

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



РУСЕВА АННА СТЕПАНОВНА

**ВЛИЯНИЕ РЕМЕДИАНТОВ НА ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ
ЗАГРЯЗНЕННЫХ НЕФТЬЮ И НЕФТЕПРОДУКТАМИ ЗОНАЛЬНЫХ
ПОЧВ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ**

1.5.15. Экология (биологические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Ростов-на-Дону – 2024

Работа выполнена на кафедре экологии и природопользования
Академии биологии и биотехнологии имени Д.И. Ивановского
Южного федерального университета

Научный руководитель: **Колесников Сергей Ильич**,
доктор сельскохозяйственных наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»,
кафедра экологии и природопользования, заведующий

Официальные оппоненты: **Степанов Алексей Львович**,
доктор биологических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова», факультет почвоведения, кафедра
биологии почв, заведующий

Булуктаев Алексей Александрович,
кандидат биологических наук,
ФГБУН «Калмыцкий научный центр Российской
академии наук», лаборатория генетических
исследований, и.о. заведующего лабораторией,
старший научный сотрудник

Защита диссертации состоится **14 июня 2024 года в 15:00** на заседании диссертационного совета ЮФУ801.01.01 по биологическим наукам на базе Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского Южного федерального университета по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки 194/1, к. 712.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. Ю.А. Жданова Южного федерального университета по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Р. Зорге, 21Ж и на сайте Южного федерального университета <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1326703/>

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Отзыв на автореферат в 2-х экз. (с указанием даты, полностью ФИО, учёной степени со специальностью, звания, организации, подразделения, должности, адреса, телефона, e-mail), заверенный печатью организации, просим направлять по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1, к. 804, ученому секретарю диссертационного совета ЮФУ801.01.01 Тимошенко А.Н., а также в формате pdf на e-mail: atimoshenko@sfedu.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Тимошенко Алёна Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Интенсивное развитие процесса глобализации экономики и торговли в течение последних нескольких десятилетий способствовало увеличению потребления нефти и нефтепродуктов (Zhu et al., 2016; Li et al., 2020; Bao et al., 2022; Lv et al., 2023). Нефть и ее производные попадают в окружающую среду различными способами, включая утечки из устьев скважин, трубопроводов и подземных резервуаров для хранения, а также в результате неправильной утилизации нефтяных отходов и при буровых работах (Polyak et al., 2018).

Загрязнение нефтью и нефтепродуктами в наибольшей степени отражается на почвах. Большая часть Европейской части России пронизана сетью нефте- и нефтепродуктопроводов, которые представляют опасность возникновения аварийных разливов. Углеводороды нефти изменяют структуру и функции почвы, нарушают ее биологические свойства. Для естественного восстановления почв требуется длительный период времени, поэтому целесообразным является поиск эффективных методов их ремедиации (Ren et al., 2020).

Наиболее часто используемыми методами восстановления загрязненных нефтью и нефтепродуктами почв являются биологические (биоремедиация). По сравнению с физическими и химическими методами ремедиации, биологические имеют ряд преимуществ, включая мягкое воздействие на окружающую среду и отсутствие ее вторичного загрязнения, возможность практически полной минерализации загрязнителя, а также относительно невысокую стоимость выполнения работ по восстановлению экологического состояния почв (Янкевич и др., 2015; Zhang et al., 2020).

Цель работы – изучение влияния ремедиантов на экологическое состояние загрязненных нефтью и нефтепродуктами зональных почв Европейской части России.

Задачи исследования:

1. Исследовать экологическое состояние чернозема обыкновенного, бурой лесной и бурой полупустынной почв при внесении ремедиантов (биочара, нитроаммофоски, «Гумат натрия», «Байкал ЭМ-1») и разных загрязняющих веществ (нефти, мазута, бензина и дизельного топлива).
2. Определить наиболее чувствительные показатели биологического состояния почв при загрязнении нефтью и нефтепродуктами для оценки эффективности ремедиации.
3. Провести сравнительную оценку эффективности применения ремедиантов для стимуляции биологических показателей и снижения содержания углеводородов нефти в разных зональных почвах Европейской части России: черноземе обыкновенном, черноземе оподзоленном, бурой полупустынной, бурой лесной, дерново-подзолистой и темно-серой лесной почвах.

Основные защищаемые положения:

1. Исследованные ремедианты (биочар, «Байкал ЭМ-1», «Гумат натрия», нитроаммофоска) в большинстве случаев улучшают экологическое состояние почв, загрязненных нефтяными углеводородами (нефтью, мазутом, бензином, дизельным

топливом): биологические показатели почв увеличиваются, а остаточное содержание нефти в почве снижается.

2. Для оценки эффективности ремедиации почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами, рекомендуются следующие биологические показатели: длина корней и побегов редиса, всхожесть семян редиса, активность каталазы, дегидрогеназ, фосфатазы, ферриредуктаз, пероксидаз, уреазы, инвертазы, общая численность бактерий, численность амилалитических, аммонифицирующих бактерий и актиномицетов.

3. Эффективность применения ремедиантов при загрязнении нефтяными углеводородами в значительной степени зависит от типа почвы. Среди зональных почв Европейской части России при использовании биочара наибольшая стимуляция биологических показателей наблюдается в дерново-подзолистой почве, а наименьшая – в бурой полупустынной почве.

Научная новизна и теоретическая значимость. Впервые проведена оценка влияния ремедиантов разного механизма действия (разложение или связывание нефти и нефтепродуктов) и различной природы («Гумат натрия» – органо-минеральное удобрение, нитроаммофоска – минеральное удобрение, биочар – сорбент, «Байкал ЭМ-1» – микробиологическое удобрение) на экологическое состояние чернозема обыкновенного, чернозема оподзоленного, бурой лесной, бурой полупустынной, дерново-подзолистой и темно-серой лесной почв. Определены наиболее эффективные ремедианты и их дозы для стимуляции биологической активности при загрязнении почв нефтью, мазутом, бензином, дизельным топливом в разных концентрациях и в разных почвах. Исследована динамика восстановления экологического состояния загрязненных почв после ремедиации. Выявлены наиболее чувствительные биологические показатели почв для оценки эффективности ремедиантов.

Практическая значимость. Результаты могут быть использованы при выборе ремедианта для восстановления почв в зависимости от загрязняющего нефтяного углеводорода (нефть, мазут, бензин и дизельное топливо), степени загрязнения и от типа почвы, что позволит повысить эффективность ремедиации нефтезагрязненных почв, улучшить их экологическое состояние и восстановить плодородие. Полученные результаты используются в образовательной и научно-исследовательской деятельности в Южном федеральном университете.

Личный вклад автора. В диссертации представлены результаты исследований, проведенных в 2020–2024 гг. Название, цель, задачи, объекты и методы исследования определены автором совместно с научным руководителем. Лабораторные модельные эксперименты, а также аналитические исследования были проведены автором лично. Анализ и описание результатов исследования, написание выводов и защищаемых положений выполнено автором лично при участии научного руководителя.

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность данных обеспечена большим объемом экспериментальных исследований, применением современных и классических методов в экологии и биологии почв, использованием методов статистической обработки полученных результатов. Проведено сравнение результатов исследования с результатами по данной тематике, полученными ранее.

Апробация работы. Результаты исследования были представлены на международных и всероссийских конференциях и форумах: «Устойчивое развитие территорий: теория и практика» (Сибай, 2021), «Биологическое разнообразие и биоресурсы степной зоны в условиях изменяющегося климата» (Ростов-на-Дону, 2022), «Эволюция и деградация почвенного покрова» (Ставрополь, 2022), «Степная Евразия – устойчивое развитие» (Ростов-на-Дону, 2022), «Развитие водных транспортных магистралей в условиях глобального изменения климата на территории Российской Федерации (Евразии)» (Ростов-на-Дону, 2022), «Биодиагностика и экологическая оценка окружающей среды: современные технологии, проблемы и решения» (Москва, 2023), «Наука Юга России: достижения и перспективы» (Ростов-на-Дону, 2023), «Актуальные проблемы экологии и природопользования» (Ростов-на-Дону, 2020, 2021, 2022, 2023), «Неделя науки. Секция экологии и природопользования» (Ростов-на-Дону, 2020, 2021, 2022, 2023), «Ломоносов» (Москва, 2020, 2021, 2022, 2023).

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.5.15. Экология в пункте 10 – «Антропогенное воздействие на популяции, сообщества и экосистемы. Биологические эффекты загрязнения среды токсичными веществами (экотоксикология). Разработка биологических методов и критериев оценки состояния среды, биоиндикация, биотестирование, биомониторинг. Разработка экологически обоснованных норм воздействия хозяйственной деятельности человека на живую природу».

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликованы 43 научные работы, из которых 7 публикаций в изданиях, индексируемых базами данных международных индексов научного цитирования Scopus и Web of Science, 4 статьи в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ЮФУ и ВАК, а также глава в монографии.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов и списка литературы. Работа представлена на 147 страницах, содержит 57 рисунков и 42 таблицы. Список литературы включает 201 источник, в том числе 117 на иностранных языках.

Конкурсная поддержка работы. Исследование выполнено при финансовой поддержке Программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета «Приоритет 2030» (СП-12-22-10, СП-12-23-01) и грантов Президента Российской Федерации (НШ-2511.2020.11, НШ-449.2022.5, МК-175.2022.5).

