

На правах рукописи

Усманов Альберт Исмагилович



**БИОРЕМЕДИАЦИЯ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ НАЗЕМНЫХ
ЭКОСИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПОЗИЦИИ
ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ МЕЛИОРАНТОВ**

Специальность 1.6.21. Геоэкология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель:

кандидат технических наук

Антонинова Наталья Юрьевна

Официальные оппоненты:

Семячков Александр Иванович

доктор геолого-минералогических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук, центр природопользования и геоэкологии Института экономики УрО РАН, руководитель;

Максимович Николай Георгиевич

кандидат геолого-минералогических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет», естественнонаучный институт, заместитель директора по научной работе.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь.

Защита диссертации состоится **28 января 2026 г. в 13:00** на заседании диссертационного совета ГУ.7 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 28 ноября 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

диссертационного совета



АФАНАСЬЕВ

Павел Игоревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Россия занимает лидирующее положение в мире по добыче и экспорту углеводородных ресурсов в том числе благодаря одной из самых разветвленных и крупных сетей нефтепроводов в мире, общей протяженностью ≈ 55 тыс.км. Однако в процессе добычи и транспортировки по нефтепроводам происходят внештатные ситуации, связанные с их прорывами, причиной которых как правило является коррозия ($>90\%$), в результате большие площади земельных ресурсов оказываются выведенными из хозяйственного оборота.

Загрязнение нефтью и нефтепродуктами негативно сказывается на состоянии наземных экосистем, вызывая изменения физико-химических свойств и структуры всех природных компонентов. Трансформация почвенного горизонта ведет к обеднению питательного субстрата для растений, препятствуя доступу влаги и нормальному обмену веществ. Кроме того, нефть в виду своего токсичного состава угнетает естественную микрофлору и фауну.

В мировой практике опробовано множество способов рекультивации нефтезагрязненных земель, в том числе биоремедиация с использованием штаммов микроорганизмов нефтедеструкторов, их эффективность подтверждена при невысокой степени загрязнения (до 10 г/кг), а также сорбционная очистка почв - применяется для связывания углеводородов нефти (УН) с твердых поверхностей с последующей утилизацией сорбентов. В последнее время наибольший интерес представляют исследования, направленные на разработку мероприятий по биоремедиации с использованием композиции мелиорантов в сочетании с азотофиксирующими растениями, за счет высокого потенциала к восстановлению наземных экосистем при значительной степени загрязнения и сравнительно низкой стоимости.

Учитывая токсичность УН поиск и изучение новых мелиорантов, способных за вегетационный период (≈ 3 мес) восстановить характеристики нефтезагрязненных наземных экосистем за счет снижения фитотоксичности, увеличения pH и

создания аэробных условий для деструкции нефти, является актуальной природоохранной задачей.

Степень разработанности темы исследования

Множество российских и зарубежных исследований посвящены миграции УН по почвенному профилю (Стародубова Н.Ю., Московченко Д.В., Сафаров А.М., Гаврилин И.И., Шигапов А.М. и др.), активизации процессов нефтедеструкции с использованием органоминеральных мелиорантов (Глазковская М.А., Абрамец А.М., Балыкин В.И., Искандаров Р.М., Комарницкий Н.В., Мосейков В.А., Сорокин В.А., Ягафарова Г.Г., Сивков Ю.В., Гревцев Н.В., Якупов Д.Р., Чертес К.Л., Исмаилов Н.М., Пиковский Ю.И. и др.), разработке адсорбентов для сбора УН с твердых поверхностей и водоемов (Томсон А.Э., Липский В.К., Журавлев В.Н., Соколова Т.В., Липская Т.И., Пехтерева В.С., Мещеряков С.В., Еремин И.С., Сидоренко Д.О. и др.). В работах имеется значительный фактический материал по рекультивации нефтезагрязненных земель, достаточно изучены вопросы трансформации нефти в грунте и негативного её влияние на биологические процессы в окружающей природной среде.

Анализ работ вышеперечисленных авторов определил направление будущих исследований, поскольку выявление закономерностей и обоснование параметров нефтедеструкции в нефтезагрязненных наземных экосистемах за счет использования композиции органоминеральных мелиорантов основу которых составляют общераспространенные полезные ископаемые раскрывает ключевые пути снижения влияния нефтедобычи на окружающую среду.

Объектом исследования являются нефтезагрязненные наземные экосистемы.

Предмет исследования – закономерности нефтедеструкции в наземных экосистемах.

Цель работы – научное обоснование процессов нефтедеструкции с использованием композиции органоминеральных мелиорантов для биоремедиации нефтезагрязненных наземных экосистем.

Идея работы. Использование мелиорантов из торфяного, сапропелевого и диатомитового сырья способствует восстановлению агрохимических показателей и нефтедеструкции нефтезагрязненных наземных экосистем.

Задачи исследования

Достижение поставленной в работе цели достигается решением следующих задач:

1. Анализ существующих технологий биоремедиации и нормативных уровней допустимого остаточного содержания нефти и продуктов ее трансформации в почвах регионов РФ.

2. Исследование физико-химических факторов техногенной трансформации нефтезагрязненных наземных экосистем.

3. Выявление закономерности мелиоративного влияния сапропеля и диатомита на незагрязненные наземные экосистемы.

4. Обоснование оптимального соотношения композиции торфяного, сапропелевого и диатомитового сырья составляющих основу торфо-диатомитового мелиоранта (ТДМ) для восстановления агрохимических свойств, снижения фитотоксичности и ускорения процессов нефтедеструкции.

5. Разработка рекомендаций по биоремедиации нефтезагрязненных наземных экосистем с применением ТДМ.

Научная новизна

Установлена зависимость эффективности нефтедеструкции в нефтезагрязненных наземных экосистемах от внесения ТДМ при следующей композиции органоминеральных мелиорантов в процентах по массе воздушно сухого вещества: торф – 51,5 – 53,5; сапропель – 31,0 – 33,5; диатомит – 15,0 – 15,5 и нормы его внесения от 3 до 5 т/га.

Определены диапазоны параметров процесса нефтедеструкции и снижения фитотоксичности, позволяющие восстанавливать агрохимические свойства нефтезагрязненных наземных экосистем на 80-95 % за вегетационный период при начальной концентрации нефти от 100 до 170 г/кг.

