

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Пушкинский государственный естественно-научный институт»
(ПушГЕНИ)

На правах рукописи



МИХЕДОВА ЕЛИЗАВЕТА ЕВГЕНЬЕВНА

**ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МЕТОДА
СОРБЦИОННОЙ БИОРЕМЕДИАЦИИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ
МИНЕРАЛЬНЫХ
ПОЧВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

1.5.15. Экология (биологические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Ростов-на-Дону – 2023

Работа выполнена в лаборатории физико-химии почв Института физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук – обособленного подразделения федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований Российской академии наук» (ИФХиБПП РАН – обособленное подразделение ФИЦ ПНЦБИ РАН)

Научный руководитель:	Васильева Галина Кирилловна, кандидат биологических наук, с.н.с., федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований Российской академии наук», Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук, лаборатория физико-химии почв, ведущий научный сотрудник
Официальные оппоненты:	Андроханов Владимир Алексеевич, доктор биологических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения РАН (ИПА СО РАН)», директор Завгородняя Юлия Анатольевна, кандидат биологических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», факультет почвоведения, кафедра химии почв, доцент

Защита диссертации состоится **23 ноября 2023 г. в 13.00** 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/1319207/>

Автореферат разослан «___» _____ 2023 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 Алена Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Важной задачей экологии в современных условиях является разработка экологических методов защиты окружающей среды от антропогенного воздействия. К основным источникам антропогенного загрязнения в РФ относятся места добычи, переработки и транспортировки нефти и нефтепродуктов. Ежегодно в мире происходит множество аварийных ситуаций, в результате которых на поверхность почв поступают миллионы тонн углеводородов нефти. В интересах нефтедобывающих компаний в большинстве случаев отдаются предпочтения радикальным методам ликвидации аварийных нефтеразливов, основанным на сжигании нефти на месте разлива или вывозе экскавированного загрязненного грунта для утилизации на специальных площадках.

Одним из наиболее перспективных методов рекультивации нефтезагрязненных почв считается метод биоремедиации *in situ*, основанный на способности микроорганизмов разлагать углеводороды нефти, используя их в качестве ростовых субстратов. Однако, применение этого метода обычно рекомендуется только для почв с умеренным уровнем загрязнения, т.е. при содержании углеводородов не более 5-10% (в зависимости от почвы), а, следовательно, применение биоремедиации мало эффективно для решения проблем ликвидации аварийных разливов в нефтедобывающих регионах, где концентрации углеводородов нефти в почве значительно превышают указанный уровень (Ossai et al., 2019, Chaudhary, Kim, 2019, Hawrot-Paw et al., 2020).

До недавних пор, большинство работ, посвященных биоремедиации нефтезагрязненных почв, было направлено на получение новых биопрепаратов на основании выделенных штаммов микроорганизмов-нефтедеструкторов для очистки почвы методом биоаугментации (Михедова, Абашина, 2020; Chaudhary, Kim 2019, Ławniczak et al., 2020). В современных реалиях набирает обороты тренд применения технологии очистки почв от нефти и других поллютантов методом сорбционной биоремедиации почв, которая основана на использовании сорбентов в комбинации с приемами классической биоремедиации (Васильева и др., 1994; 2013; Wu et al., 2017; Vasilyeva et al., 2020; 2022). По оценкам экспертов данный способ является наиболее экологичным и экономически выгодным (Слюсаревский и др., 2018). Однако исследования в этом направлении еще очень ограничены. Кроме того, применение этого метода требует индивидуального подхода для разных почвенно-климатических условий.

Основная часть наземных месторождений углеводородов России расположена на Севере Западной Сибири, где лидирует Ханты-Мансийский автономный округ, в котором добывается 42,5% нефти в России, следом идет Ямало-Ненецкий Автономный округ – главный регион России по добыче природного газа (Справка о состоянии ..., 2019), что оказывает сильную антропогенную нагрузку на их экосистемы. Территории, занимаемые ЯНАО и ХМАО, локализованы в пределах тундрово-таежных ландшафтов. Почвенный покров в этом регионе представлен подзолистыми, болотно-подзолистыми и

болотными почвами (Середина и др., 2011), которые можно разделить на почвы минеральные и органотрофные.

Минеральные почвы – общеупотребительный термин для растительно-наземных почв, не имеющих торфяного горизонта (Почвенная номенклатура..., под ред. Б.Г. Розанова, 1974). Эти почвы наименее устойчивы к нефтяному загрязнению. В Западно-Сибирской низменности минеральные почвы представлены в основном *подзолистыми почвами легкого гранулометрического состава*. Среди них наиболее распространены подзолы, иллювиально-гумусовые подзолы и поверхностно-глеево-подзолистые почвы (Добровольский, 2001). Песчаные подзолы мало обеспечены гумусом, плохо структурированы, растительность не разнообразна (Середина и др., 2011). Поэтому сохранение исходных параметров экосистем данных территорий крайне важно, а, следовательно, разработка эффективного метода сорбционной биоремедиации для минеральных почв Западной Сибири особенно актуальна.

Степень разработанности исследования. Существует множество технологий биоремедиации, разработанных для территорий с холодным температурным режимом (Башкин и др., 2020, Фомичева и др., 2020, Окмянская 2022, Горбаев 2022, Yuniati 2018, Chaudhary et al., 2019, Ferguson et al., 2020, Korneukova et al., 2021), однако до сих пор идеальной методики не существует.

В ряде аналитических обзоров, рассматривающих расширение возможностей метода биоремедиации, предлагается использование биопрепаратов на основе микроорганизмов-деструкторов, иммобилизованных на сорбентах (Артюх и др., 2014; Колотова и др., 2021; Федорова и др., 2022; Cui et al., 2020; Zamparas et al., 2020). Однако в последние годы стали появляться работы, в которых показано положительное влияние самих сорбентов на скорость биоремедиации почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами (Башкин и др., 2021; Мязин и др., 2020; Булуктаев, 2022; Zavgorodnyanya et al., 2017; Myazin et al., 2020; 2021; Sayed et al., 2021; Minnikova et al., 2022).

В лаборатории физикохимии почв ИФХиБПП РАН был разработан метод сорбционной биоремедиации *in situ*, показавший высокую эффективность для очистки трех типов нефтезагрязненных почв, распространенных в центре Русской равнины (Васильева и др., 2012; 2013; Semenyuk et al., 2014; Kondrashina et al., 2018; Vasilyeva et al., 2020). На первом этапе было показано, что внесение гранулированного активированного угля (ГАУ) в нефтезагрязненную почву способствует ускорению микробной деградации углеводородов за счет снижения ее токсичности. В последние годы для серой лесной почвы был *«разработан метод сорбционной биоремедиации нефтезагрязненной почвы, основанный на использовании целого ряда более дешевых природных сорбентов разных классов и их смесей»* (Зиннатшина, 2019). Кроме того, было доказано, что в период обработки почв в присутствии сорбентов резко снижается миграция подвижных и токсичных промежуточных продуктов окисления углеводородов в грунтовые воды (Vasilyeva et al., 2020).

Однако, на Севере Западной Сибири распространены *слабогумусированные минеральные почвы легкого гранулометрического состава*. Из-за низкой буферности этих почв необходим особый подход при изучении возможностей метода сорбционной биоремедиации для ликвидации последствий аварийных разливов нефти на их поверхности.

Цель исследования. На примере трех типов минеральных почв Западной Сибири, умеренно и сильно загрязненных сырой нефтью, изучить механизмы положительного влияния сорбентов натурального происхождения на изменение интегральной токсичности почв и достижение допустимого уровня концентрации нефтяных загрязнителей, а также разработать метод сорбционной биоремедиации для ликвидации последствий аварийных разливов нефти на поверхности минеральных почв нефтедобывающих регионов Западной Сибири.

Задачи исследования:

1. Провести комплексные экологические исследования в условиях вегетационного эксперимента *с глеево-подзолистой почвой*, искусственно загрязненной умеренными дозами нефти (7%), изучить *влияние сорбентов натурального происхождения* (углеродистые, органические и минеральные) на изменение концентрации основных нефтяных загрязнителей в почве и ее интегральной токсичности. Выявить наилучшие формы и дозы сорбентов.
2. Изучить действие *наилучших сорбентов* натурального происхождения и их смесей на изменение концентраций нефтяных загрязнителей и интегральной токсичности *подзола иллювиально-железистого*, искусственно загрязненного умеренными и высокими дозами нефти (6-13%).
3. **Определить оптимальный состав сорбентов** и дозы их внесения для ускорения процесса биоремедиации минеральных почв Западной Сибири при умеренном и высоком уровнях загрязнения: от 5 до 13% нефти.
4. **Апробировать разработанный метод** сорбционной биоремедиации с использованием композитного сорбента в полевых условиях *на литострате песчаном*, сильно загрязненном нефтью - 15%.
5. **Дать экологическую оценку** использования сорбционной биоремедиации минеральных почв Западной Сибири на основании изучения остаточных количеств поллютантов в очищенных почвах и их интегральной токсичности.