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность и признательность своему научному руководителю, заведующему кафедрой экологии и природопользования ЮФУ, д.с.-х.н., профессору С.И. Колесникову за оказанную помощь и поддержку при написании диссертации, д.г.н., профессору К.Ш. Казееву за ценные советы по написанию работы, к.б.н., в.н.с. Т.В. Минниковой за консультации и помощь при выполнении исследования и всем сотрудникам кафедры экологии и природопользования ЮФУ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В главе представлен литературный обзор по теме загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами. Рассмотрены источники и масштабы загрязнения и изменения почвенных свойств при воздействии нефти и ее производных. Описаны современные методы восстановления загрязненных почв, в частности, биоремедиация.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе исследовали влияние ремедиантов и их доз на экологическое состояние чернозема обыкновенного, бурой лесной, бурой полупустынной почвы, чернозема оподзоленного, дерново-подзолистой и темно-серой лесной почв при загрязнении нефтью, бензином, мазутом и дизельным топливом. В качестве ремедиантов использовали вещества различной природы: биочар, нитроаммофоску, «Гумат натрия» и «Байкал ЭМ-1». Каждый из них вносили в трех дозах: в дозе, рекомендуемой производителем либо по литературным данным (1 Д), а также в 2 раза меньшей (0,5 Д) и в 2 раза большей, чем рекомендуемая (2 Д). В качестве рекомендуемой дозы вносили: 10% биочара, 0,4% нитроаммофоски, 0,01% «Гумат натрия» и 0,2% «Байкал ЭМ-1» (в пересчете на сухую массу или массу действующего вещества относительно массы почвы). Нормы внесения каждого ремедианта отображены в таблице 1.

Таблица 1

Вносимые нормы ремедиантов

Ремедиант	Доза	Количество вещества на 200 г почвы
Биочар	0,5 Д	10 г
	1 Д	20 г
	2 Д	40 г
Нитроаммофоска	0,5 Д	0,375 г
	1 Д	0,750 г
	2 Д	1,50 г
«Гумат натрия»	0,5 Д	0,5%-й раствор (80 мл)
	1 Д	1%-й раствор (80 мл)
	2 Д	2%-й раствор (80 мл)
«Байкал ЭМ-1»	0,5 Д	0,25%-й раствор (80 мл)
	1 Д	0,5%-й раствор (80 мл)
	2 Д	1%-й раствор (80 мл)

Нитроаммофоска является минеральным удобрением, которое содержит азот, калий и фосфор в равных долях. В нашем исследовании соединение вносили из расчета соблюдения соотношения C:N как 5:1. «Гумат натрия» представляет собой органо-минеральное удобрение, в состав которого входит гумат натрия, железо, медь, марганец, магний, молибден, цинк и сера. В данном исследовании «Гумат натрия» был внесен для стимуляции аборигенных почвенных микроорганизмов-деструкторов нефти и ее производных. Биочар – богатое углеродом твердое вещество, сорбент, уголь растительного происхождения, который производят путем термической трансформации органических веществ в среде с ограниченным доступом кислорода

(Joseph et al., 2021). В нашем исследовании использовали биочар марки А (ГОСТ 7657–84), произведенный из древесины березы *Betula alba* с содержанием углерода не менее 85%. «Байкал ЭМ-1» представляет собой микробиологическое удобрение, включающее комплекс микроорганизмов. В его состав входят: молочнокислые, фотосинтезирующие, азотфиксирующие бактерии, актиномицеты, сахаромицеты и культуральная жидкость.

С почвами была заложена серия модельных экспериментов на 30 суток (с черноземом обыкновенным также на 90 и 180 суток).

Эксперимент № 1. Данный модельный эксперимент проводили с целью оценки влияния ремедиантов на чернозем обыкновенный, загрязненный разными нефтяными углеводородами (нефтью, мазутом, бензином). Все загрязнители были внесены в концентрации 5% от массы почвы, ремедианты вносили в трех изучаемых дозах.

Эксперимент № 2. В данном эксперименте проводили оценку влияния ремедиантов различной природы на экологическое состояние загрязненного нефтью чернозема обыкновенного в динамике – через 30, 90 и 180 суток после начала эксперимента. Концентрация вносимой нефти составляла 5% от массы почвы, ремедианты были внесены также в трех дозах.

Эксперимент № 3. Эксперимент был заложен с целью оценки эффективности ремедиантов в черноземе обыкновенном при разном уровне его загрязнения нефтью. Загрязнитель вносили в 9 разных концентрациях: 0,1; 0,25; 0,5; 1; 2,5; 5; 10; 25 и 50% от массы почвы. Все ремедианты вносили только в одной в средней рекомендуемой дозе.

Эксперимент № 4. В данном эксперименте изучали влияние биочара на экологическое состояние чернозема обыкновенного, загрязненного разными концентрациями дизельного топлива. Дизельное топливо также вносили в 9 разных концентрациях: 0,1; 0,25; 0,5; 1; 2,5; 5; 10; 25 и 50% от массы почвы. Биочар вносили в рекомендуемой дозе.

Эксперимент № 5. В эксперименте изучали влияние всех исследуемых ремедиантов в трех разных дозах на экологическое состояние загрязненных нефтью (5% от массы почвы) бурой лесной и бурой полупустынной почв.

Эксперимент № 6. В данном модельном эксперименте исследовали влияние биочара на состояние загрязненных нефтью чернозема оподзоленного, дерново-подзолистой и темно-серой лесной почв. Нефть вносили в концентрации 5% от массы почвы, сорбент применяли в рекомендуемой дозе.

Оценку экологического состояния почв проводили на основании таких показателей, как: остаточное содержание нефтяных углеводородов, реакция среды (рН), содержание легкорастворимых солей, окислительно-восстановительный потенциал почвы, гидрофобность, токсичность (на основании показателей интенсивности начального роста и всхожести семян редиса), активность почвенных ферментов (каталазы, дегидрогеназы – для всех сроков и почв; пероксидазы, ферриредуктазы, инвертазы, уреазы, фосфатазы – для чернозема обыкновенного через

90 суток эксперимента), численность бактерий (общая – для всех сроков и почв; численность аммонифицирующих, амилалитических бактерий и актиномицетов – для чернозема обыкновенного через 90 суток эксперимента) (табл. 2).

Таблица 2

Методы, используемые в исследовании свойств почв

№	Показатель	Метод	Единицы измерения
<i>физические и химические</i>			
1.	Остаточное содержание углеводов нефти	Метод инфракрасной спектроскопии	г/кг
2.	Реакция среды (рН)	Потенциометрический метод	-
3.	Содержание легкорастворимых солей	Кондуктометрический метод	ppm
4.	Окислительно-восстановительный потенциал	Потенциометрический метод	мВ
5.	Содержание гумуса	Метод И.В. Тюрина в модификации Б.А. Никитина	%
6.	Гидрофобность	Тест на время проникновения водной капли (WDPT)	сек
<i>биологические</i>			
7.	Активность каталазы	Газометрический метод А. Ш. Галстяна (1978)	мл O ₂ в 1 мин/1 г
8.	Активность дегидрогеназ	Метод А. Ш. Галстяна (1978)	мг
9.	Активность пероксидаз	Метод Л.А. Корягиной и Н.А. Михайловой (1986)	мг 1,4-п-бензохинона/1 г/ 30 мин
10.	Активность ферриредуктаз	Метод А.Ш. Галстяна и Н.А. Оганесяна (1973)	мг Fe ₂ O ₃ /100 г/48 ч
11.	Активность инвертазы	Колориметрический метод определения с реактивом Феллинга (Даденко, 2021)	мг глюкозы/1г/24 часа
12.	Активность уреазы	Модифицированный метод Галстяна (1978) с использованием реактива Несслера (Даденко, 2021)	мг NH ₃ /10 г/24 часа
13.	Активность фосфатазы	Метод А.Ш. Галстяна и Э.А. Арутюняна (1966)	мг P ₂ O ₅ /100 г /1 ч
14.	Общая численность бактерий	Метод люминесцентной микроскопии в падающем свете по Д.Г. Звягинцеву и П.А. Кожевину (1974)	млрд/г
15.	Численность аммонифицирующих бактерий (МПА)	Метод посева на плотные питательные среды	тыс. КОЕ/г

Окончание таблицы 2

16.	Численность амилаолитических (КАА)	Метод посева на плотные питательные среды	тыс. КОЕ/г
17.	Численность актиномицетов (Чапек)	Метод посева на плотные питательные среды	тыс. КОЕ/г
18.	Длина корней редиса	Морфометрический метод (М. А. Бабьева, Н.К. Зенова, 1989)	мм
19.	Длина побегов редиса	Морфометрический метод (М. А. Бабьева, Н.К. Зенова, 1989)	мм
20.	Всхожесть семян редиса	Морфометрический метод (М. А. Бабьева, Н.К. Зенова, 1989)	% (от общего количества семян)

Кроме того, на основании изученных биологических показателей почв – длины корней и побегов, всхожести, активности каталазы, дегидрогеназ и общей численности бактерий был рассчитан интегральный показатель биологического состояния (ИПБС) почв для всех изучаемых сроков (Вальков и др., 1999; Колесников и др., 2000, 2001, 2013). Оценка достоверности полученных результатов была проведена с применением методов математической статистики.