Соответствие паспорту специальности

Содержание диссертации соответствует п.17. паспорта научной специальности 1.6.21. – «Геоэкология» (технические науки).

17. Ресурсосбережение, санация и рекультивация земель, утилизация отходов производства и потребления, в том числе возникающих в результате добычи, обогащения и переработки полезных ископаемых, строительной, хозяйственной деятельности и эксплуатации ЖКХ. Геоэкологическое обоснование безопасного размещения, хранения и захоронения токсичных, радиоактивных и других отходов.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Научно обосновано влияние процентного соотношения композиции органоминеральных компонентов составляющих основу ТДМ на процесс нефтеструкции в нефтезагрязненных наземных экосистемах.

2. Аналитическая информация о ходе проведения экспериментальных исследований и качественных показателях наземных экосистем зарегистрированы в Роспатенте как базы данных: № 2023623956 РФ «База экспериментальных данных оценки фитотоксичности нефтезагрязненных почв рекультивируемых торфо-диатомитовым мелиорантом (ТДМ)»: № 2023623558: заявл. 27.10.2023: опубл. 14.11.2023, № 2022622448 РФ «Динамика химических элементов в нефтезагрязненных объектах окружающей среды при внесении Торфо-диатомитового мелиоранта (ТДМ) в целях рекультивации (2021 год)»: № 2022622371: заявл. 03.10.2022: опубл. 10.10.2022.

3. Разработан и апробирован способ очистки нефтезагрязненных наземных экосистем с использованием композиции ТДМ, обеспечивающий биоремедиацию наземной экосистемы (снижение фитотоксичности, нейтрализации pH среды и создание аэробных условий для нефтеструкции).

4. По результатам биотестирования проведена оценка фитотоксичности нефтезагрязненных наземных экосистем с применением тест-культуры овса посевного (*Avena sativa* L.).

5. Разработан комплекс рекомендаций по биоремедиации нефтезагрязненных наземных экосистем, обеспечивающий запуск процессов восстановления агрохимических показателей и нефтеструкции на территории разлива нефтепродуктов до уровня

допустимого остаточного содержания нефти и продуктов ее трансформации в почвах.

6. Результаты работы могут быть использованы при проведении рекультивации земель, загрязненных нефтью, нефтешламами и/или нефтепродуктами в целях их восстановления непосредственно на месте разлива загрязнителя и дальнейшего использования в соответствии с целевым назначением.

7. Новизна и промышленная применимость технических решений подтверждена патентами РФ на изобретение: № RU 2761250 «Грунтошламовая фиторемедиационная смесь (ГФС)», № RU 2766361 «Торфо-диатомитовый мелиорант для рекультивации земель, загрязненных нефтью и нефтепродуктами», № RU 2774431 «Торфяной гранулированный мелиорант для рекультивации земель, загрязненных тяжелыми металлами», № RU 2745456 «Торфяной мелиорант для рекультивации земель, загрязненных тяжелыми металлами», № RU 2718815 «Способ получения композиции торфо-диатомитового мелиоранта для рекультивации земель, загрязненных нефтью и нефтепродуктами».

8. Результаты диссертационной работы планируются к использованию при подготовке проектной документации ООО «НПО УГГУ» (Акт внедрения ООО «НПО УГГУ» от 30.05.2024 г.).

Методология и методы исследования.

ИК-спектрометрический с использованием прибора АН-2, фотоколориметрический - КФК-3, атомно-абсорбционный - Spectr AA-240 FS (VarianOpticalSpectr, Instrum, Australia) и др. Исследования были проведены в лабораторных и полевых условиях. Обработка данных проведена методами математической статистики с использованием современного программного обеспечения: *Microsoft Excel*, *Design-Expert v.13* и «Тренды ФСП-1» (<https://igduran.ru/soft/trends2>).

Положения, выносимые на защиту

1. Внесение диатомита (≤ 15 мас. %) и сапропеля (≤ 5 мас. %) обуславливает 19-кратное увеличение морфологических показателей проростков овса посевного (*Avena sativa* L.), прирост сухой фитомассы на 10–25 % и рост всхожести семян на 16–41 % по отношению к контролю, что свидетельствует о целесообразности

включения диатомита и сапропеля в рецептуру многокомпонентных органоминеральных мелиорантов, предназначенных для ускоренной биоремедиации нефтезагрязнённых наземных экосистем.

2. Эффективность нефтедеструкции и восстановления агрохимических показателей нефтезагрязнённых наземных экосистем достигается при строго определенном процентном соотношении композиции ТДМ: торф – 51,5-53,5 %, сапропель – 31,0-33,5 %, диатомит – 15,0- 15,5 %, обеспечивающем синхронное снижение фитотоксичности, нейтрализацию кислотности и создание аэробных окислительно-восстановительных условий.

3. Комплексная биоремедиация нефтезагрязнённых наземных экосистем с использованием ТДМ совместно с высшими растениями способствует деструкции нефтяных углеводородов на 80-95 % за вегетационный период при начальных концентрациях загрязнения 100-170 г/кг до уровня допустимого остаточного содержания нефти и продуктов ее трансформации в почвах (ДОСНП).

Степень достоверности результатов исследования обусловлена значительным объемом теоретических и экспериментальных исследований с применением современных методов анализа и обработки данных. Достоверность результатов доказана их воспроизводимостью и отсутствием противоречий известным сведениям по изучаемой проблеме.

