355. DOI: [10.3390/toxics11040355](https://doi.org/10.3390/toxics11040355)

Авторы: Т.В.Минникова, канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник, loko261008@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9453-7137> (Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия), С.И.Колесников, д-р с.-х. наук, заведующий кафедрой, <https://orcid.org/0000-0001-5860-8420> (Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.