Таблица 3

Характеристика изучаемых почв Европейской части России

№	Почва	Название по World Reference Base for Soil Resources (WRB, 2014)	Экосистема	Место отбора	Координаты	pH	Содержание гумуса, %	Гранулометрический состав	Численность бактерий, млрд/г	Активность каталазы, мл O ₂ /г/мин	Активность дегидрогеназ, мг ТФФ/г/24 ч
1.	Чернозем обыкновенный	Haplic Chernozems Calcic	Пашня	Ростов-на-Дону, Ботанический сад Южного федерального университета	47°14'17.54"C 39°38'33.22"B	7,6	3,6	Тяжелосуглинистый	2,1	8,6	30,0
2.	Бурая лесная слабонасыщенная	Haplic Cambisols Eutric	Буково-грабовый лес	Республика Адыгея, Майкопский район, п. Никель	44°10'39.76"C 40° 9'27.47"B	5,3	4,8	Тяжелосуглинистый	2,2	6,4	28,0
3.	Бурая полупустынная супесчаная	Endosalic Calcisols Yermic	Пастбище	Республика Калмыкия, Наримановский район, п. Дрофиный	46°17'48.65"C 46°41'40.06"B	6,7	2,0	Легкосуглинистый	1,0	2,1	18,9
4.	Чернозем оподзоленный	Luvic Phaeozems Albic	Пашня	Тульская область, Венёвский район, д. Ульяновка	54°23'54.78"C 38°08'60" В	6,5	4,7	Тяжелосуглинистый	2,3	2,0	36,9
5.	Темно-серая лесная	Greyic Phaeozems Albic	Пашня	Московская область, городской округ Кашира, д. Злобино	54°44'1.19"C 38° 5'41.17"B	5,7	4,4	Тяжелосуглинистый	1,5	3,7	28,6
6.	Дерново-подзолистая	Gleyic Albeluvisols	Смешанный лес	Московская область, городской округ Домодедово, поселок санатория «Подмосковье»	55°21'42.48"C 37°46'32.05"B	4,9	7,1	Тяжелосуглинистый	1,7	3,5	17,9

ГЛАВА 3. ДИНАМИКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕРНОЗЕМА ОБЫКНОВЕННОГО ПРИ РАЗЛИЧНОМ УРОВНЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ НЕФТЬЮ И НЕФТЕПРОДУКТАМИ И ВНЕСЕНИИ РЕМЕДИАНТОВ

В главе представлены результаты исследования экологического состояния чернозема обыкновенного при внесении ремедиантов различной природы и при загрязнении нефтью, мазутом, бензином, дизельным топливом после модельных экспериментов.

3.1. Влияние ремедиантов на экологическое состояние чернозема обыкновенного при загрязнении нефтью, мазутом, бензином

Согласно интегральному показателю биологического состояния чернозема обыкновенного (ИПБС), по степени снижения токсичности нефтепродукты располагаются в следующем порядке: *нефть* > *бензин* > *мазут* (рис. 1).

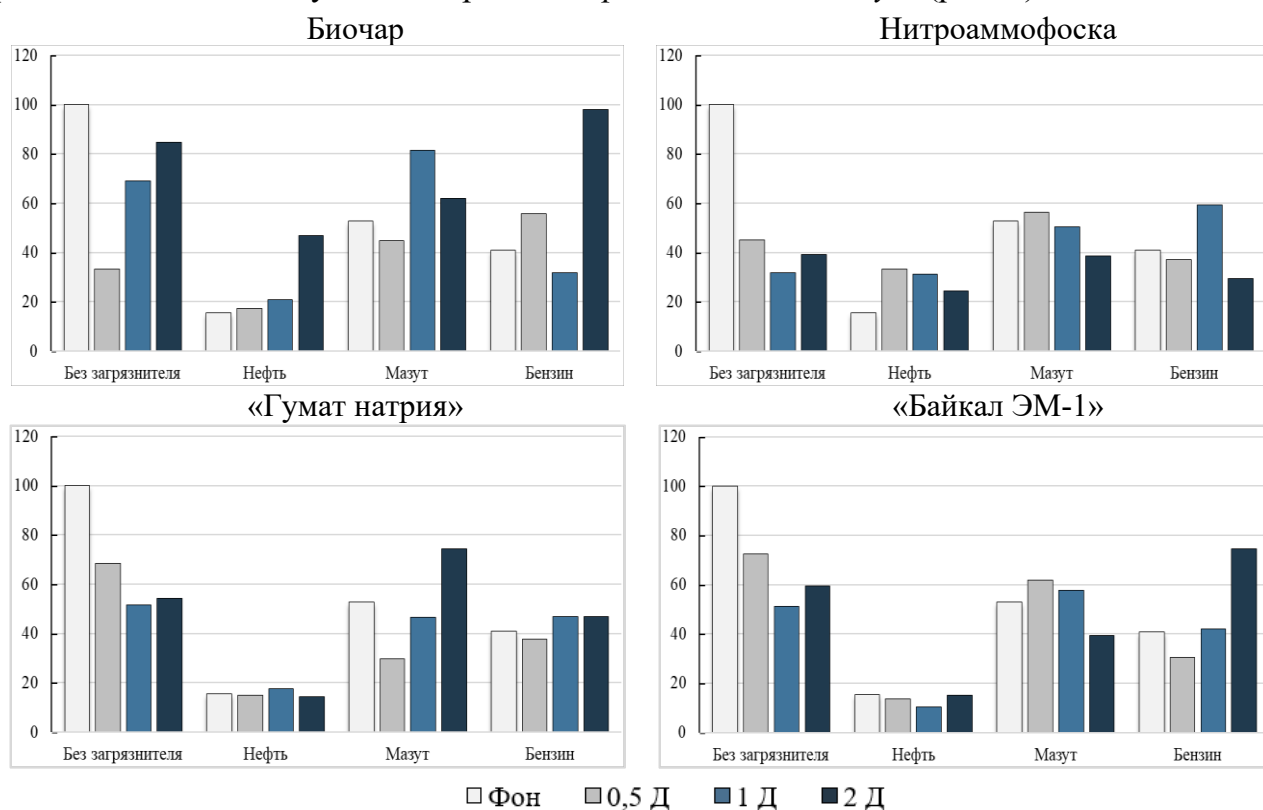


Рисунок 1 – ИПБС чернозема обыкновенного при загрязнении нефтью, мазутом, бензином и внесении ремедиантов, % от контроля

По степени стимуляции биологических показателей для нефти ремедианты образуют ряд (от наиболее эффективного к наименее эффективному):

биочар > *нитроаммофоска* > *«Гумат натрия»* > *«Байкал ЭМ-1»*.

Также по усредненным в дозах значениям для биочара, нитроаммофоски, «Гумат натрия» и «Байкал ЭМ-1» была проведена оценка чувствительности биологических показателей при ремедиации чернозема обыкновенного. Оценка проводили на основании степени изменения показателя относительно контроля. При внесении нитроаммофоски и «Байкал ЭМ-1» в загрязненный нефтью, мазутом либо бензином чернозем наиболее чувствительна длина корней редиса. При ремедиации чернозема

биочаром и «Гумат натрия» в случае нефти и бензина как загрязнителей самой чувствительной оказалась длина корней редиса, а в случае мазута – численность почвенных бактерий. При этом наименее чувствительным показателем при использовании биочара была активность каталазы, при использовании нитроаммофоски, «Гумата натрия» и «Байкал ЭМ-1» – активность дегидрогеназ на всех изучаемых нефтяных углеводородах.

На 30-е сутки от начала эксперимента в среднем для всех нефтепродуктов были определены наиболее эффективные, способствующие повышению значений биологических показателей почв, дозы ремедиантов. Для нитроаммофоски такой дозой была рекомендуемая (1 Д), для биочара, «Гумата натрия» и «Байкал ЭМ-1» – двойная (2 Д).

3.2. Влияние ремедиантов на экологическое состояние нефтезагрязненного чернозема обыкновенного через 30, 90 и 180 суток эксперимента

Исследование ИПБС показало, что более высокие значения в почвах с ремедиантом и загрязнителем были чаще отмечены на 90-е и 180-е сутки. Однако, в эти 2 срока наблюдаются и более высокие значения в черноземе только с нефтью. Данное явление можно объяснить тем, что на 30 сутки максимально выраженными являются токсические свойства загрязнителя в почвах, а уже по истечении 90 суток в почвах начинаются естественные процессы восстановления (Кутузова и др., 2014).