Апробация результатов диссертации за последние 3 года принято участие в 18-ти научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе в 7-и международных: XI Всероссийская научная конференция с международным участием «Биологическая рекультивация и мониторинг нарушенных земель» (сентябрь 2022 года, г. Сатка); X Уральский Горнопромышленный форум и XII Конференция «Рудник Будущего» (ноябрь 2022 года, г. Екатеринбург); Молодёжная научная конференция «Проблемы недропользования» (февраль 2023 года, г. Екатеринбург); XI Региональная молодёжная конференция имени В.И. Шпильмана «Проблемы рационального природопользования и история геологического поиска в Западной Сибири» (март 2023 года, г. Ханты-Мансийск); Международная научно-техническая интернет-конференция «Проектное управление

природно-техногенными комплексами в условиях новых вызовов» (апрель 2023 года, г. Екатеринбург); Китайско-российский академический симпозиум по восстановлению нарушенных экосистем (июнь 2023 года, г. Харбин, КНР); II Международная научно-практическая конференция «Проектное управление в условиях санкционного давления, новых вызовов и рисков: вопросы теории и практики» (июль 2023 года, г. Екатеринбург); XI Уральский горнопромышленный форум «Технологический суверенитет горного производства» (октябрь 2023 года, г. Екатеринбург); XVI Международная научная школа молодых учёных и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (октябрь 2023 года, г. Москва); Молодёжная научная конференция «Проблемы недропользования» (февраль 2024 года, г. Екатеринбург); XXII Уральская горнопромышленная декада. Международная научно-техническая интернет-конференция «Проектное управление природно-техногенными комплексами в условиях новых вызовов» (апрель 2024 года, г. Екатеринбург); Международная научно-практическая конференция молодых ученых и студентов «Биоэнергетика, экология и рациональное природопользование» (апрель 2024 года, г. Екатеринбург); LXXXIV Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Молодежная наука 2024: технологии, инновации» (апрель 2024 года, г. Пермь); 76-я Всероссийская научная конференция обучающихся и молодых учёных «Науки о Земле: задачи молодых» (апрель 2024 года, г. Петрозаводск); XII Всероссийская молодёжная научная конференция «Человек и окружающая среда» (апрель 2024 года, г. Сыктывкар); XII Всероссийская молодёжная конференция имени В.И. Шпилемана «Проблемы рационального природопользования и история геологического поиска в Западной Сибири» (апрель 2024 года, г. Ханты-Мансийск); Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Химия. Экология. Урбанистика» (апрель 2024 года, г. Пермь); X Международная научно-практическая конференция «Индикация состояния окружающей среды: теория, практика, образование» (апрель 2024 года, г. Москва).

Работа поддержана грантами Старт 1 и Старт 2 Фонда содействия инновациям в научно-технической сфере договор № 2620ГС1/41995 от 08.08.2018 г. и № 3532ГС2/41995 от 08.04.2020 г.

Личный вклад автора заключается в проведении комплексного экологического обследования нефтезагрязненных наземных экосистем; разработке и научном обосновании процентного соотношения композиции органоминеральных мелиорантов, составляющих основу ТДМ; проведении экспериментально-аналитических исследований по биоремедиации нефтезагрязненных наземных экосистем с использованием ТДМ.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 10 печатных работах, в том числе в 5 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 5 патентов на изобретения и 2 свидетельства о государственной регистрации баз данных.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений, списка литературы, включающего 199 наименований и 2-х приложений. Диссертация изложена на 134 страницах машинописного текста, содержит 42 рисунка и 10 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель и задачи исследования, раскрыта научная новизна и практическая значимость работы. **Первая глава** посвящена обзору научно-технической литературы. **Вторая и третья главы** содержат характеристику методов исследований и оценку влияния диатомита и сапропели на экосистемы, включая результаты техногенной трансформации нефтезагрязненных территорий и оптимальные соотношения органоминеральных мелиорантов. **Четвертая глава** представляет результаты полевых испытаний в ХМАО-Югра и Свердловской области с технологической схемой и рекомендациями по применению. **Заключение** содержит ключевые выводы исследования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Внесение диатомита (≤ 15 мас. %) и сапропеля (≤ 5 мас. %) обуславливает 19-кратное увеличение морфологических показателей проростков овса посевного (*Avena sativa* L.), прирост сухой фитомассы на 10–25 % и рост всхожести семян на 16–41 % по отношению к контролю, что свидетельствует о целесообразности включения диатомита и сапропеля в рецептуру многокомпонентных органоминеральных мелиорантов, предназначенных для ускоренной биоремедиации нефтезагрязнённых наземных экосистем.

По результатам теоретических исследований произведена выборка полезных ископаемых материалов распространенных на территории РФ, способных оказывать мелиоративное влияние на нефтезагрязненный грунт.

Согласно разработанному плану в образцы незагрязненной почвы вносили сапропель и диатомит от 0 до 30% по массе воздушно сухого вещества с шагом в 5%, затем анализировали почвенные образцы на показатели pH , окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) и развитие тест-объекта. В качестве тест-объектов использовались семена овса посевного (*Avena sativa* L.).

По результатам установлено, что диатомит не оказывает существенного влияния на pH и ОВП. Состоящий преимущественно из SiO_2 , диатомит является химически инертным материалом с высокой пористостью, влияя главным образом на физические свойства почвы: аэрацию и влагоемкость (рисунок 1).

В отличие от диатомита, увеличение концентрации сапропеля повышает pH и снижает ОВП. Присутствующие в его составе карбонаты кальция и магния повышают pH .

При увеличении концентрации диатомита более чем на 15 % увеличивается всхожесть семян благодаря способности удерживать влагу за счет высокой пористости, обеспечивая оптимальную среду для прорастания. Однако диатомит не влияет на биомассу тест-объектов, так как не является существенным источником питательных веществ.

Применение сапропеля до 25% увеличивает как всхожесть, так и биомассу на 10-25% относительно контроля. Органическое вещество сапропеля разлагается под действием микроорганизмов,

обеспечивая постепенное высвобождение азота, фосфора и калия. Гуминовые кислоты, содержащиеся в сапропели, стимулируют рост корневой системы, обеспечивая растения необходимыми элементами питания.

Установлено, что увеличение концентрации сапропеля и диатомита привело к росту надземной и подземной части тест-объекта, особенно выраженному при использовании сапропеля на уровне 20-25%: надземная часть превышала контроль в 17 раз, подземная – в 19 раз (рисунок 2-3).

Доказана возможность использования сапропеля и диатомита в качестве органоминеральных мелиорантов для улучшения показателей почвы и растений, что обуславливает перспективность их применения в целях биоремедиации.

2. Эффективность нефтедеструкции и восстановления агрохимических показателей нефтезагрязненных наземных экосистем достигается при строго определенном процентном соотношении композиции ТДМ: торф – 51,5-53,5 %, сапропель – 31,0-33,5 %, диатомит – 15,0-15,5 %, обеспечивающем синхронное снижение фитотоксичности, нейтрализацию кислотности и создание аэробных окислительно-восстановительных условий.

Важным аспектом биоремедиации нефтезагрязненных наземных экосистем является создание условий для превращения процесса угнетения в процесс восстановления. Индикаторами этих процессов являются *pH*, ОВП, фитотоксичность и деструкция нефти.