Научная новизна работы:

1. Впервые показано, что после проведения биоремедиации минеральных почв Западной Сибири, как умеренно, так и сильно загрязненных нефтью (от 5 до 15%), несмотря на снижение суммарной концентрации углеводородов до уровня, близкого к региональным ОДК/ПДК (5–15 г/кг), почвы проявляют повышенную фито- и биотоксичность из-за накопления водорастворимых токсичных промежуточных продуктов окисления углеводородов и низкой буферности почв.
2. Доказана высокая эффективность метода сорбционной биоремедиации *in situ*, который основан на дополнительном внесении натуральных сорбентов,

способствующих снижению биотоксичности почв вследствие частичной сорбции компонентов нефти и токсичных продуктов их трансформации.

3. Разработан композитный сорбент на основе торфа верхового, гранулированного активированного угля и диатомита, который наиболее эффективно влияет на скорость процесса биоремедиации сильно загрязненных нефтью минеральных почв Западной Сибири за счет снижения их токсичности, поддержания pH почвы в оптимальном интервале и благоприятного уровня полевой влажности почвы в течение всего времени обработки, а также повышения устойчивости растений в период доочистки методом фиторемедиации.

Теоретическая и практическая значимость работы. Изучены механизмы действия натуральных сорбентов трех классов (минеральные, органические и углеродистые) на скорость биоремедиации минеральных почв Западной Сибири, умеренно и сильно загрязненных нефтью. Разработаны теоретические и практические основы метода *in situ* сорбционной биоремедиации минеральных почв Западной Сибири, загрязненных углеводородами нефти в дозе от 5 до 15%. В основе метода лежит дополнительное внесение оптимальных форм и доз натуральных сорбентов при проведении биоремедиации нефтезагрязненных почв, что существенно расширяет возможности применения метода *in situ* для очистки сильнозагрязненных минеральных почв Западной Сибири в результате обратимой сорбции токсикантов, поддержания оптимальной влажности и pH почв в течение всего процесса очистки, а также повышения устойчивости растений в условиях недостатка влаги. Разработан состав композитного сорбента, применение которого наиболее эффективно снижает интегральную токсичность сильнозагрязненных минеральных почв Западной Сибири и ускоряет достижение регионального уровня ПДК нефтяных загрязнителей в почве. Полученные результаты могут быть использованы для создания эффективной и экологичной технологии по устранению последствий аварийных разливов нефти и нефтепродуктов в нефтедобывающих регионах Западной Сибири.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. После проведения биоремедиации минеральных почв Западной Сибири, как умеренно, так и сильно загрязненных, несмотря на снижение суммарной концентрации углеводородов до уровня, близкого к региональным ОДК/ПДК, почвы проявляют повышенную фито- и биотоксичность из-за накопления водорастворимых и токсичных продуктов окисления углеводородов и низкой буферности почв.
2. Применение сорбционной биоремедиации *in situ* для очистки минеральных почв Западной Сибири, умеренно и сильно загрязненных нефтью (от 5 до 15%), позволяет снизить концентрацию углеводородов нефти до допустимого уровня, а токсичность почв – до минимума в течение 1-3-х сезонов в зависимости от степени загрязнения.
3. Разработанный композитный сорбент на основе торфа, гранулированного активированного угля и диатомита наиболее эффективно повышает

скорость биоремедиации сильно загрязненных нефтью минеральных почв Западной Сибири за счет снижения их токсичности, поддержания благоприятного уровня полевой влажности и pH почвы в оптимальном интервале в течение всего времени обработки и повышения устойчивости растений к стрессу.

Апробация работы. Основные результаты исследований представлены на 20 научно-практических конференциях различного уровня, в том числе 3-х международных: V Всерос. науч.-практ. конф. с межд. уч. «Безопасный Север – чистая Арктика» (13-14.04.2023, г. Сургут); Межд. молод. науч. шк. «Мониторинг, охрана и восстановление почвенных экосистем в условиях антропогенной нагрузки» (27-30.09.2022, Ростов-на-Дону); XVIII Межд. форум-конкурс студ. и мол. уч. «Акт. Пробл. Недропользования 2022» (16-20.05.2022, С.-Петербург); VII Всерос. конф. с межд. уч. «Экобиотех», посв. 70-л. УИБ УФИЦ РАН и УФИЦ РАН, (4–7.10.2021, г. Уфа.); Шк.-конф. для мол. уч., асп. и студ. «Генетические технологии в микробиологии и микробное разнообразие» и VII Пущинская конф. «Биохимия, физиология и биосферная роль микроорганизмов» (6–8.12.2021, ИБФМ РАН, г. Пущино); Межд. форум «Нефть и газ – 2021» (26-30.04.2021, М.: РГУ Нефти и газа им. И.М. Губкина); XIV Всерос. конф. мол. уч., спец. и студ. (25–28.10.2021, М.: РГУ Нефти и Газы им. И.М. Губкина.); XXVIII Межд. конф. студ., асп. и мол. уч. «Ломоносов-2021» (20.04.2021, М.: МГУ); XIX Всерос. конф. – Конк. студ. и асп. (12–16.04.2021, М.: РГУ Нефти и газа им. И.М. Губкина); VIII Межд. (XVI Всерос.) науч.-практ. конф. «Нефтепромысловая химия», (24.06.2021, М.: РГУ им. И.М. Губкина); Student Technical Congress 2021, (4.11.2021, Germany); Intern. youth scientific and practical conf. “Oil and gas horizons XIII” (17-19.11.2021, М.: Gubkin University).

Личный вклад автора. Данная работа выполнена по итогам исследований, проведенных соискателем в период с 2019 по 2023 гг. Соискатель лично проводила все вегетационные и микрополевые исследования и анализы образцов. Собственноручно закладывала эксперименты при апробации метода на территории ЛПДС в г. Сургут, ХМАО. Соискатель проводила обработку данных, их графическое изображение, обобщение результатов и написание диссертации.

Внедрение результатов исследования. Результаты проведенных исследований по теме диссертации были использованы в лекционных курсах и на практических занятиях в рамках дисциплины «Экология загрязненных почв» (Приложение №2).

Публикации. Основные положения диссертационной работы изложены в 20 публикациях, в том числе: 2 статьи в изданиях, входящих в международные базы данных рецензируемой научной литературы Scopus и/или Web of Science, 1 статья в издании, входящем в перечень рецензируемых научных изданий ЮФУ и ВАК, 17 публикаций в сборниках материалов и тезисов конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы, списка сокращений и

приложений. Работа изложена на 130 страницах машинописного текста, содержит 8 таблиц и 26 рисунков. Список литературы включает 204 источников, в том числе 103 на английском языке.

Диссертация соответствует специальности 1.5.15 Экология (биологические науки). В ней рассматриваются вопросы антропогенного воздействия на почвенные экосистемы, связанные с аварийными разливами нефти, в том числе - влияние нефтяных загрязнителей на численность и активность почвенных микроорганизмов, рост растений в загрязненной почве, а также выживаемость и плодовитость гидробионтов *Daphnia magna* в водно-почвенных экстрактах. Впервые поднимается вопрос о необходимости пересмотра допустимых уровней загрязнителей нефти с учетом не только суммарной концентрации углеводородов нефти, но и их токсичных метаболитов. В результате дается научное обоснование технологии *in situ* сорбционной биоремедиации нефтезагрязненных минеральных почв Западной Сибири.

Благодарности. Выражаю признательность за помощь в работе научному руководителю – к.б.н. Г.К. Васильевой, всем сотрудникам лаборатории физико-химии почв ИФХиБПП РАН и лаборатории биологии плазмид ИБФМ РАН в ФИЦ «ПНЦБИ РАН», а также сотрудникам компании УМН АО «Транснефть-Сибирь». Исследования выполнены при частичной финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2022-1122), и Программы стратегического академического лидерства ЮФУ "Приоритет 2030".