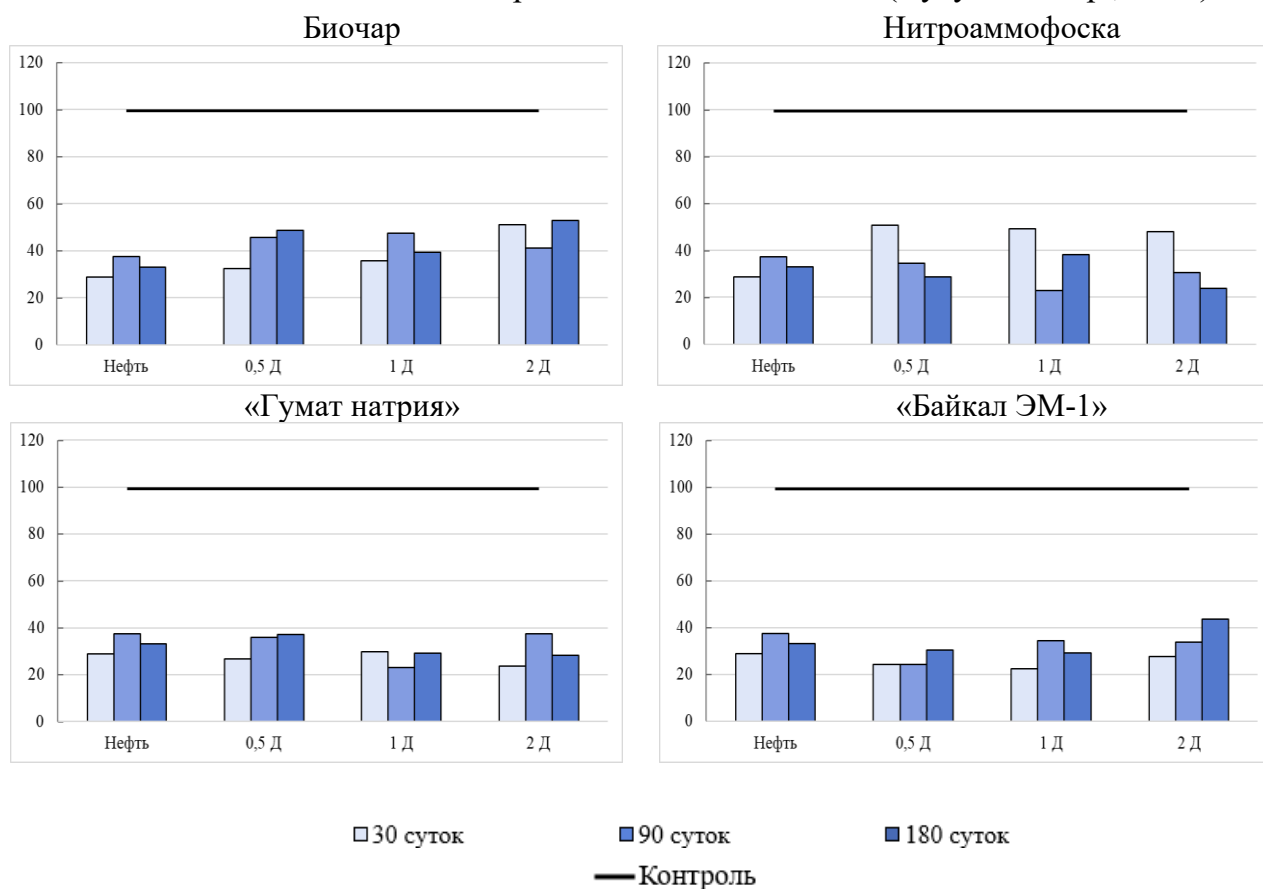


Рисунок 2 – ИПБС нефтезагрязненного чернозема обыкновенного в динамике при внесении ремедиантов, % от контроля

Отмечено, что в нефтезагрязненном черноземе в среднем по трем срокам наибольшая чувствительность характерна для длины корней редиса, а наименьшая для активности ферментов (каталазы или дегидрогеназы).

По истечении 30, 90 и 180 суток модельных экспериментов в черноземе обыкновенном также определяли остаточное содержание углеводородов нефти. За 100% для каждого срока было принято содержание нефти в почве на 30-е, 90-е и 180-е сутки эксперимента соответственно в образцах без ремедиантов. Результаты исследования показали, что внесение ремедиантов в загрязненный чернозем приводит к увеличению степени снижения количества нефти после 30 суток ремедиации на 5%, после 90 суток – на 10%, а после 180 суток – на 17% в среднем по трем дозам.

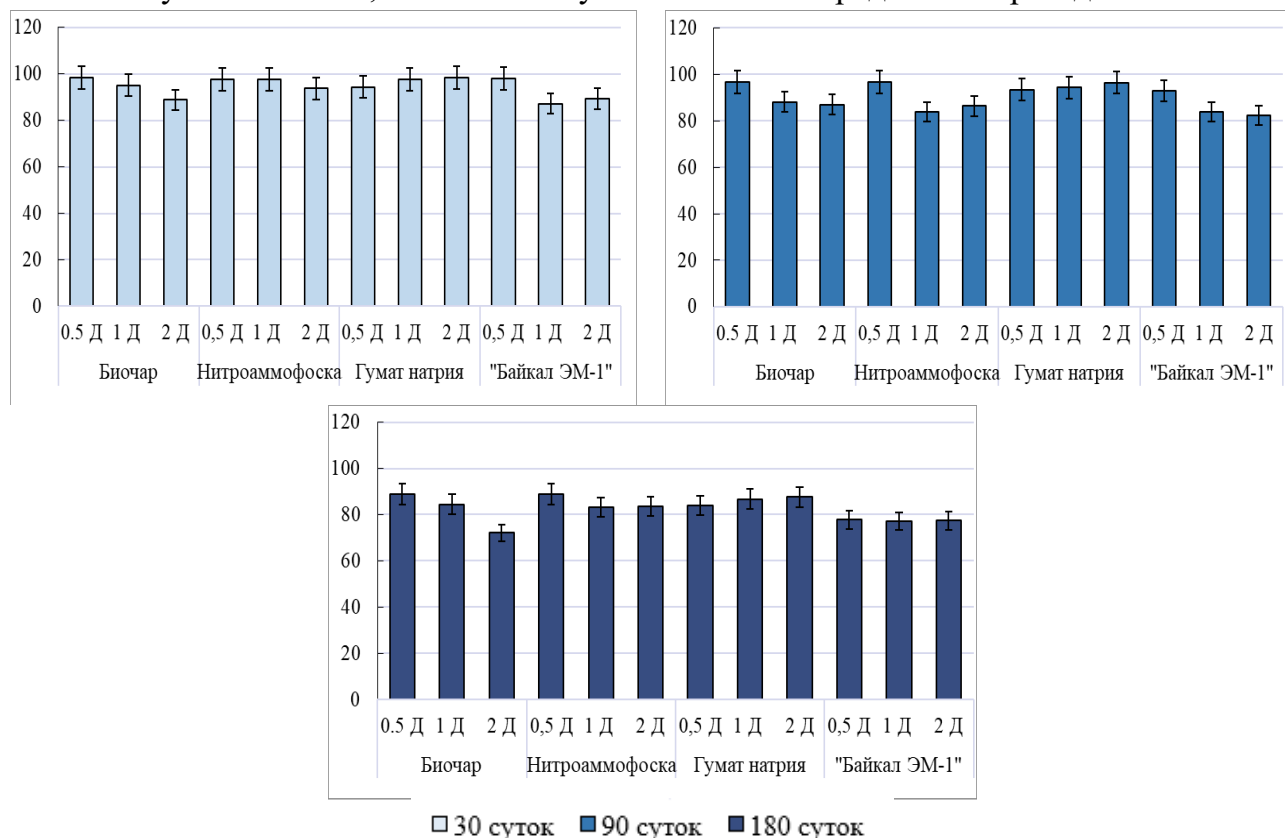


Рисунок 3 – Степень снижения содержания нефти в черноземе обыкновенном через 30, 90 и 180 суток после загрязнения и внесения ремедиантов, % от содержания нефти в почве без ремедиантов

В целом, на 30-е сутки на основании эффективности снижения содержания нефти изучаемые ремедианты можно представить в виде ряда (от наиболее к наименее эффективному):

биочар > «Байкал ЭМ-1» > нитроаммофоска > «Гумат натрия».

На основании степени эффективности снижения содержания нефти в черноземе обыкновенном в среднем по всем срокам (30, 90 и 180 суток) ремедианты представляют ряд (от наиболее к наименее эффективному):

«Байкал ЭМ-1» > биочар > нитроаммофоска > «Гумат натрия».

3.3. Влияние ремедиантов на экологическое состояние чернозема обыкновенного при загрязнении нефтью в разных концентрациях

Изучение биологических показателей в черноземе, загрязненном разными концентрациями нефти при внесении ремедиантов показало, что биочар способствует их стимуляции в большинстве вариантов. При этом наиболее значительные достоверные изменения происходят в длине корней редиса (рис. 4).

Значительные изменения длины корней при загрязнении почвы нефтью, а также при внесении биочара, можно объяснить тем, что именно эта часть растения находится в почве, непосредственно контактирует с вносимыми веществами и сильнее подвержена их воздействию, чем другие части растения. А. С. Чердаковой и С. В. Гальченко (2020) в исследовании фитотоксичности почв при микробиологической ремедиации была отмечена подобная ситуация, но на других культурах. В качестве тест-объектов в работе использовали овес посевной (*Avena sativa* L.) и редьку масличную (*Brassica rapa* L.).