Для создания оптимальных условий разработана композиция ТДМ на основе торфа, диатомита и сапропеля. В лабораторных условиях проведены экспериментальные исследования композиций с различными пропорциями компонентов.

Снижение фитотоксичности (*T*, %) нефтезагрязненных почв играет ключевую роль в стимулировании деструкции нефти. Устранение токсичного воздействия создает благоприятную среду для активной деятельности растений и микроорганизмов, ускоряя естественные процессы очистки. По результатам экспериментов установлено, что основной вклад в снижение фитотоксичности вносит увеличение концентрации торфа, оптимальные значения

составляющих ТДМ для достижения лучших показателей фитотоксичности составили: торф 1,094–1,098 г, сапропель 0,45–0,463 г и диатомит 0,216–0,252 г. При данных пропорциях показатель фитотоксичности снижался с 33 % до минимального значения 6,6 % (рисунок 4).

Для эффективной микробной деградации нефти критически важны два параметра: pH почвы (оптимум 6,1–7,5) и ОВП, определяющий аэробные процессы. Исследования показали, что сапропель эффективно смещает pH в щелочную сторону, а комбинация торфа с диатомитом создает синергетический эффект, повышая ОВП и стимулируя аэробное окисление. Наибольшая эффективность достигнута при пропорциях: торф 0,909 г, диатомит 0,288 г, сапропель 0,630–0,801 г, что обеспечило повышение pH до 6,3 и рост ОВП до +213–216 мВ (рисунок 5-6).

Ключевым процессом восстановления нефтезагрязненных экосистем является биологическая деградация нефтяных углеводородов, осуществляемая микроорганизмами путем их расщепления до H_2O и CO_2 . При оптимальных содержаниях (торф 0,720 г, сапропель 0,450 г, диатомит 0,216 г) исходная концентрация нефти 63,0 г/кг снижалась на 34% до 41,5 г/кг в течение месяца. Для сравнения без применения мелиорантов концентрация нефти снизилась только на 6% (рисунок 7).

Результаты исследований обосновали оптимальное соотношение ТДМ: торф – 51,5-53,5 %, сапропель – 31,0-33,5 %, диатомит – 15,0-15,5 % (таблица 1). Торф в составе ТДМ улучшает аэрацию, структуру почвы и сорбирует свободную нефть. Сапропель обеспечивает питательными веществами и способствует развитию нефтеокисляющей микрофлоры. Диатомит обладает адсорбционной способностью, улучшает структуру почвы и влагоёмкость. Взаимодействие компонентов может приводить к синергическому эффекту, поэтому использована степенная модель, учитывающая нелинейность влияния каждого компонента и их взаимодействие.

3. Комплексная биоремедиация нефтезагрязненных наземных экосистем с использованием ТДМ совместно с высшими растениями способствует деструкции нефтяных углеводородов на 80-95 % за вегетационный период при

начальных концентрациях загрязнения 100-170 г/кг до уровня допустимого остаточного содержания нефти и продуктов ее трансформации в почвах (ДОСНП).

При полевых испытаниях ТДМ исследовалось влияние состава на деструкцию углеводородов и агрохимические показатели почвы. Три пробные площадки располагались в Свердловской области (Лангепас — загрязнение 169,4 г/кг, Артемовский — 100,35 г/кг) и на опытной базе ИГД УрО РАН (101,17 г/кг). На каждой площадке высаживались костреца безостого (*Bromopsis inermis* L.) и овса посевного (*Avena sativa* L.), проводился мониторинг содержания химических элементов и остаточной концентрации нефти.

Результаты полевых испытаний позволили установить положительную динамику деструкции нефти во всех вариантах с применением ТДМ. На опытной базе ИГД УрО РАН деструкция нефти составила 93%, в районе Артемовского — 81%, в Лангепасе — 80%. На контрольных площадках без ТДМ установлен уровень самоочищения почв в пределах 12–19 %, что подтверждает эффективность ТДМ.

Анализ агрохимических показателей выявил положительную динамику: увеличилось содержание азота, возросли концентрации подвижных форм фосфора и калия на всех экспериментальных участках. Установлена тесная корреляция между повышением доступности питательных элементов и снижением концентрации нефтепродуктов. Компоненты ТДМ, разрушают гидрофобную нефтяную пленку на частицах почвы, восстанавливая водостойкость и увеличивая подвижность питательных элементов.

Процесс биоремедиации обеспечивается комплексным воздействием ТДМ. Торф благодаря высокой пористости сорбирует углеводороды и снижает их биодоступность. Сапропель служит источником питания для микрофлоры, а диатомит улучшает влагоудержание и аэрацию почвы. Размер фракций ТДМ не превышает 10 мм при влажности менее 15 %, *pH* составляет 6,5-7,0.

Разработаны практические рекомендации по нормам внесения ТДМ в зависимости от типа почв и степени загрязнения. На органогенных почвах при слабом загрязнении рекомендуется 2-4 т/га, при среднем — 4-6 т/га, при высоком — 6-8 т/га. Технология включает

анализ местности, равномерное распределение ТДМ, механическую обработку почвы на глубину до 15 см и посев семян растений (рисунок 8).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основании теоретических и прикладных исследований предлагается решение актуальной научно-практической задачи биоремедиации нефтезагрязненных наземных экосистем с использованием композиции органоминеральных мелиорантов.

Основные выводы работы, отражающие научную и практическую значимость, заключаются в следующем:

1. На основе теоретических исследований установлено, что биоремедиация нефтезагрязненных наземных экосистем обеспечивается созданием благоприятных физико-химических условий, pH близким к нейтральному и благоприятными аэробными условиями, поскольку наибольший вклад в нефтедеструкцию вносят аэробные микроорганизмы.

2. Естественное самоочищение почв протекает крайне медленно: суммарное снижение концентрации нефти спустя 3 месяца составило лишь 1–9 % от начальной. На фоне pH 4,5–6,0 фиксировались следующие ключевые изменения физико-химического состояния: Окислительно-восстановительный потенциал смещается в восстановительную область по мере роста доли нефти и времени экспозиции, что указывает на переход системы к анаэробным условиям, ограничивающим аэробную нефтедеструкцию. Электропроводность почв снижается на 30–50 % из-за гидрофобной плёнки нефти, которая вытесняет воду из пор и блокирует миграцию ионов, ухудшая питание растений и микробиоту.