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В обзоре литературы обсуждаются экологические проблемы добычи, транспортировки и переработки углеводородов в России и основных нефтедобывающих районах Западной Сибири. Рассматриваются почвенно-географические и климатические характеристики ЯНАО и ХМАО. Описываются состав и свойства нефти как основного загрязнителя окружающей среды, установленные ПДК и ОДК нефти в почвах. Рассматриваются также методы восстановления земель после аварийных разливов нефти. Обсуждаются характеристики сорбентов, используемых для ликвидации последствий нефтеразливов, сравниваются свойства сорбентов и механизмы сорбции.

Глава 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

2.1. Объекты. Эксперименты проводили на трех типах минеральных почв легкого гранулометрического состава, которые были отобраны из верхнего минерального слоя на фоновых территориях вблизи нефтяных или нефтегазовых месторождений Западной Сибири. Образец *глеево-подзолистой почвы* отобран на территории близ Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения (г. Новый Уренгой, ЯНАО), а *подзола иллювиально-железистого* – вблизи Самотлорского месторождения (г. Нижневартовск, ХМАО). Апробацию метода проводили на *литострате песчаном*, которым покрыта заболоченная

территория вокруг г. Сургут. Все почвы супесчаные, малогумусированные ($S_{орг}$ 0,13-0,86), кислые (pH_v 5,4-5,9), слабо обеспеченные биофильными элементами. Для проведения экспериментов были взяты **три типа нефти** (от легкой до средней плотности, сернистые), характерные для каждого региона. В экспериментах использовали **биопрепарат** «Микробак», который был разработан в лаборатории биологии плазмид ИБФМ РАН. Он содержит консорциум штаммов родококков и псевдомонад, в том числе плазмид-содержащие штаммы, способные разлагать полициклические ароматические углеводороды, и рекомендуется для биоремедиации почв с содержанием нефти до 15% при pH_v почвы от 6 до 8 и T° от 4 до 32°C (Filonov et al., 2012).

В работе использовали натуральные (несинтетические) **сорбенты** трех классов: минеральные (вермикулит вспученный, цеолит, каолинит и диатомит), углеродистые (гранулированный активированный уголь – ГАУ) и органические (торф верховой, низинный и Спилсорб), а также их смеси: сорбент АУД (ГАУ + диатомит, 4:1 в/в) и композитные сорбенты: АУТ (ГАУ + торф верховой, 1:1 в/в) и АУДТ (АУД + торф верховой, 1:1 в/в).

2.2. Методы анализа. В почве определяли **суммарную концентрацию углеводородов нефти** методом ИК-спектроскопии (ПНД Ф 16.1:2.2.22-98) в собственной модификации для дополнительной оценки содержания окисленных производных углеводородов в почве - ОУВН (Vasilyeva et al., 2020). **Численность углеводород-окисляющих микроорганизмов** (УОМ) определяли методом высева на минеральную агаризованную среду, а в качестве ростового субстрата использовали пары дизельного топлива (Теппер др., 2004). Определяли также pH_v (Аринушкина, 1970) и дегидрогеназную активность почвы (Хазиев, 2005). В соответствии с Постановлением №144 от 2003 года (СП 2.1.7.1386-03; Терехова, 2011) определяли также **интегральную токсичность почвы** с помощью двух фитотестов: 1) экспресс-метод – по гибели семян клевера белого (*Trifolium repens*) (Vasilyeva et al., 2020a) и 2) по задержке роста корня проростков злаковых сертифицированным методом (ИСО 11269-1). Кроме того, проводили биотестирование почвы по смертности и размножению *Daphnia magna* в водно-почвенном экстракте (ПНД ФТ 14.1:2:3:4.12-06 Т 16.1:2:2.3:3.9-06). В дополнении к этому, в конце 1-го или начале 2-го и 3-го сезонов почвы засевали луговыми травами, которые удаляли через 1-2 месяца и измеряли их показатели роста.

Статистическую обработку результатов выполняли с помощью программ MsEXEL и STATISTICA 10. Средние данные, полученные в каждом опытном варианте с сорбентами, сравнивали с контрольным уровнем (без сорбента) с помощью теста Стьюдента и программы STATISTICA 10. Различия считались значимыми при $p < 0,05$. Все образцы в модельных и микрополевым экспериментах приготавливали в 3-х повторностях.

2.3. Условия проведения экспериментов описаны в (Михедова и др., 2023). **На 1-м этапе** (в условиях вегетационного эксперимента №1) изучали влияние разных доз сорбентов на скорость биоремедиации **глеево-подзолист** почвы,

загрязненной умеренной дозой легкой нефти (7%), а также на интегральную токсичность очищенной почвы. Через 1 сутки после загрязнения нефтью (исходная концентрация УВН – $37,2 \pm 1,8$, а ОУВН – $10,1 \pm 0,4$ г/кг) в почву вносили биопрепарат Микробак и сорбенты: минеральные (каолинит, цеолит, диатомит, вермикулит), углеродистые (ГАУ и АУД) или органические (торф верховой, торф низинный и Спилсорб) в дозах 1, 2 или 5%. Почву инкубировали в условиях оранжереи в течение 14 месяцев, периодически увлажняя дистиллированной водой, не давая ей пересыхать. В самом начале обработки, а также повторно через 3 месяца в почву вносили азофоску (АЗФ) и доломитовую муку (ДМ). В варианты с органическими сорбентами из-за сильного подкисления почвы (до pH_v 5,1–5,4) через 9,2 мес. вносили дополнительное количество ДМ.

В этом и других экспериментах, АЗФ и ДМ вносили дробно, в 2–4 приема, чтобы избежать излишнего подкисления почвы и вымывания биофильных элементов. Суммарная доза внесения АЗФ в этом и других экспериментах рассчитывалась исходя из создания конечного соотношения $C:N:P:K=30:50:1:0,4:0,8$, а доза ДМ рассчитывалась путем периодического контроля pH почвы. В случае сильного подкисления почвы ($pH_v < 6,0$) проводили дополнительное известкование с помощью ДМ.

На 2-м этапе были проведены эксперименты с *подзолом иллювиально-железистым*, в которых изучалось влияние выявленных оптимальных (наиболее эффективных) доз и форм сорбентов и их смесей на снижение токсичности почв и скорость разложения УВН при исходном загрязнении 6 и 12% нефти. Эксперименты с подзолом проводили в микрополевых условиях на экспериментальной площадке Института в сосудах из поливинилхлорида без дна размером $35 \times 35 \times 35$ см³ (площадью 0,1 м²), врытых в почву на глубину 25 см. Микрополевой эксперимент закладывали 1 августа 2020 г. с таким расчетом, чтобы смоделировать почвенно-климатические условия, создающиеся на севере Западной Сибири в период теплого, но короткого вегетационного сезона, длительность наблюдений – 27 месяцев.

Дополнительная информация была также получена в условиях вегетационных экспериментов №2 (6% нефти) и №3 (11 и 13% нефти), заложенных в вегетационных сосудах с поддонами. Почву в сосудах инкубировали в течение 27 мес.: в зимнее время в условиях оранжереи, а с апреля по октябрь – на экспериментальной площадке под дугами, накрытыми укрывным материалом. Почву периодически увлажняли, не давая ей пересыхать.

На 3-м этапе была проведена апробация разработанного метода в полевых условиях на территории ЛПДС «Западный Сургут» компании ООО «Транснефть» с *литостратом песчаным, загрязненным 15% нефти*. Почвенные образцы весом 35 кг каждый помещали в 6 пластиковых емкостей объемом 40 л. Из них 5 образцов поверхностно загрязняли 15% нефти средней плотности, а один использовали в качестве чистого контроля. Через 1 сутки почву перемешивали и вносили композитный сорбент в дозах 10 или 20%, а также биопрепарат «Микробак» (БП) в дозе 2×10^7 кл./г (вместе или отдельно).

Помимо этого, во все загрязненные образцы вносили АЗФ и ДМ. Через 3 мес. почву и засевали смесью луговых трав. В отсутствии растений почву периодически перемешивали и отбирали образцы на анализ. Химические и биологические анализы почвы выполняли в лаборатории ИФХиБПП РАН, а в течение первого сезона почву параллельно анализировали в химической лаборатории компании ООО «Транснефть» на территории ЛПДС. Наряду с химическими анализами оценивали интегральную токсичность почв сертифицированными методами, а также определяли численность УОМ в почве. Из-за невозможности продолжать эксперимент в полевых условиях с октября 2020 г. исследования были продолжены в лаборатории (всего до 24 мес.) с образцами, отобранными из сосудов в конце 1-го сезона, и доставленными в лабораторию.