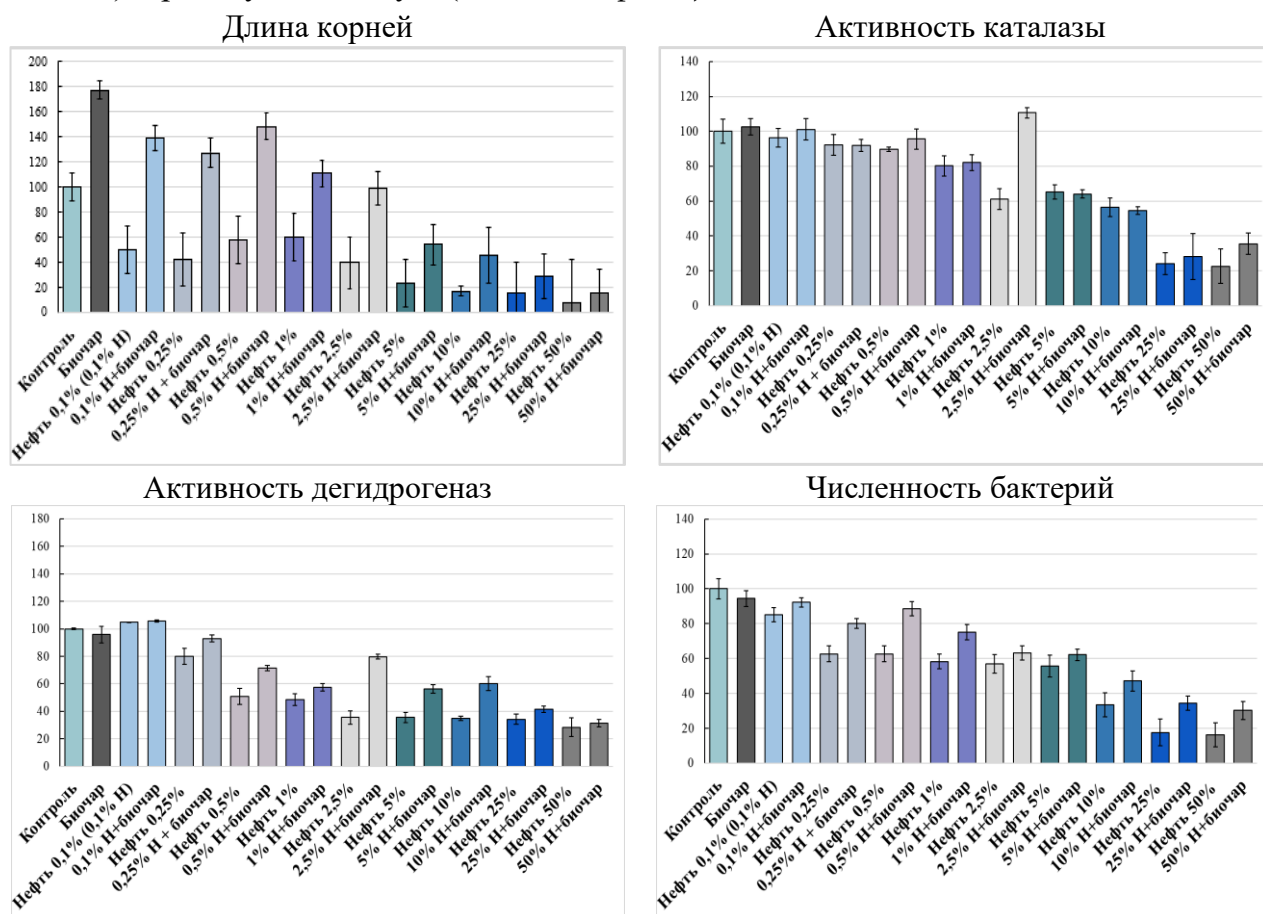


Рисунок 4 – Биологические показатели чернозема обыкновенного при загрязнении разными концентрациями нефти и внесении ремедиантов, % от контроля

Согласно интегральному показателю биологического состояния почв, при загрязнении чернозема разными концентрациями нефти биочар оказался самым эффективным стимулятором показателей во всех вариантах загрязнения (повышение на 21–79% относительно образцов с загрязнителем). Наибольшие значения показателя при внесении биочара отмечены на концентрации нефти 10% от массы почвы

(повышение на 79%), при внесении нитроаммофоски – на концентрации 50% (повышение на 56%), «Гумат натрия» – на концентрации 5% (повышение на 43%), «Байкал ЭМ-1 – на концентрации 0,5% (повышение на 43%) (рис. 4).

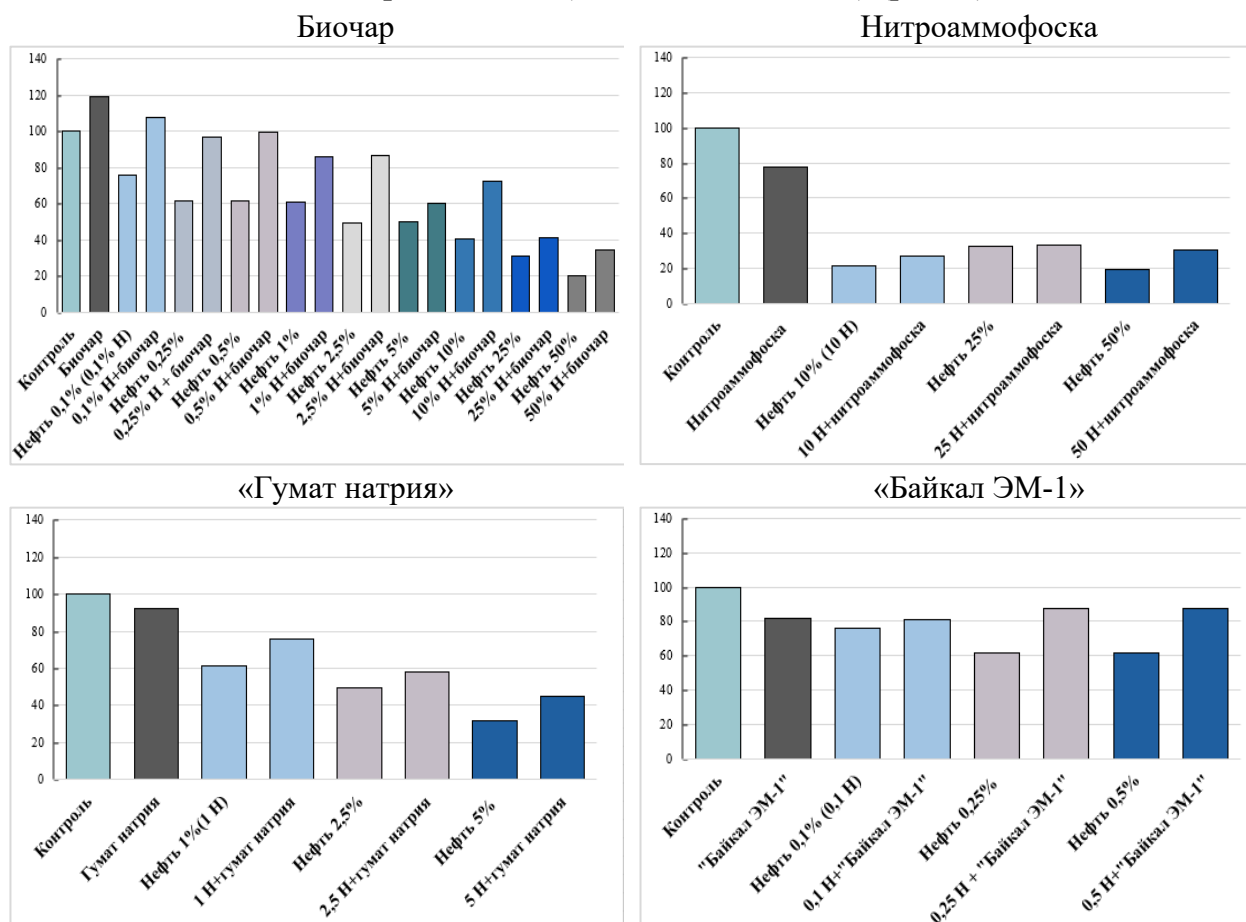


Рисунок 5 – ИПБС чернозема обыкновенного при загрязнении разными концентрациями нефти и внесении ремедиантов, % от контроля

Наибольшее повышение значений биологических показателей в целом, как и увеличение общей численности бактерий в частности в нефтезагрязненных почвах именно при добавлении биочара может быть обусловлено несколькими причинами. За счет сорбирующих свойств ремедианта снижается токсический эффект нефти, оказываемый на почвенную биоту. Кроме того, сырье для биочара содержит в себе минеральные биогенные элементы, которые остаются в нем даже после пиролиза. Также сорбент может поглощать и удерживать в себе биогенные элементы из почвы. Эти элементы (изначально присутствующие и поглощенные) являются доступными для почвенных микроорганизмов и могут стимулировать их численность, что способствует разложению нефти (Ding et al., 2016; Zhu et al., 2017; Gorovtsov et al., 2019; Dike et al., 2021).

3.4. Влияние биочара на экологическое состояние чернозема обыкновенного при загрязнении дизельным топливом в разных концентрациях

При загрязнении дизельным топливом биочар повышает значения биологических показателей на 11–52% относительно образцов с загрязнителем и без ремедиантов в любых из 9 исследованных концентраций. Наибольший стимулирующий эффект биочара отмечен на максимальных концентрациях загрязнителя – 25 и 50%. В данных вариантах ИПБС повышается на 52 и 34% соответственно.

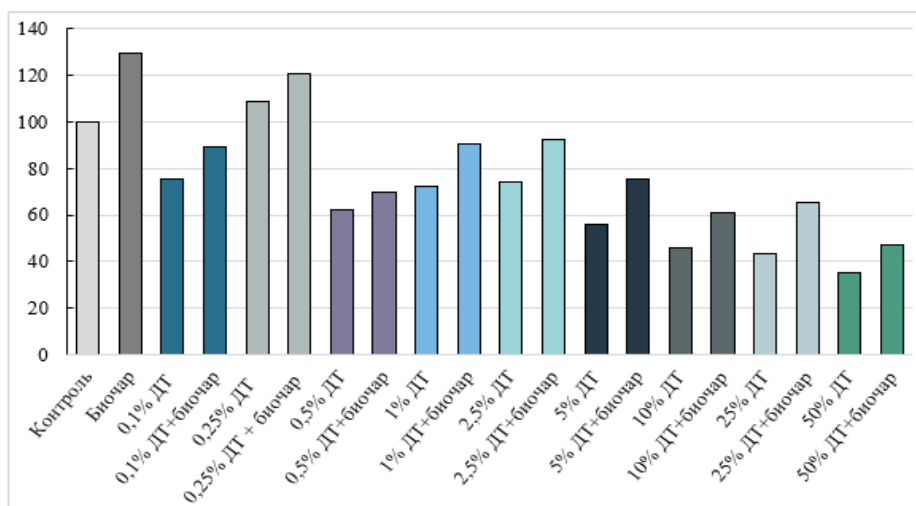


Рисунок 6 – ИПБС чернозема обыкновенного при загрязнении разными концентрациями дизельного топлива и внесении биочара, % от контроля

**Примечание: ДТ – дизельное топливо*

ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ РЕМЕДИАНТОВ НА ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЧВ ЮГА РОССИИ ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ НЕФТЬЮ

В главе представлены результаты изучения экологического состояния бурой лесной и бурой полупустынной почв при внесении разных доз ремедиантов и при загрязнении нефтью.