3. Выявлены закономерности мелиоративного влияния сапропеля и диатомита на незагрязненные наземные экосистемы. Сапропель увеличивает pH , поскольку содержит карбонаты, которые при растворении в воде образуют щелочные соединения, повышающие pH . Внесение диатомита влияет на физические свойства почв, такие как аэрация и влагоудержание. Таким образом, доказана возможность использования сапропеля и диатомита в

качестве состава композиции органоминеральных мелиорантов, в целях улучшения качественных, количественных показателей почвы и биологических растительных ресурсов для биоремедиации нефтезагрязненных наземных экосистем.

4. Экспериментальным путем определено оптимальное соотношение композиции торфяного, сапропелевого и диатомитового сырья составляющих основу торфо-диатомитового мелиоранта, обеспечивающее максимальную эффективность биоремедиации нефтезагрязненных почв. Установлена зависимость эффективности нефтедеструкции в нефтезагрязненных наземных экосистемах от внесения ТДМ при следующей композиции органоминеральных мелиорантов в процентах по массе воздушно сухого вещества: торф – 51,5 – 53,5; сапропель – 31,0 – 33,5; диатомит – 15,0 – 15,5 и нормы его внесения от 3 до 5 т/га.

5. Определены диапазоны параметров процесса нефтедеструкции и снижения фитотоксичности, позволяющие восстанавливать агрохимические свойства нефтезагрязненных наземных экосистем на 80-95 % за вегетационный период при начальной концентрации нефти от 100 до 170 г/кг в сочетании с высшими растениями и нормы его внесения от 3 до 5 т/га.

6. Разработан и апробирован способ очистки нефтезагрязненных наземных экосистем с использованием ТДМ в регионах УрФО (ХМАО-Югра, Свердловская область) обеспечивающий биоремедиацию наземной экосистемы (снижение фитотоксичности, восстановление *pH* среды и создание аэробных условий для нефтедеструкции) до уровня ДОСНП.

Дальнейшая проработка вопросов, связанных с биоремедиацией нефтезагрязнённых наземных экосистем в рамках диссертационного исследования, предусматривает организацию полевых испытаний мелиорантных композиций в условиях экстремального климата, характерного для арктических регионов. Комплекс исследований будет направлен на оценку устойчивости и эффективности применяемых композиций в условиях циклического замораживания и оттаивания, короткого вегетационного периода и низких температур, что позволит сформировать научно обоснованные рекомендации по их применению в арктической зоне.

Актуальна разработка модифицированных составов мелиорантов с криопротекторными добавками для обеспечения активности микроорганизмов-деструкторов в условиях вечной мерзлоты.

По направлению применения в условиях горных разработок предполагается проведение натурных испытаний мелиорантов на техногенно нарушенных землях, подразумевающих исследования эффективности биоремедиации при повышенной кислотности среды (pH 3,5–4,5), высоких концентрациях тяжёлых металлов и отсутствии естественного гумусового слоя. Необходима разработка буферных композиций мелиорантов с нейтрализующими компонентами (известняковая мука, доломитовая крошка или изменение пропорционального состава ТДМ) для восстановления плодородия на отвалах горных пород.

Результаты проведённого диссертационного исследования рекомендованы для использования при разработке проектных решений, связанных с организацией производства мелиорантов экологического назначения на базе залежей торфа. Полученные научные данные целесообразно внедрять при подготовке проектной документации, в частности при формировании разделов по рекультивации и восстановлению нарушенных земельных ресурсов.

Перспективное применение результатов исследования связано с расчетом необходимого количества исходных компонентов для приготовления биоремедиационных смесей при промышленном внедрении технологии, а также с оптимизацией организации доставки составляющих ТДМ в отдалённые районы нефтедобычи и с созданием мобильных комплексов для производства мелиорантов непосредственно на местах загрязнения.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

1. Оценка возможности применения торфо-диатомитового мелиоранта при разработке мероприятий по экологической реабилитации нарушенных экосистем / Н. Ю. Антонинова, **А. И. Усманов**, Л. А. Шубина, А. В. Собенин // Устойчивое развитие

горных территорий. – 2020. – Т. 12, № 4 (46). – С. 493-500. – DOI 10.21177/1998-4502-2020-12-4-493-500.

2. **Усманов, А. И.** Изменение свойств техногенных грунтов в процессе рекультивации с использованием торфодиадомитового мелиоранта / **А. И. Усманов**, А. В. Горбунов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 5-2. – С. 283-294. – DOI 10.25018/0236_1493_2021_52_0_283.

3. Testing of natural sorbents for the assessment of heavy metal ions' adsorption / V. Yurak, R. Apakashev, A. Dushin, **A. Usmanov**, M. Lebzin, A. Malyshev // Applied Sciences (Switzerland). – 2021. – Vol. 11, No. 8. – P. 3723. – DOI 10.3390/app11083723.

4. Исследование влияния торфо-диатомитового мелиоранта на формирование устойчивого травяного покрова при рекультивации нарушенных земель / Н. Ю. Антонинова, **А. И. Усманов**, А. В. Собенин, А. А. Горбунов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 5. – С. 131-141. – DOI 10.25018/0236_1493_2022_5_0_131.

5. Юрак, В. В. Восстановление нарушенных земель в горных экосистемах / В. В. Юрак, **А. И. Усманов** // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15, № 4 (58). – С. 901-911. – DOI 10.21177/1998-4502-2023-15-4-901-911.

Публикации в прочих изданиях:

6. **Усманов, А. И.** Этапы рекультивации нефтезагрязненных земель / **А. И. Усманов**, Л. Н. Олейникова, В. А. Усманова // Уральская горная школа - регионам : сборник докладов Международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 09–18 апреля 2018 года) / Ответственный за выпуск Н. Г. Валиев. – Екатеринбург : Уральский государственный горный университет, 2018. – С. 592-593.

7. **Усманов, А. И.** Исследование сырьевых ресурсов для производства Торфо-диатомитового мелиоранта используемого при рекультивации нефтезагрязненных территорий / **А. И. Усманов**, А. В. Горбунов // Сборник тезисов VII региональной молодежной конференции им. В. И. Шпильмана "Проблемы рационального природопользования и история геологического поиска в Западной

Сибири" (Ханты-Мансийск, 28–29 марта 2019 года). – Ханты-Мансийск : ООО «Югорский формат», 2019. – С. 105-106.