Глава 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Этап 1. На основании *вегетационного эксперимента №1* был сделан вывод о том, что практически все исследуемые сорбенты оказывают положительное влияние на скорость биоремедиации *глеево-подзолистой почвы*, но только в первые 4 месяца обработки. Однако, через 14 мес. концентрация УВН во всех почвах снизилась с $37,2 \pm 1,8$, до 4-8 г/кг, а разница между большинством образцов стала статистически ($p < 0,05$) незначимой. Тем не менее, до конца наблюдений контрольная глеево-подзолистая почва проявляла высокую фитотоксичность (в пределах 64-81%), тогда как в вариантах с добавкой сорбентов фитотоксичность почв резко снизилась, особенно в почве с максимальной дозой (5%) ГАУ, АУД и органических сорбентов (рис. 1).

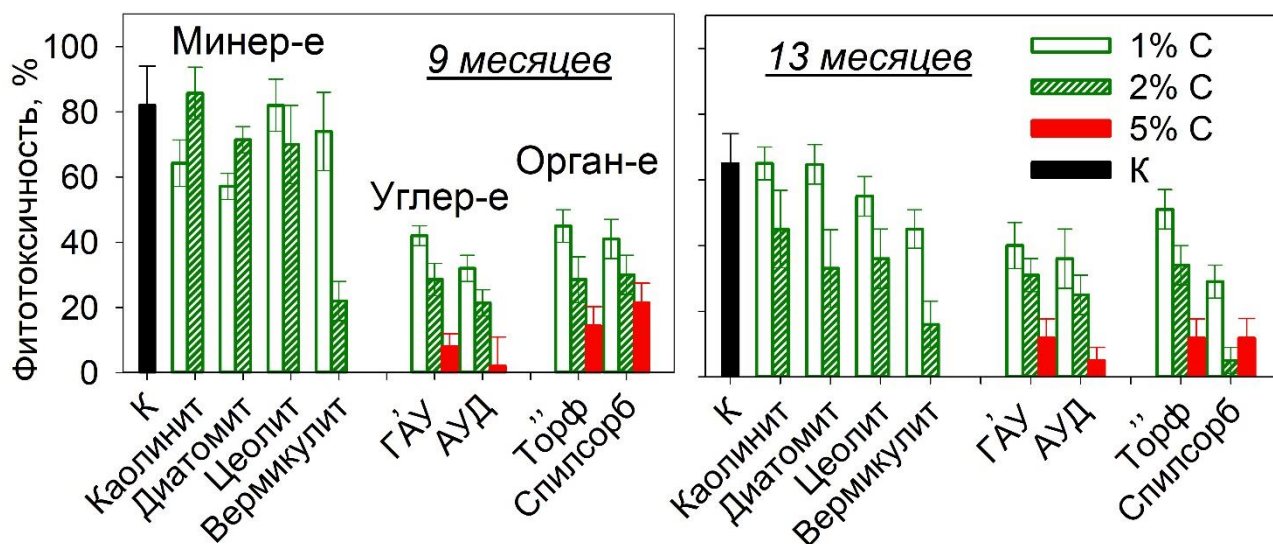


Рис. 1. Влияние трех доз минеральных, органических и углеродистых сорбентов (1, 2 и 5%), в комбинации с биопрепаратом Микробак на фитотоксичность почвы, определенную по длине корней проростков пшеницы (*Triticum vulgaris*), посеянной через 9 и 13 мес. после начала биоремедиации глеево-подзолистой почвы, искусственно загрязненной 7% нефти.

Хотя в присутствии органических сорбентов фитотоксичность почв также снижалась, однако в некоторые периоды из-за понижения pH почвы их

фитотоксичность сильно колебалась, что потребовало дополнительного известкования.

Учитывая изменение всех свойств почвы, был сделан вывод о том, что для глеево-подзолистой почвы, умеренно загрязненной нефтью, наилучшим сорбентом для ускорения биоремедиации является смешанный сорбент АУД. Его внесение в почву в соотношении $(0,4 \div 1):1$ к суммарному содержанию нефтяных загрязнителей (УВН+ОУВН) создает благоприятные условия для активации инокулированных микроорганизмов-нефтедеструкторов (Михедова и др., 2023).

Этап 2. На рис. 2 и 3 показаны основные результаты микрополевого эксперимента с подзолом иллювиально-железистым. На рис. 2 сравниваются динамики изменения характеристик почв, умеренно загрязненных нефтью (**Серия 1**), обрабатываемых классическим методом биоремедиации без сорбентов (контроль **K1**) и в присутствии 2-х доз (5 или 10%) наилучшего сорбента АУД, а также динамики характеристик сильно загрязненной почвы (**Серия 2**): контрольной **K2** и с добавкой 20% композитного сорбента АУДТ.

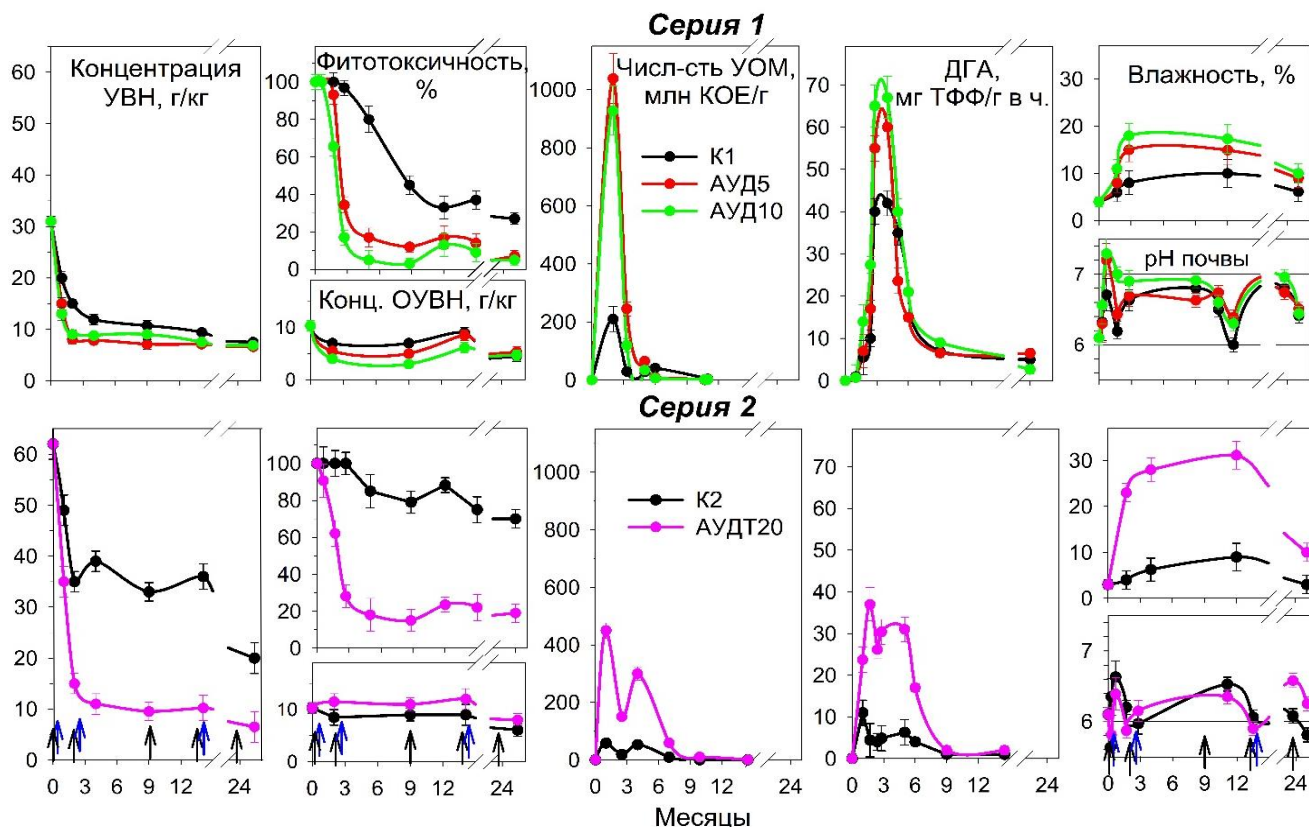


Рис. 2. Влияние смешанного сорбента АУД (в дозах 5 и 10%) на характеристики подзола иллювиально-железистого, загрязненного 6% нефти (**Серия 1**), а также композитного сорбента АУДТ (в дозе 20%) на характеристики подзола, загрязненного 12% нефти (**Серия 2**) в микрополевым эксперименте.