4.1. Влияние ремедиантов на экологическое состояние нефтезагрязненной бурой лесной почвы

Изучение ИПБС в бурой лесной почве показало, что повышение значений биологических показателей в вариантах без загрязнителя происходит при внесении 2 Д биочара, 1 и 2 Д «Гумат натрия» и 1 Д «Байкал ЭМ-1». Загрязнение почвы нефтью снижает ИПБС на 65% относительно контроля. Использование биочара в нефтезагрязненной бурой лесной почве оказалось самым эффективным, повышающим значение показателя в среднем по трем дозам на 91% относительно образцов с загрязнителем и без ремедиантов (рис. 7).

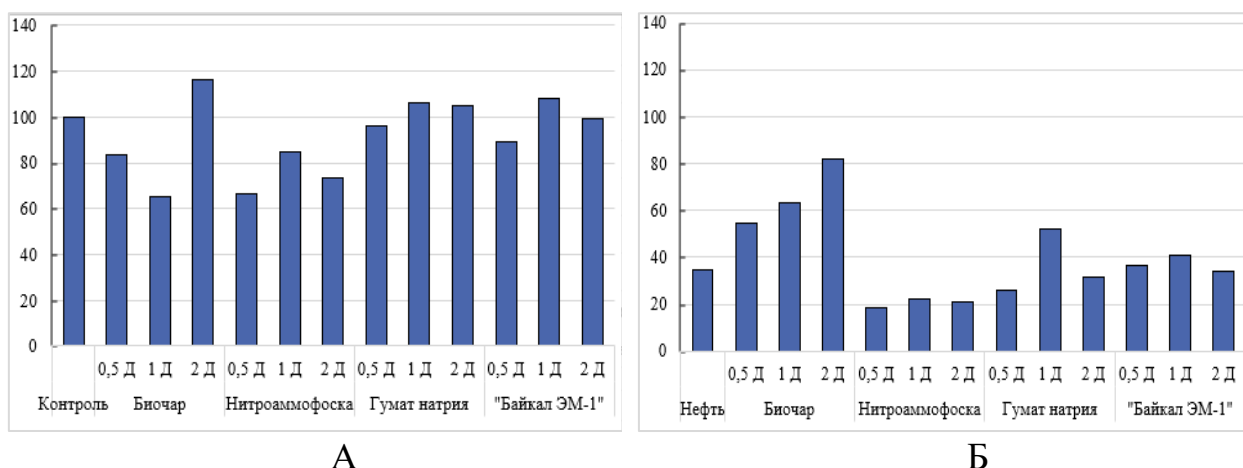


Рисунок 7 – ИПБС бурой лесной почвы без нефти (А) и при загрязнении нефтью (Б) и внесении ремедиантов, % от контроля

Оценка чувствительности показала, что в бурой лесной почве во всех вариантах наибольшая чувствительность установлена для длины корней редиса, а наименьшая для численности бактерий, кроме образцов с «Байкал ЭМ-1», где наименее чувствительным показателем была активность дегидрогеназ.

Кроме того, в бурой лесной почве были определены наиболее эффективные для стимуляции биологических показателей дозы ремедиантов. Для биочара самой эффективной оказалась доза 2 Д, для нитроаммофоски, «Гумат натрия» и «Байкал ЭМ-1» – 1 Д.

Также была проведена оценка эффективности ремедиантов для снижения содержания углеводородов нефти в почве. Она показала, что внесение ремедиантов в загрязненную бурую лесную почву снижает концентрацию нефти в среднем по всем дозам на 14% относительно концентрации нефти на 30-е сутки в образцах без ремедиантов (рис. 8).

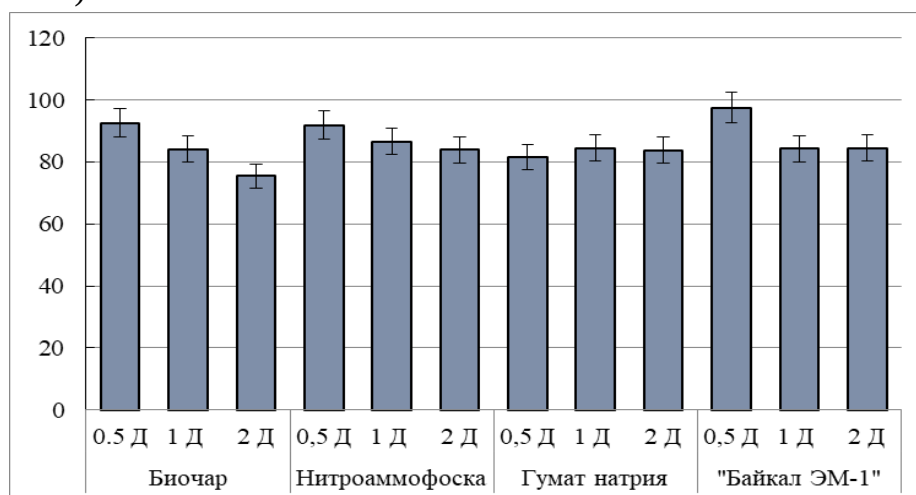


Рисунок 8 – Степень снижения содержания нефти в бурой лесной почве через 30 суток после загрязнения и внесения ремедиантов, % от содержания нефти в почве без ремедиантов

По эффективности снижения содержания нефти в бурой лесной почве ремедианты образуют ряд: *биочар* = «Гумат натрия» > *нитроаммофоска* > «Байкал ЭМ-1».

4.2. Влияние ремедиантов на экологическое состояние нефтезагрязненной бурой полупустынной почвы

Исследование ИПБС показало, что внесение ремедиантов в незагрязненную нефтью бурую лесную почву способствует снижению значения показателя относительно контроля во всех вариантах, кроме образцов с 0,5 Д биочара и 1 Д «Байкал ЭМ-1» (рис. 8). Нефть снижает ИПБС на 23% по сравнению с контролем. Внесение биочара и «Гумат натрия» во всех дозах и «Байкал ЭМ-1» в дозах 0,5 и 1 Д повышает показатель относительно почвы с нефтью и без ремедиантов. Наиболее эффективным оказался биочар (стимуляция на 14% в среднем по трем дозам).

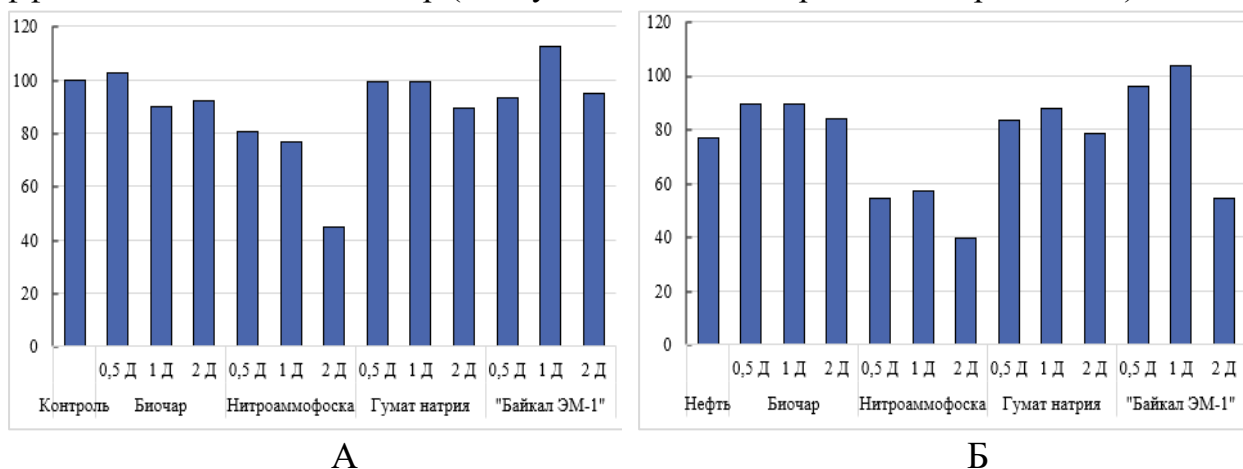


Рисунок 9 – ИПБС бурой полупустынной почвы без нефти (А) и при загрязнении нефтью (Б) и внесении ремедиантов, % от контроля

В ходе оценки чувствительности биологических показателей нефтезагрязненной бурой полупустынной почвы было выявлено, что при внесении биочара и нитроаммофоски наиболее чувствительной оказалась активность каталазы, при внесении «Гумат натрия» – длина побегов, а при использовании «Байкал ЭМ-1» – общая численность бактерий. Наименее чувствительным показателем почвы при внесении биочара, «Гумат натрия» и «Байкал ЭМ-1» была длина корней, при внесении нитроаммофоски – численность бактерий.

Наиболее эффективными дозами для стимуляции биологических показателей в бурой полупустынной почве были: для биочара и нитроаммофоски – 0,5 Д, для «Гумат натрия» – 2 Д, для «Байкал ЭМ-1» – 1 Д.

Оценка эффективности ремедиантов для снижения содержания нефти показала, что внесение ремедиантов в загрязненную бурую полупустынную почву снижает концентрацию нефти в среднем по всем дозам на 9% относительно концентрации нефти на 30-е сутки в образцах без ремедиантов. Наиболее значительные изменения наблюдаются при внесении в почву биочара и «Байкал ЭМ-1», при этом самой эффективной оказалась двойная доза биочара, изменяющая показатель на 27%.