8. Антонинова, Н. Ю. Анализ процесса фиторемедиации нефтезагрязненного грунта с использованием торфо-диатомитового мелиоранта / Н. Ю. Антонинова, **А. И. Усманов**, А. В. Собенин // Проблемы недропользования. – 2020. – № 4 (27). – С. 110-118. – DOI 10.25635/2313-1586.2020.04.110.

9. Оценка эффективности мероприятий по рекультивации нефтезагрязненных земель с использованием мелиорантов / Н. Ю. Антонинова, **А. И. Усманов**, А. В. Горбунов, В. В. Иванов, Н. В. Новиков // Теория и практика мировой науки. – 2021. – № 2. – С. 45-52.

10. Оценка эффективности торфодиатомитового сорбента-мелиоранта для реабилитации нефтезагрязненных земель / Н. Ю. Антонинова, **А. И. Усманов**, А. В. Собенин, Я. А. Кузнецова // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2023. – № 4. – С. 135-150.

Патенты и авторские свидетельства:

11. Патент № 2718815 С1 Российская Федерация, МПК В09С 1/08. Способ получения композиции торфо-диатомитового мелиоранта для рекультивации земель, загрязнённых нефтью и нефтепродуктами : № 2019118227 : заявл. 12.06.2019 : опубл. 14.04.2020 / **А. И. Усманов**, А. В. Горбунов ; заявитель ООО "ЭкоИнноватор". – 6 с.

12. Патент № 2761250 С1 Российская Федерация, МПК В09С 1/00, В09В 3/00, С05F 11/02. Грунтошламовая фиторемедиационная смесь (ГФС) : № 2021108229 : заявл. 28.03.2021 : опубл. 06.12.2021 / **А. И. Усманов**, Н. Ю. Антонинова, А. В. Собенин, А. Н. Сёмин, О. В. Дедков ; заявитель ООО "ЭкоИнноватор". – 12 с. : ил. 6

13. Патент № 2774431 С1 Российская Федерация, МПК С05F 11/02, С09К 17/40. Торфяной гранулированный мелиорант для рекультивации земель, загрязненных тяжелыми металлами : № 2021134476 : заявл. 25.11.2021 : опубл. 21.06.2022 / **А. И. Усманов**, Р. А. Апакашев, М. С. Лебзин, В. В. Юрак, А. В. Душин, С. С. Завьялов ; заявитель ФГБОУ ВО "Уральский государственный горный университет". – 10 с. : ил. 3

14. Патент № 2745456 С1 Российская Федерация, МПК С09К 17/40, С05F 11/02. Торфяной мелиорант для рекультивации земель, загрязненных тяжелыми металлами : № 2020129211 : заявл. 03.09.2020 : опубл. 25.03.2021 / В. В. Юрак, А. В. Душин, Р. А. Апакашев, **А. И. Усманов**, М. С. Лебзин ; заявитель ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет». – 4 с. : ил. 1

15. Патент № 2766361 С1 Российская Федерация, МПК В09С 1/08. Торфо-диатомитовый мелиорант для рекультивации земель, загрязнённых нефтью и нефтепродуктами : № 2021106690 : заявл. 15.03.2021 : опубл. 15.03.2022 / **А. И. Усманов**, Н. Ю. Антонинова, А. В. Собенин, А. Н. Сёмин, О. В. Дедков, Е. А. Нелогова ; заявитель ООО "ЭкоИнноватор". – 9 с. : ил. 7

16. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023623956 Российская Федерация. База экспериментальных данных оценки фитотоксичности нефтезагрязненных почв рекультивируемых торфо-диатомитовым мелиорантом (ТДМ) : № 2023623558 : заявл. 27.10.2023 : опубл. 14.11.2023 / Н. Ю. Антонинова, **А. И. Усманов**, А. В. Собенин, Я. А. Кузнецова ; заявитель ФГБУН ИГД УрО РАН.

17. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022622448 Российская Федерация. Динамика химических элементов в нефтезагрязненных объектах окружающей среды при внесении Торфо-диатомитового мелиоранта (ТДМ) в целях рекультивации (2021 год) : № 2022622371 : заявл. 03.10.2022 : опубл. 10.10.2022 / **А. И. Усманов**, Н. Ю. Антонинова, А. В. Собенин, А. А. Горбунов ; заявитель ФГБУН ИГД УрО РАН.

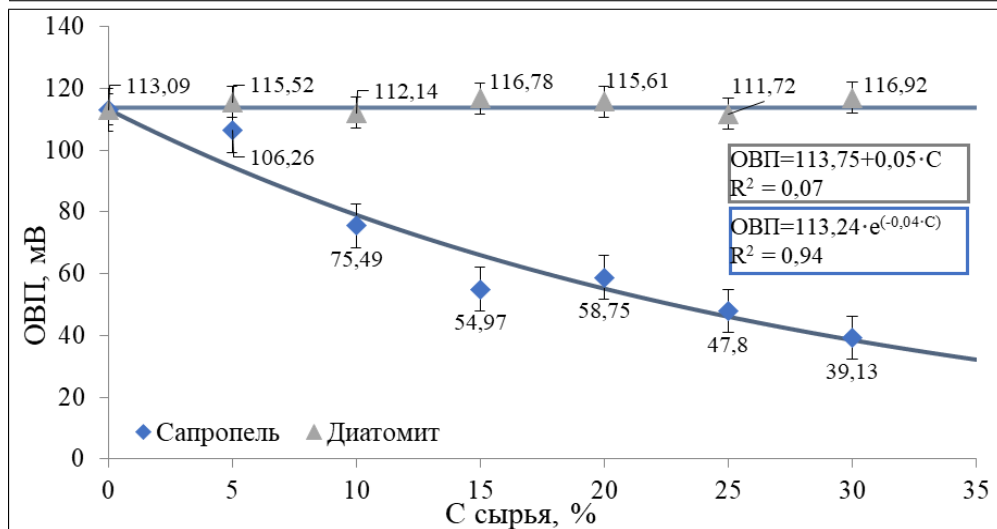
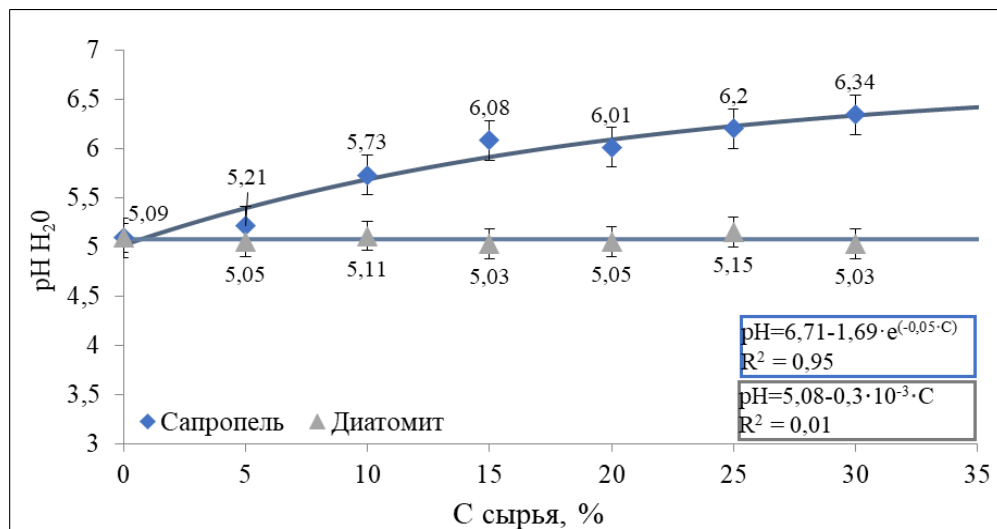