В микрополевом эксперименте с подзолом иллювиально-железистым, умеренно загрязненным нефтью (6%) (**Серия 1**), получены результаты, сходные с результатами вегетационного эксперимента №1 с глеево-подзолистой почвой. Несмотря на значительное снижение содержания УВН во всех обрабатываемых вариантах в конце 1-го и 2-го сезонов (до 8-10 и 5,5-7,0 г/кг, соответственно), контрольные загрязненные почвы проявляли повышенную фито- и биотоксичность вплоть до конца 3-го сезона (Рис. 3).

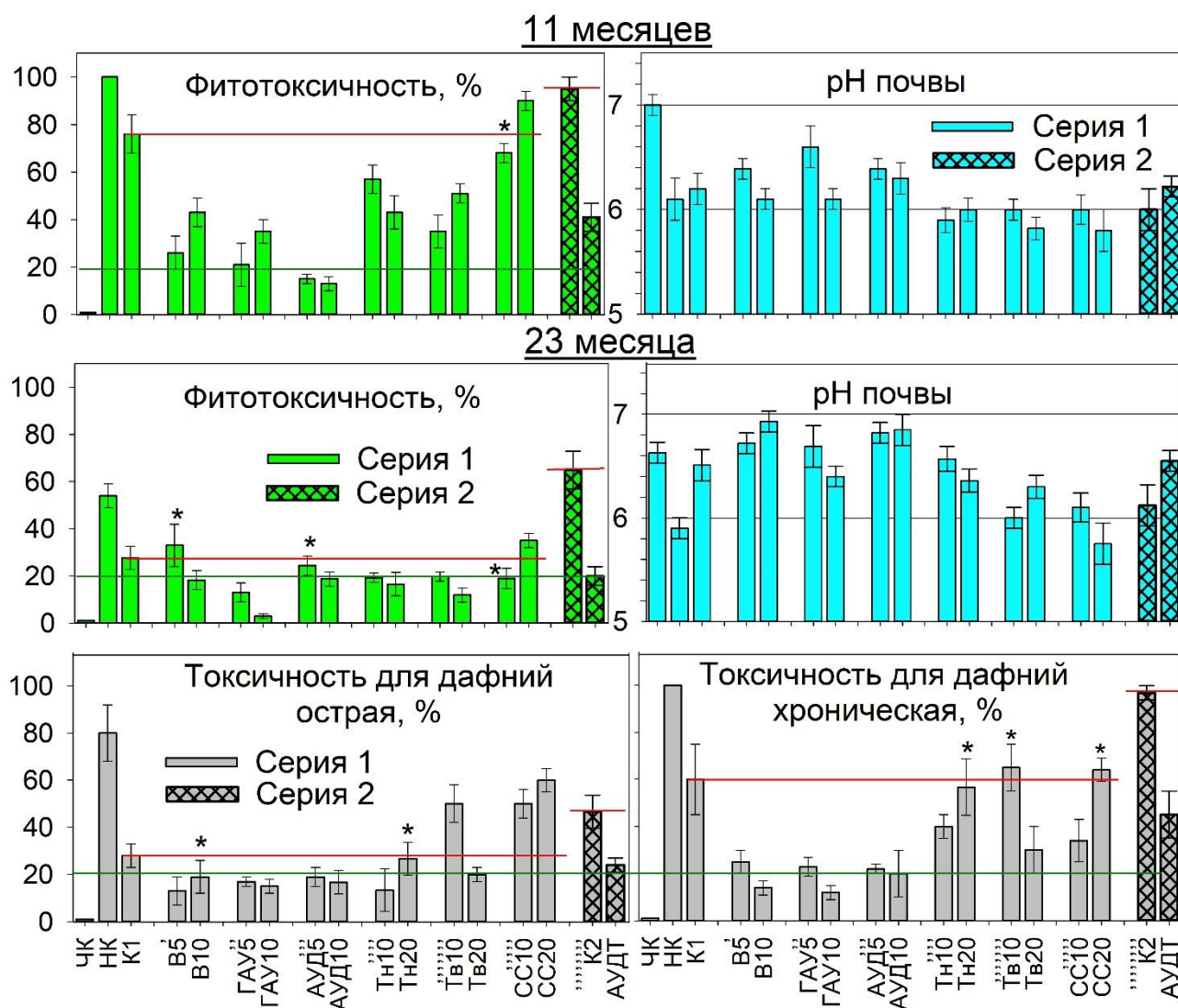


Рис. 3. Влияние двух доз сорбентов на pH_v почвы и интегральную токсичность подзола иллювиально-железистого, загрязненного 6 и 12% нефти, через 11 и 23 мес. обработки методом сорбционной биоремедиации в условиях микрополевого эксперимента. Интегральную токсичность определяли по фитотоксичности почв, оцениваемой по длине корней проростков пшеницы (*Triticum vulgaris*), а также по биотоксичности в остром и хроническом биотесте с *Daphnia magna*. Звездочками отмечены варианты, в которых разница между опытной и контрольной почвами была недостоверной ($p < 0,05$).

Особенно высокая токсичность была продемонстрирована при определении смертности и, еще более, плодовитости гидробионтов *Daphnia magna* в водно-почвенной вытяжке. В то же время проведение сорбционной биоремедиации на фоне внесения вермикулита и углеродистых сорбентов (особенно АУД) в дозах 5 и 10% обеспечило снижение фито- и биотоксичности почвы до минимума уже к концу 1-го или 2-го сезонов в зависимости от теста (Рис. 3). Органические сорбенты были менее эффективны, так как их внесение сопровождалось значительным подкислением почвы до уровня ниже критического ($\text{pH} < 6,0$), что объясняется накоплением органических кислот при разложении торфа верхового и Спилсорба. Хотя кислотность почвы можно регулировать путем известкования, однако для этого необходимо регулярно контролировать pH почвы, что осложняет процесс обработки (Михедова и др., 2022; Mikhedova, Uzorina, 2021).

В вариантах с сильно загрязненной почвой (12% нефти) (**Серия 2**), проявляющей еще более высокую фито- и биотоксичность в ходе ее биоремедиации, внесение композитного сорбента АУДТ в дозе 20% резко ускорило разложение углеводородов нефти по сравнению с контролем (Рис. 2). Даже в 3-м сезоне остаточные концентрации УВН в варианте с АУДТ были значительно ниже, чем в контроле **K2**: $7,2 \pm 1,1$ и $10,2 \pm 0,9$ г/кг соответственно. Кроме того, в этом варианте наблюдалось быстрое снижение фитотоксичности, а также повышение численности микроорганизмов-нефтедеструкторов и дегидрогеназной активности. В ходе всего эксперимента с АУДТ наблюдалась более высокая полевая влажность почвы, чем в контроле **K2**, а pH_v почвы оставался в основном в пределах от 6,0 до 6,8.

Проведение дополнительных вегетационных экспериментов №2 и №3 с этой же почвой, умеренно и сильно загрязненной нефтью (от 6 до 13%) (Рис. 4),

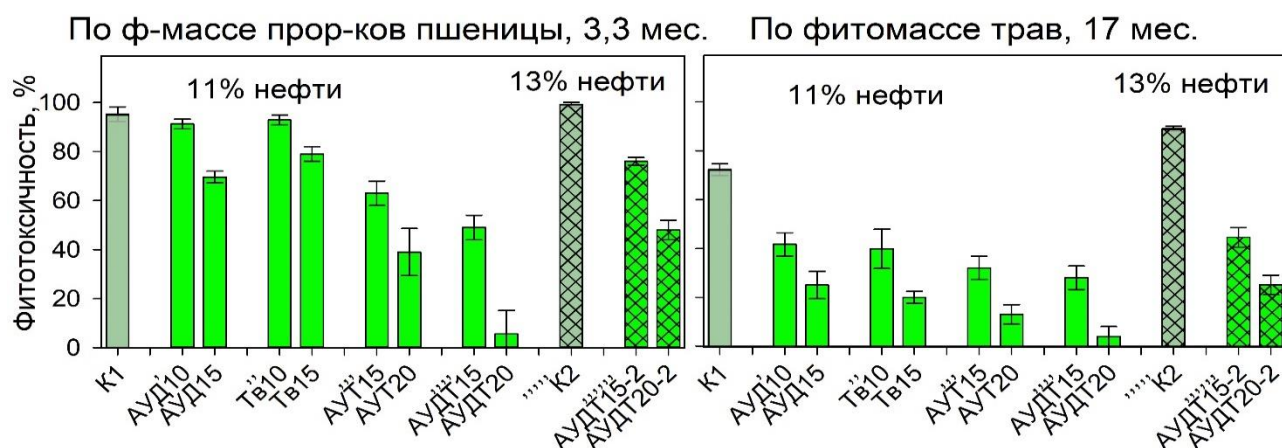


Рис. 4. Влияние двух доз (10 и 15%) АУД и торфа верхового, а также двух доз (15 и 20%) композитных сорбентов АУТ и АУДТ на фитотоксичность подзола, загрязненного нефтью в дозе 11 и 13% (Н1 и Н2 соответственно), оцененной по фитомассе 2-х-недельных проростков пшеницы (*Triticum vulgaris*), посеянной через 3,3 мес., и по фитомассе 1-месячных трав, посеянных через 17 мес. после начала вегетационного эксперимента №3.