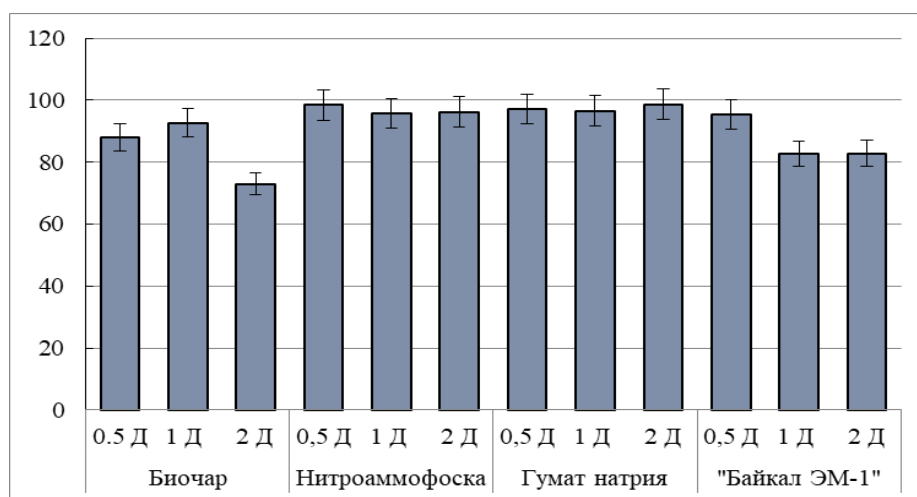


Рисунок 10 – Степень снижения содержания нефти в бурой полупустынной почве через 30 суток после загрязнения и внесения ремедиантов, % от содержания нефти в почве без ремедиантов

По эффективности снижения содержания нефти в бурой полупустынной почве ремедианты образуют ряд: *биочар* > *«Байкал ЭМ-1»* > *нитроаммофоска* > *«Гумат натрия»*.

ГЛАВА 5. ВЛИЯНИЕ БИОЧАРА НА ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЗОНАЛЬНЫХ ПОЧВ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ НЕФТЬЮ

В данной главе представлены результаты изучения влияния биочара на состояние загрязненных нефтью зональных почв Европейской части России. Проведено исследование ремедиации почв Тульской и Московской области и их сравнение с почвами Юга России.

Исследование ИПБС почв Московской и Тульской областей показало, что биочар способствует повышению значений показателя в дерново-подзолистой почве и черноземе оподзоленном на 48 и 28% соответственно, а внесение ремедианта в темно-серую лесную почву, напротив, снижает показатель на 11% относительно контроля (рис. 10). Загрязнение почв нефтью снижает ИПБС во всех изучаемых почвах относительно контроля: на 45% в дерново-подзолистой почве, на 34% в черноземе оподзоленном и в темно-серой лесной почве. Внесение биочара увеличивает значение показателя относительно почв с нефтью и без ремедианта в дерново-подзолистой почве на 77%, в черноземе оподзоленном на 47%, в темно-серой лесной почве на 18%.

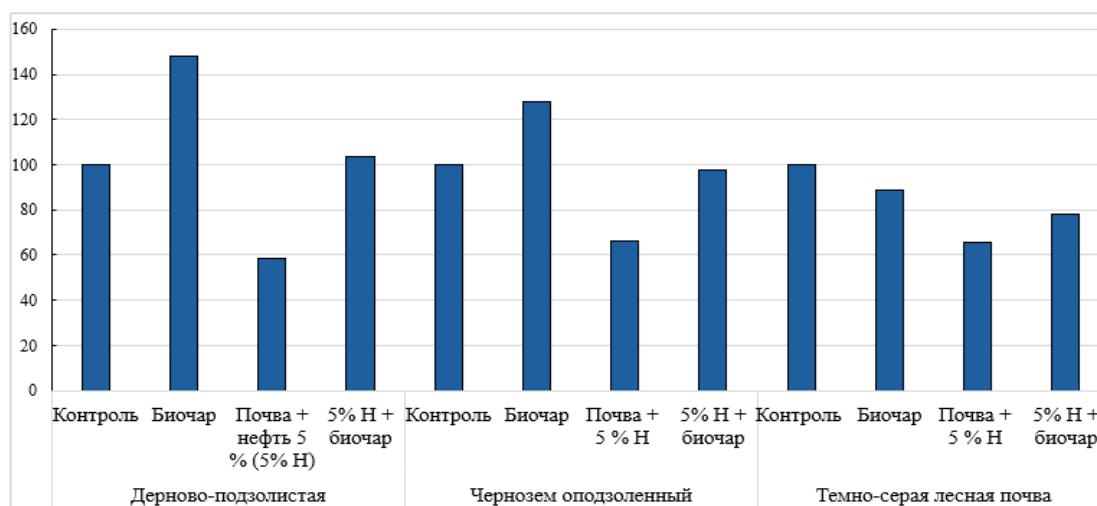


Рисунок 11 – ИПБС почв при загрязнении нефтью и внесении биочара, % от контроля

На основании значений биологических показателей при внесении биочара в загрязненные нефтью почвы была проведена оценка чувствительности. В дерново-подзолистой почве наиболее чувствительной оказалась длина корней редиса, в черноземе оподзоленном и темно-серой лесной почве – длина побегов редиса.

В дерново-подзолистой почве показатели образуют ряд: *длина корней* > *активность дегидрогеназ* > *длина побегов* > *активность каталазы* > *всхожесть* > *численность бактерий*.

В черноземе оподзоленном показатели располагаются в следующем порядке: *длина побегов* > *активность дегидрогеназ* > *активность каталазы* > *всхожесть* > *длина корней* > *численность бактерий*.

В темно-серой лесной почве ряд из показателей имеет вид: *длина побегов* > *численность бактерий* > *длина корней* > *всхожесть* > *активность дегидрогеназ* = *активность каталазы*.

Также была проведена оценка эффективности биочара для снижения содержания нефти в почвах (рис. 12).

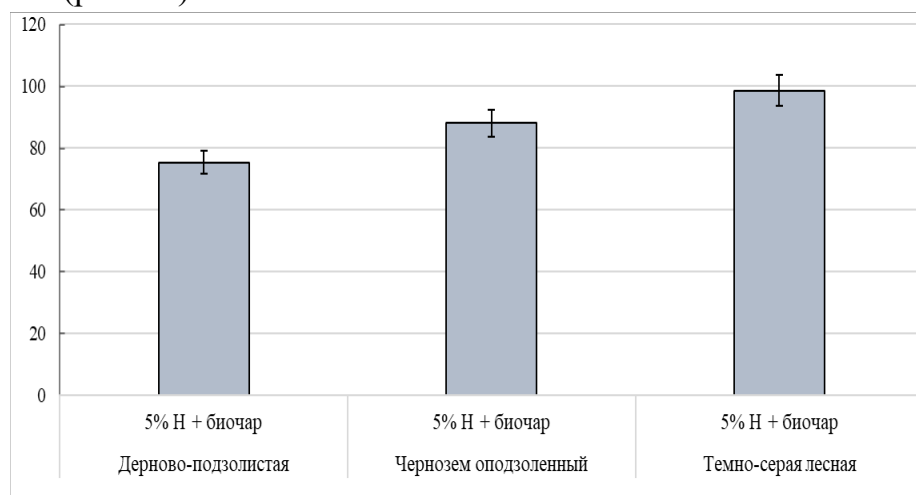


Рисунок 12 – Степень снижения содержания нефти в почвах через 30 суток после загрязнения и внесения биочара, % от содержания нефти в почве без ремедианта

Исследование показало, что при внесении ремедианта в дерново-подзолистой почве происходит снижение концентрации нефти на 25%, в черноземе оподзоленном – на 12%, а в темно-серой лесной почве содержание нефти снижается на 1% относительно концентрации нефти на 30-е сутки в образцах без биочара.

На основании интегрального показателя биологического состояния всех исследуемых в работе почв была проведена оценка эффективности использования рекомендуемой дозы биочара (1 Д) для стимуляции биологических показателей (рис. 13).

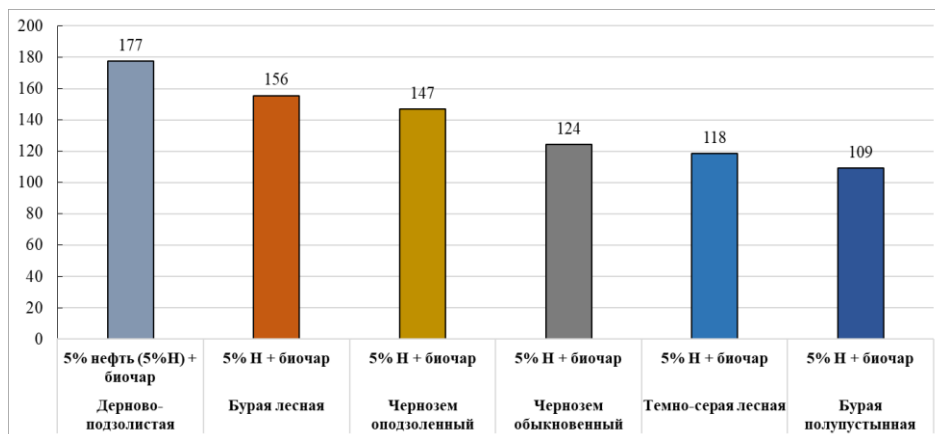


Рисунок 13 – ИПБС почв Европейской части России после внесения нефти и биочара, % от нефтезагрязненных образцов

Исследование показало, что биочар способствует стимуляции ИПБС всех изучаемых почв на 9–77% относительно образцов с загрязнителем, но без ремедианта, при этом наибольшее значение показателя отмечается в дерново-подзолистой почве, а наименьшее – в бурой полупустынной почве. По эффективности применения ремедианта был составлен ряд из почв (от наибольшей эффективности к наименьшей): *дерново-подзолистая > бурая лесная > чернозем оподзоленный > чернозем обыкновенный > темно-серая лесная > бурая полупустынная*.

Кроме того, была проведена оценка эффективности применения биочара для снижения содержания нефти в почвах (рис. 14).