Рисунок 1 – Зависимости влияния сапроделя и диатомита при разных концентрациях на pH_{H_2O} и окислительно-восстановительный потенциал незагрязненной почвы (вверху ОВП, внизу pH_{H_2O})

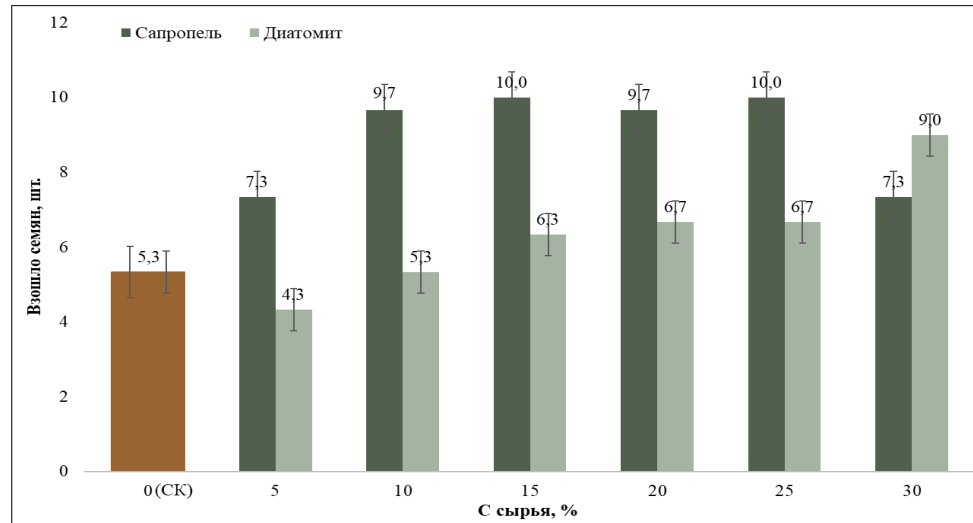
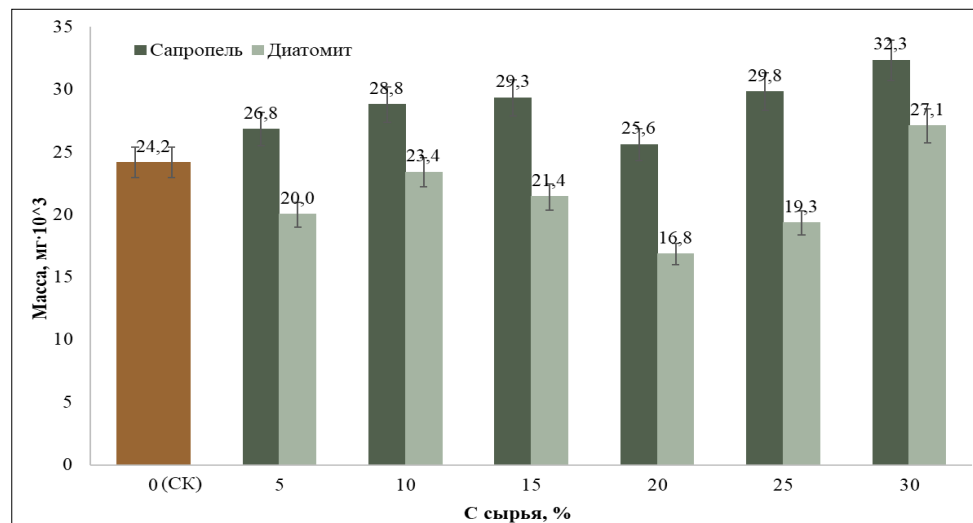


Рисунок 2 – Гистограммы всхожести семян и массы овса посевного (*Avena sativa L.*) в зависимости от концентрации сапроделя и диатомита в наземной экосистеме (внизу всхожесть, вверху масса)