позволило уточнить оптимальный состав композитного сорбента и дозы их внесения. Подтверждено усиление эффекта от внесения сорбентов с увеличением уровня загрязнения почвы, а также доказана более высокая эффективность композитного сорбента АУДТ по сравнению с другими сорбентами и смесями.

Таким образом, доказано, что совместное присутствие торфа верхового и ГАУ в составе композитного сорбента АУДТ позволяет поддерживать оптимальную влажность почвы в течение всего периода обработки, а также снижает вероятность подкисления почвы за счет присутствия в ГАУ зольных элементов Са и Mg, а в присутствии добавок диатомита повышается устойчивость растений к дефициту влаги (Михедова и др., 2020; 2021; 2022; 2023; Mikhedova, Uzorina, 2021).

Этап 3. На последнем этапе была проведена *апробация разработанного метода* на территории ЛПДС «Западный Сургут» *в условиях полевого эксперимента с литостратом песчаным, загрязненным 15% нефти.* На рисунке 5 показан процесс закладки полевого эксперимента 10 июня 2021 г., а также вид сосудов сразу после внесения всех компонентов (биопрепарат и сорбент в дозах 10 и 20%, отдельно и вместе) в загрязненную почву, и в конце сентября 2021 г. (т.е. примерно через месяц после посева луговых трав). Из-за

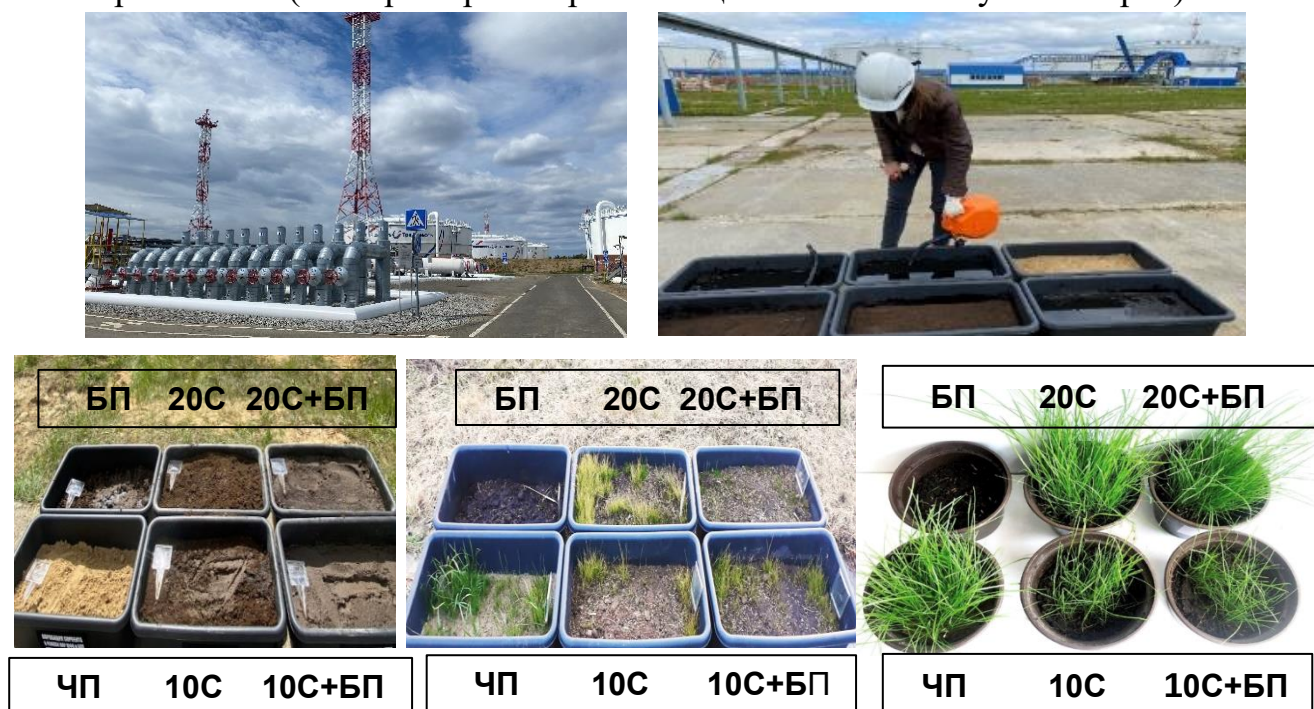


Рис. 5. Закладка и проведение эксперимента по апробации метода сорбционной биоремедиации минеральных почв в полевых условиях на экспериментальной площадке ЛПДС «Западной Сургут» (компании «Транснефть») с литостратом песчаным, загрязненным 15% нефти. Показан вид экспериментальных сосудов в начале эксперимента (10.06.2021), через месяц после посева луговых трав (30.09.2021 г.), а также вид вегетационных сосудов при продолжении эксперимента в лабораторных условиях, через 1 мес. после посева луговых трав (10.06.2022), т.е. всего через 12 мес. после начала обработки.

резкого похолодания и наступивших морозов взошедшие травы частично погибли, тем не менее, четко видны их всходы в вариантах с добавками сорбентов, тогда как в контроле с одним биопрепаратом семена погибли. Аналогичная тенденция сохранилась и при проведении фитотестирования через 12 мес. после начала эксперимента с почвенными образцами в ходе последующего эксперимента в вегетационных сосудах, фотография которых приведена на том же рисунке.

На рис. 6 сравниваются динамики изменения содержания УВН и ОУВН в литострате песчаном, а также показатели pH почвы, ее фитотоксичности и численности УОМ. Результаты эксперимента показали, что внесение 10% и, особенно, 20% композитного сорбента значительно ускорило разложение УВН в почве. При этом поддерживался pH_в от 6,0 до 6,8. В то же время в контрольной почве численность УОМ была низкой, а фитотоксичность почти максимальной.

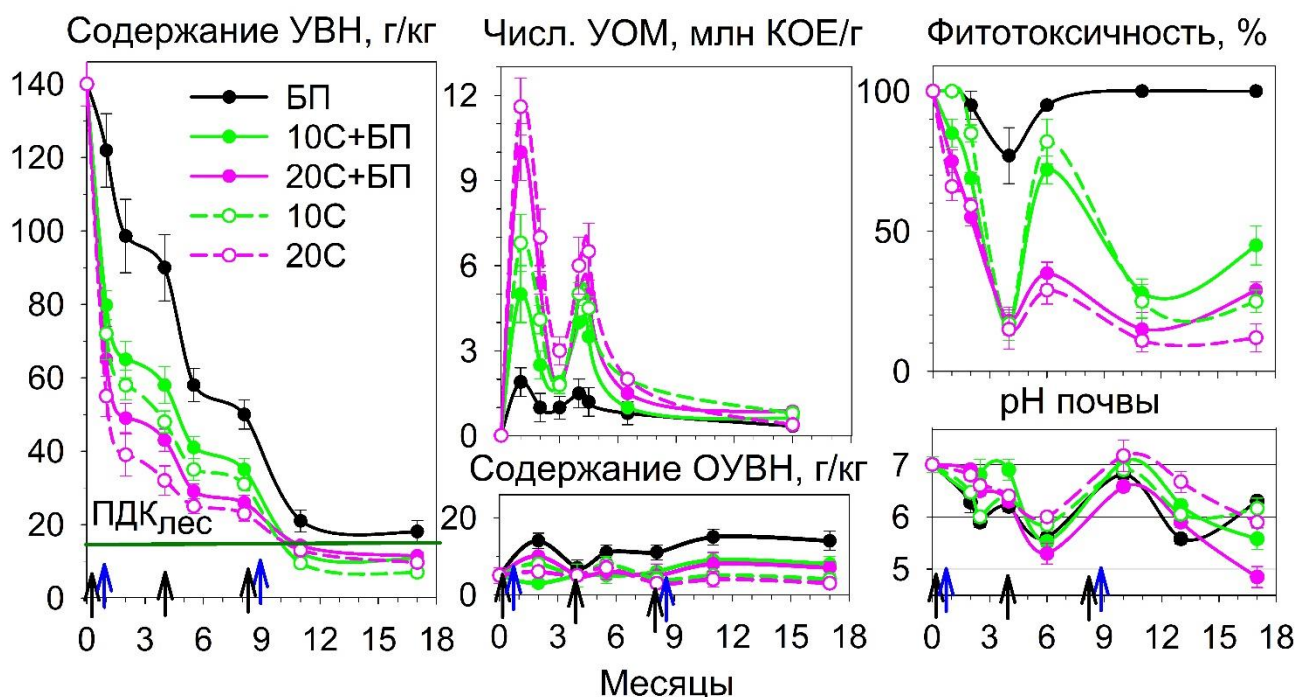


Рис. 6. Влияние биопрепарата «Микробак» и двух доз композитного сорбента АУДТ (далее С), внесенных раздельно (соответственно БП, 10С и 20С) и в комбинации (10С+БП и 20С+БП), на динамику изменения содержания УВН и ОУВН в литострате песчаном, а также численности углеводород-окисляющих микроорганизмов, pH_в почвы и ее фитотоксичности, оцененной по всхожести клевера белого (*Trifolium repens*), в ходе эксперимента на территории ЛПДС «Западный Сургут».