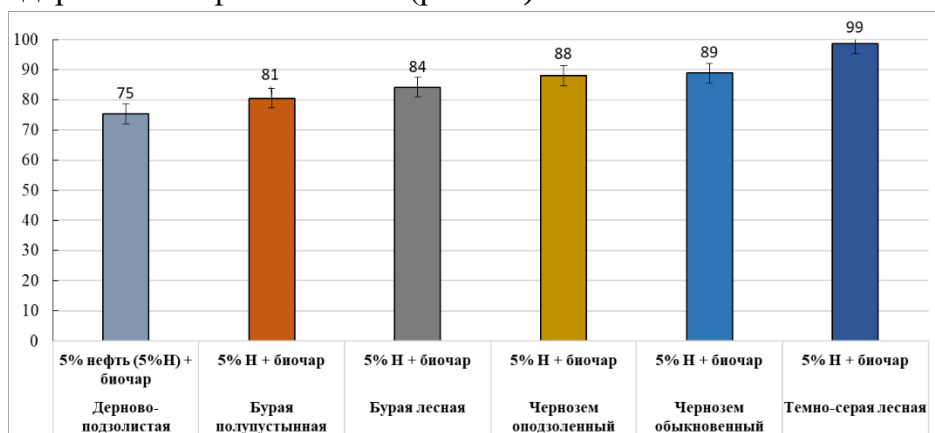


Рисунок 14 – Степень снижения содержания нефти в почвах Европейской части России через 30 суток после загрязнения и внесения биочара, % от содержания нефти в почве без ремедианта

Было обнаружено, что биочар способствует снижению концентрации нефти во всех изучаемых почвах относительно концентрации нефти в почвах без биочара на 30-е сутки эксперимента на 1–25%. При этом максимальная эффективность ремедианта отмечается дерново-подзолистой почве.

ВЫВОДЫ

1. Применение ремедиантов (биочара, «Байкал ЭМ-1», «Гумат натрия», нитроаммофоски) при загрязнении нефтяными углеводородами (нефтью, мазутом, бензином, дизельным топливом) позволяет увеличить значения ИПБС почв при использовании биочара максимально до 135%, нитроаммофоски до 121%, «Байкал ЭМ-1» до 77%, «Гумат натрия» до 71%, и снизить содержание нефти в почве при использовании биочара максимально на 28%, «Байкал ЭМ-1» на 23%, «Гумата натрия» на 18%, нитроаммофоски на 17%. С увеличением продолжительности ремедиации экологическое состояние почв улучшается.

2. При ремедиации загрязненных нефтяными углеводородами почв исследованные ремедианты оказывают наибольший стимулирующий эффект в большинстве случаев на показатели роста и развития растений, наименьшая стимуляция характерна для общей численности бактерий. Среди ферментов класса оксидоредуктаз наиболее чувствительными являются ферриредуктазы, а среди гидролаз – уреазы. Наиболее чувствительной группой микроорганизмов являются аммонифицирующие бактерии.

3. Для оценки эффективности ремедиации почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами, рекомендуются следующие биологические показатели: длина корней и побегов редиса, всхожесть семян редиса, активность каталазы, дегидрогеназ, фосфатазы, ферриредуктаз, пероксидаз, уреазы, инвертазы, общая численность бактерий, численность амилολитических, аммонифицирующих бактерий и актиномицетов.

4. Внесение биочара в нефтезагрязненные почвы способствует снижению гидрофобности бурой полупустынной на 64%, дерново-подзолистой на 61%, чернозема обыкновенного на 43%, темно-серой лесной на 35%, бурой лесной на 19% и чернозема оподзоленного на 27%. На такие показатели, как pH, содержание солей и окислительно-восстановительный потенциал ремедианты оказывают менее существенное воздействие.

5. В зависимости от типа почв эффективность применения ремедиантов при загрязнении нефтяными углеводородами значительно отличается. По эффективности применения биочара при загрязнении для стимуляции биологических показателей зональные почвы Европейской части России образуют ряд: *дерново-подзолистая (увеличение ИПБС на 77%) > бурая лесная (56%) > чернозем оподзоленный (47%) > чернозем обыкновенный (24%) > темно-серая лесная (18%) > бурая полупустынная (9%)*. По степени эффективности использования биочара для снижения содержания нефти, исследуемые почвы располагаются в следующем порядке: *дерново-подзолистая (снижение на 25%) >*

бурая полупустынная (19%) > бурая лесная (16%) > чернозем оподзоленный (12%) > чернозем обыкновенный (11%) > темно-серая лесная (1%).

6. В незагрязненных почвах ремедианты оказывают разнонаправленный эффект на биологические показатели: в одних случаях происходит подавление показателей роста и развития растений, активности ферментов и численности бактерий, в других случаях (чаще всего при внесении «Байкал ЭМ-1») наблюдается стимуляция показателей.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По теме диссертационной работы опубликованы 43 научные работы.

Статьи, опубликованные в журналах, входящих в базы данных международных индексов научного цитирования Scopus и/или Web of Science

1. Ecological State of Haplic Chernozem after Pollution by Oil at Different Levels and Remediation by Biochar / **Ruseva A.**, Minnikova T., Kolesnikov S., Revina S., Trushkov A. // Sustainability. – 2023. – Vol. 15, No. 18. – P. 13375. – DOI 10.3390/su151813375. (Q1)
2. Assessment of the ecological state of haplic chernozem contaminated by oil, fuel oil and gasoline after remediation / **Ruseva A.**, Minnikova T., Kolesnikov S., Trufanov D., Minin N., Revina S., Gayvoronsky V. // Petroleum Research. – 2024. – Vol. 9, No 1. – P. 155-164. – DOI 10.1016/j.ptlrs.2023.03.002. (Q2)
3. Minnikova, T. V. Assessment of Ecological State of Soils Contaminated by Petroleum Hydrocarbons after Bioremediation / T. V. Minnikova, **A. S. Ruseva**, S. I. Kolesnikov // Environmental Processes. – 2022. – Vol. 9, No. 3. – Art. No 49. – DOI 10.1007/s40710-022-00604-9. (Q2)
4. The Level of the Efficiency of Bioremediation by Oil-Contaminated Brown Semi-Desert Soil of the Republic of Kalmykia (Model Experiment) / T. V. Minnikova, **A. S. Ruseva**, S. Yu. Revina [et al.] // Arid Ecosystems. – 2023. – Vol. 13, No. 4. – P. 518-526. – DOI 10.1134/S2079096123040078 (Q 3)
5. Enzymatic Assessment of the State of Oil-Contaminated Soils in the South of Russia after Bioremediation / Minnikova T., Kolesnikov S., Revina S., **Ruseva A.**, Gaivoronsky V. // Toxics. – 2023. – Vol. 11, No. 4. – P. 355. – DOI 10.3390/toxics11040355. (Q1)
6. Influence of the biochar on petroleum hydrocarbon degradation intensity and ecological condition of Haplic Chernozem / Minnikova T., Kolesnikov S., **Ruseva A.**, Kazeev K., Minkina T., Mandzhieva S., Sushkova S. // Eurasian Journal of Soil Science. – 2022. – Vol. 11, No. 2. – P. 157-166. – DOI 10.18393/ejss.1037798. (Q3)

Другие публикации, входящие в базы данных международных индексов научного цитирования Scopus и/или Web of Science

7. Minnikova, T. V. Remediation of Urban Soils with Nitrogen and Microbiological Fertilizers when Contaminated by Oil, Gasoline and Fuel Oil / T. V. Minnikova, **A.S. Ruseva**, S. I. Kolesnikov // Smart and Sustainable Urban Ecosystems: Challenges and Solutions: Proceedings of Smart and Sustainable Cities, SSC 2022. Springer Geography. – 2022. – P. 225–236. – DOI 10.1007/978-3-031-37216-2_18.

Статьи, опубликованные в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ЮФУ и ВАК

8. Влияние Байкал ЭМ-1 на экологическое состояние чернозема обыкновенного при загрязнении нефтью, мазутом и бензином / **Русева А. С.**, Минникова Т. В., Колесников С. И., Ревина С. Ю., Евстегнеева Н. А., Труфанов Д. А. // Российская сельскохозяйственная наука. – 2022. – № 4. – С. 43–50. – DOI 10.31857/S2500262722040081.

9. Влияние биочара на экологическое состояние чернозема обыкновенного при загрязнении нефтью, бензином и мазутом / Минникова Т. В., **Русева А. С.**, Колесников С. И., Ревина С. Ю., Гайворонский В. Г. // Агрохимия. – 2022. – № 9. – С. 84–93. – DOI 10.31857/S0002188122090095.

10. Минникова, Т. В. Оценка ферментативной активности нефтезагрязненного чернозема после биоремедиации / Т. В. Минникова, **А. С. Русева**, С. И. Колесников // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 5. – С. 5–20. – DOI 10.26897/0021-342X-2022-5-5-20.

11. Численность бактерий в нефтезагрязненном черноземе обыкновенном после ремедиации / Т. В. Минникова, **А. С. Русева**, С. И. Колесников, Д. А. Труфанов // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. – 2023. – № 3. – С. 65–75. – DOI 10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-3-65-75.

Глава в монографии

12. Оценка экологического состояния нефтезагрязненных почв после ремедиации: монография / Минникова Т. В., Колесников С. И., Ревина С. Ю., **Русева А. С.**; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южный федеральный университет", Академия биологии и биотехнологии имени Д. И. Ивановского. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2023. – 101, [1] с. – ISBN 978-5-9275-4302-1.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- 1 Д — доза, рекомендуемая производителем или по литературным данным
- 0,5 Д — доза, составляющая половину от рекомендуемой
- 2 Д — доза, превышающая рекомендуемую в 2 раза
- ИПБС — интегральный показатель биологического состояния