Через 11 мес. концентрация УВН в образцах с сорбентами (как в комбинации с биопрепаратом, так и без него) снизилась до уровня от 8,5 до 14,3, т.е. опустилась ниже регионального ПДК (15 г/кг), установленного в ХМАО для рекультивированных минеральных и смешанных почв лесохозяйственного назначения (Постановление правительства, 2004). Разложение УВН в вариантах с сорбентами сопровождалось меньшим накоплением токсичных

метаболитов нефти (ОУВН), повышенным ростом численности УОМ и резким снижением фитотоксичности почв. При этом в наилучшем варианте с 20% С поддерживался pH_v от 6,0 до 6,8. В то же время в контрольной почве с одним биопрепаратом (БП) численность УОМ была низкой, а фитотоксичность почти максимальной.

В последующие 6 месяцев суммарная концентрация УВН в почвах изменялась незначительно. Причем, их содержание в контроле с одним биопрепаратом (БП) оставалось выше, а в присутствии сорбентов – ниже ПДК.

В вариантах с индивидуальным внесением обеих доз сорбентов наблюдалась тенденция более ускоренного разложения УВН по сравнению с соответствующими образцами при комбинированном внесении сорбента и БП, хотя в большинстве сроков (особенно к концу эксперимента) разница между вариантами для каждой дозы сорбента была недостоверной.

К этому времени интегральная токсичность почвы (Рис. 7) с добавками 20% композитного сорбента снизилась до минимума, о чем свидетельствует хороший рост трав, высеванных в эту почву, а также низкий уровень биотоксичности водно-почвенных экстрактов по отношению к гидробионтам *Daphnia magna*.

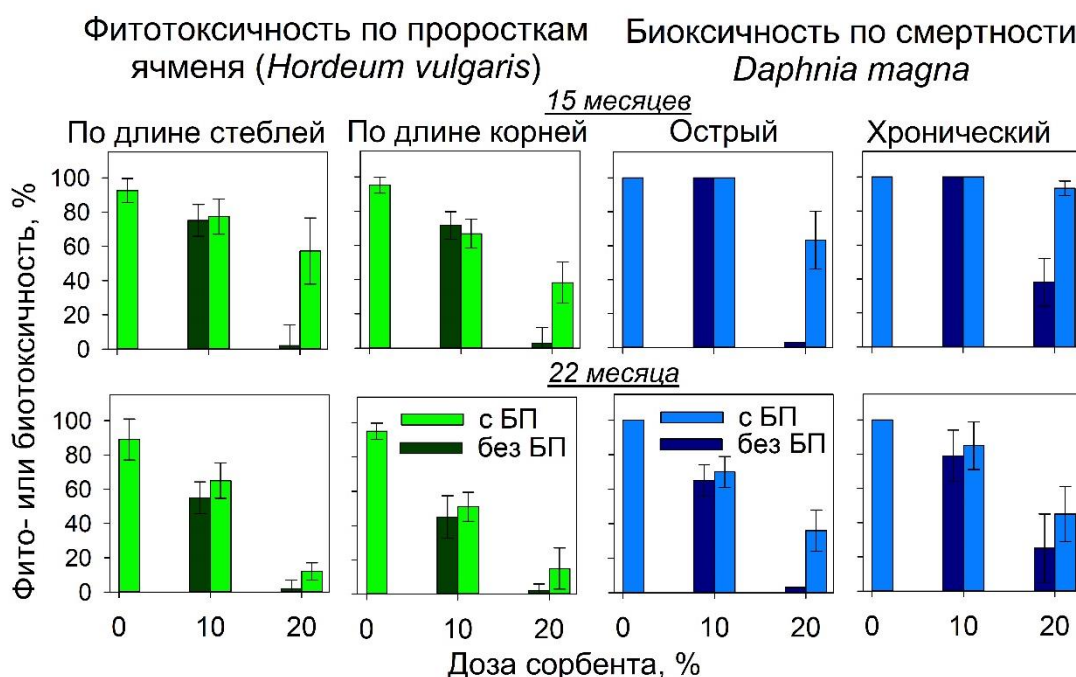


Рис. 7. Влияние биопрепарата (БП) и двух доз композитного сорбента АУДТ (10 и 20%С), внесенных раздельно (без БП) и в комбинации с БП, на фитотоксичность литострата песчаного, загрязненного 15% нефти, оцененную по длине стебля и корня проростков ячменя (*Hordeum vulgare*) и ее биотоксичность, оцененную по смертности *Daphnia magna* в остром и хроническом опыте, через 15 и 22 мес. обработки.

В результате был составлен «Акт выполненных работ по апробации инновационного метода» за подписью главного инженера Сургутского УМН АО

«Транснефть-Сибирь» Е.А. Чайкина и директора ИФХиБПП РАН, чл.-корр. РАН А.О. Алексеева, подтверждающий эффективность разработанного метода очистки уже в течение первого сезона (см. Приложение 1.1, 1.2).

Определение интегральной токсичности литострата показало, что даже через 22 мес. инкубирования в контроле БП наблюдалось сильное ингибирование растений и полная гибель дафний в водно-почвенных экстрактах, тогда как в варианте 20С оба эти показателя снизились до минимума (от 2 до 20%), хотя в варианте 20С+БП они еще варьировали в пределах 35–42% (Михедова и др., 2022; 2023; Пинский, Михедова и др., 2023).

Глава 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таким образом, в ходе 3-х-летнего микрополевого и трех длительных вегетационных экспериментов с двумя типами минеральных почв был разработан экологичный метод сорбционной биоремедиации для очистки минеральных почв Западной Сибири, умеренно и сильно загрязненных нефтью (от 5 до 13%), который получил подтверждение в полевом эксперименте при апробации метода на литострате песчаном, загрязненном 15% нефти (Михедова и др., 2020; 2021; 2022; 2023).

Ранее этот подход показал свою эффективность на суглинистой серой лесной почве (Зиннатшина, 2019). Однако в данных исследованиях было установлено, что для очистки умеренно загрязненных (<5% нефти) малогумусированных минеральных почв требуется внесение повышенных доз смешанного сорбента АУД (смесь ГАУ и диатомита), а для сильно загрязненных минеральных почв (10–15% нефти) необходимо использование композитного сорбента АУДТ (смесь торфа верхового, ГАУ и диатомита). Установлено, что механизм действия композитного сорбента связан со следующими процессами: 1 – временное снижение доступности наиболее токсичных компонентов нефти и их метаболитов за счет преимущественно обратимой сорбции токсикантов; 2 – поддержание оптимальной влажности почвы; 3 – поддержание кислотности почвы в оптимальном интервале; 4 – повышение устойчивости растений к стрессу.

Имеются работы, указывающие на положительное влияние активированного угля, биочаров, торфа, вермикулита и других минеральных сорбентов на водно-физические свойства фоновых почв сельскохозяйственного назначения (Al-Wabel et al., 2017), а также нефтезагрязненных почв (Vasilyeva et al., 2020). Влияние высокопористых сорбентов (в особенности ГАУ) объясняется их высокой поглотительной способностью по отношению к органическим поллютантам. Другие механизмы участвуют при взаимодействии нефтезагрязненных почв с такими минеральными сорбентами, как каолинит. Этот минерал может образовывать желеобразную массу с молекулами нефти за счет внедрения молекул углеводов между ультратонкими частицами (менее нескольких μm) каолинита. Это способствует снижению гидрофобности и повышению влагоемкости нефтезагрязненных почв (Vasilyeva, Mikhedova et al., 2022). Вывод о положительной роли диатомита согласуется с данными,

показавшими более высокую эффективность внесения АУД по сравнению с ГАУ при биоремедиации 3-х типов нефтезагрязненных почв (Kondrashina et al., 2018). Роль диатомита объясняется его свойством выделять кремниевые кислоты, повышающие устойчивость растений к дефициту влаги (Crooks, Prentice, 2017).

В ходе наших исследований выявилась тенденция большей эффективности метода при внесении одного сорбента по сравнению с его внесением вместе с биопрепаратом, особенно на первых этапах очистки нефтезагрязненного литострата песчаного. С одной стороны, в исходном литострате песчаном было обнаружено присутствие аборигенных УОМ – на уровне тысяч КОЕ/г, что объясняет способность сорбентов ускорять процесс разложения УВН за счет активации аборигенных микроорганизмов-нефтедеструкторов. Меньшую скорость разложения УВН в вариантах с внесением АУДТ в комбинации с биопрепаратом предположительно можно объяснить повышенной способностью инокулированных микроорганизмов выделять биосурфактанты (которые повышают биодоступность не только тяжелых фракций углеводов, но и токсичных продуктов их микробного разложения), а также ускоренным накоплением токсичных метаболитов из-за повышенной способности инокулируемых микроорганизмов разлагать углеводороды нефти. Возможно, этот эффект наиболее ярко выражен при очистке малогумусированных минеральных почв, что указывает на необходимость специального подбора микробных штаммов для таких биопрепаратов.

ВЫВОДЫ

1. При биоремедиации минеральных почв Западной Сибири, умеренно и сильно загрязненных нефтью (5–15_{вес.}%), несмотря на значительное снижение остаточных концентраций углеводов до уровней, близких к ОДК/ПДК, почвы проявляют повышенную фито- и биотоксичность из-за накопления подвижных и токсичных промежуточных продуктов микробного окисления углеводов, а также низкой буферности малогумусированных супесчаных почв.
2. В экспериментах с двумя типами минеральных почв Западной Сибири (глеево-подзолистая и подзол иллювиально-железистый), загрязненных умеренными и высокими дозами сырой нефти (от 5 до 13%), доказана эффективность применения метода сорбционной биоремедиации, основанного на дополнительном внесении композитного сорбента, состоящего из смеси торфа верхового, гранулированного активированного угля и диатомита.
3. Механизм положительного действия разработанного композитного сорбента основан на его способности снижать токсичность нефтезагрязненных почв за счет сорбции токсичных компонентов нефти и продуктов их микробного окисления; поддерживать оптимальную полевую влажность и кислотность почв в ходе всего периода обработки, а также повышать устойчивость растений на стадии доочистки методом фиторемедиации.
4. Апробация разработанного метода в полевых условиях вблизи Самотлорского нефтяного месторождения, на литострате песчаном, сильно

загрязненном сырой нефтью (15_{масс.}%), подтвердила высокую эффективность применения метода в условиях *in situ* для ликвидации аварийных нефтеразливов на поверхности минеральных почв Западной Сибири.

5. Дано научное обоснование применения природоподобной технологии сорбционной биоремедиации *in situ* для ликвидации последствий нефтеразливов на поверхности минеральных почв Западной Сибири. Показано, что применение этого метода с использованием разработанного композитного сорбента в дозах (0,4÷1,5):1 по отношению к исходному уровню нефтяных загрязнителей (от 5 до 15%) позволяет снизить концентрацию углеводородов в почве до допустимого уровня в течение одного-трех вегетационных сезонов и одновременно обеспечить снижение токсичности почвы до минимума.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Всего по теме диссертации опубликовано 20 научных работ, включая 2 статьи в журналах, входящих в базы данных Scopus и/или Web of Science.

1. Mikhedova, E. Ecological aspects of sorbents use to improve the efficiency of bioremediation on oil-contaminated lands / Elizaveta Mikhedova, Uzorina Maria // Fuentes el Reventon Energetico. – 2021. – Vol. 19, No 1. – P. 65-73. – DOI 10.18273/revfue.v19n1-2021006.
2. Use of natural sorbents for accelerated bioremediation of grey forest soil contaminated with crude oil / G. Vasilyeva, E. Mikhedova, L. Zinnatshina, E. Strijakova, L. Akhmetov, S. Sushkova, J.-J. Ortega-Calvo // Science of The Total Environment. – 2022 – V. 805. – № 157952. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157952 (Q1).

Статьи, опубликованные в журналах, входящих в Перечни рецензируемых научных изданий

3. Михедова, Е. Е. Применение биопрепаратов в задачах рекультивации нефтезагрязнений почвенного покрова / Е. Е. Михедова, Т. Н. Абашина // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2020. – № 4(295). – С. 10-14. – DOI 10.33285/2411-7013-2020-4(295)-10-14.

В других печатных изданиях - сборниках материалов конференций:

4. Михедова, Е. Е. Влияние природных адсорбентов на скорость биоремедиации и свойства нефтезагрязненных почв / Е. Е. Михедова // Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть, энергетика) : XIII Всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов, 22-25 октября 2019 г. : тезисы докладов. – Москва, 2019. – С. 594-595

5. Сорбционная биоремедиация нефтезагрязненных почв в разных почвенно-климатических условиях Российской Федерации / Васильева Г. К., Михедова Е. Е., Стрижакова Е. Р., Филонов А. Е., Ахметов Л. // VII Пущинская конференция "Биохимия, физиология и биосферная роль микроорганизмов". Школа-конференция для молодых ученых, аспирантов и студентов "Генетические технологии в микробиологии и микробное разнообразие", 6-9 декабря 2021 г. : сборник тезисов конференции. – Пущино ; Москва : ГЕОС, 2021. – С. 21-23.
6. Михедова, Е. Е. Использование натуральных сорбентов для повышения эффективности биорекультивации нефтезагрязненных почв Северных территорий РФ / Е. Е. Михедова // Актуальные проблемы недропользования : XIX Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов, 12-16 апреля 2021 года : [в 6 т.] Т. 6 / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский горный университет ; редакционная коллегия: В. Т. Борзенков (председатель) [и др.]. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С. 142-143
7. Михедова, Е. Е. Разработка экологичного метода сорбционной биоремедиации для рекультивации нефтезагрязненных песчаных почв Западной Сибири / Е. Е. Михедова, М. И. Узорина // Нефтепромысловая химия : материалы VIII Международной (XVI Всероссийской) научно-практической конференции., 24 июня 2021 года. – Москва : РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2021. – С. 215-216
8. Mikhedova, E. Use of sorbents of different classes for accelerated bioremediation of oil-contaminated mineral soils in Western Siberia / E. Mikhedova // Oil and Gas Horizons : Abstract Book of the XIII International Youth Scientific and Practical Congress, 16-19 November 2021. – Moscow, 2021. – С. 179-180
9. Применение натуральных сорбентов для восстановления нефтезагрязненных почвенных экосистем Западной Сибири / Е. Е. Михедова, Г. К. Васильева, Е. Р. Стрижакова, М. А. Калинин // Мониторинг, охрана и восстановление почвенных экосистем в условиях антропогенной нагрузки : материалы Международной молодежной научной школы, Ростов-на-Дону, 27-30 сентября 2022 г. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2022. – С. 575-581
10. Загрязнение почв тяжелыми металлами и органическими поллютантами: проблемы и пути их решения / Д. Л. Пинский, Г. К. Васильева, В. Н. Башкин, Е. Е. Михедова // Безопасный Север - чистая Арктика : материалы V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, [Сургут, 13-14 апреля 2023 г.]. – Сургут : СурГУ, 2023. – С. 19-23

Список сокращений

АЗФ – азофоска
АУД – смешанный сорбент на основе ГАУ и диатомита (4:1)
АУДТ – композитный сорбент на основе АУД и торфа (1:1)
АУТ – композитный сорбент на основе ГАУ и торфа (1:1)
БП – биопрепарат
ГАУ – гранулированный активированный уголь
ДМ – доломитовая мука
КОЕ – колоние-образующие единицы
ЛПДС – линейная производственно-диспетчерская станция
ОДК – ориентировочно допустимая концентрация
ОУВН – окисленные производные углеводородов нефти
ПДК – предельная допустимая концентрация
УВН – углеводороды нефти
УНГКМ – Уренгойское нефтегазоконденсатное месторождение
УОМ – углеводород-окисляющие микроорганизмы