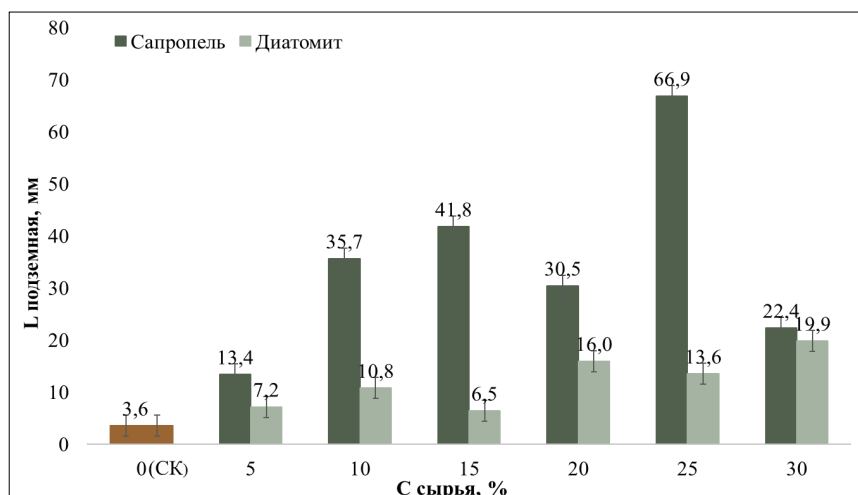
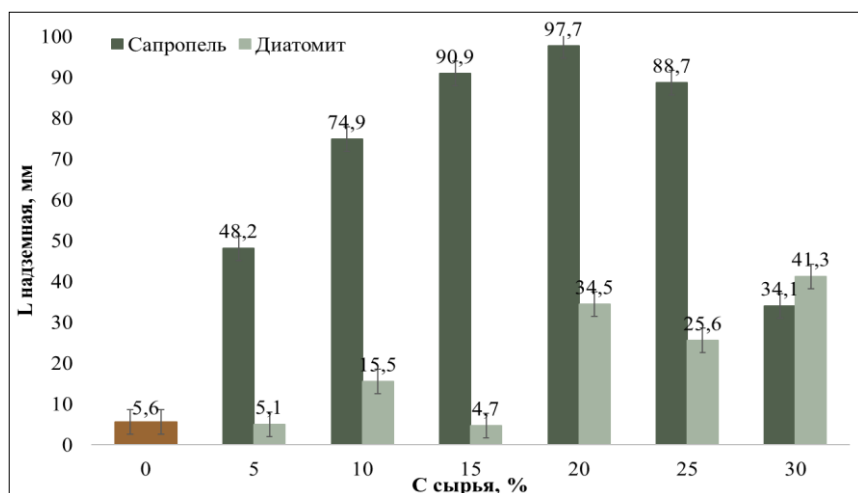


Рисунок 3 – Гистограммы длины надземной и подземной частей овса посевного (*Avena sativa* L.) в зависимости от концентрации сапропеля и диатомита в наземной экосистеме (внизу подземная, сверху надземная)

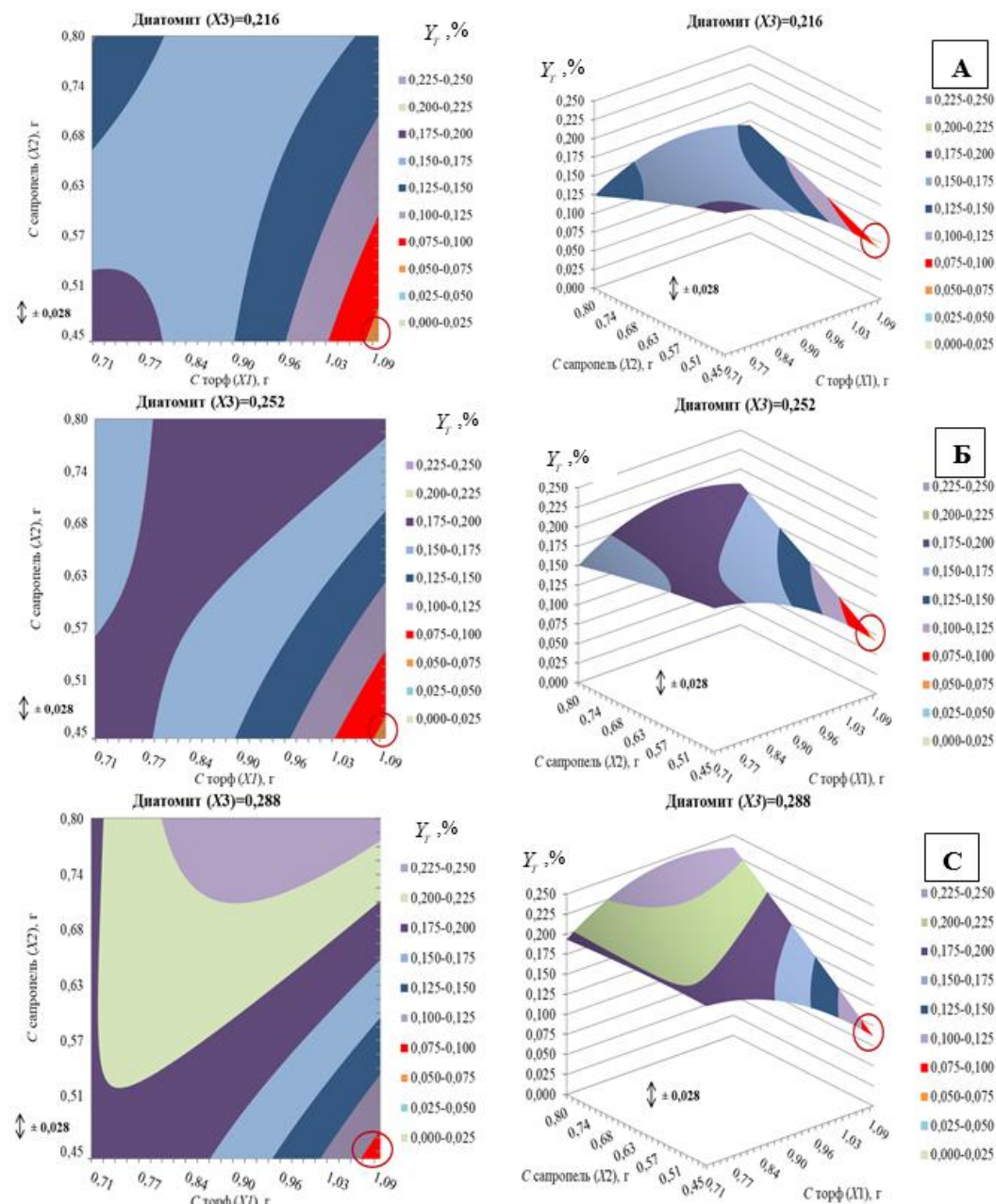


Рисунок 4 – Графики изменения фитотоксичности (T , %) при разном соотношении компонентов в составе ТДМ (торфа, сапропеля и диатомита) (при зафиксированном уровне диатомита А – 0,216; Б – 0,252; С – 0,288)

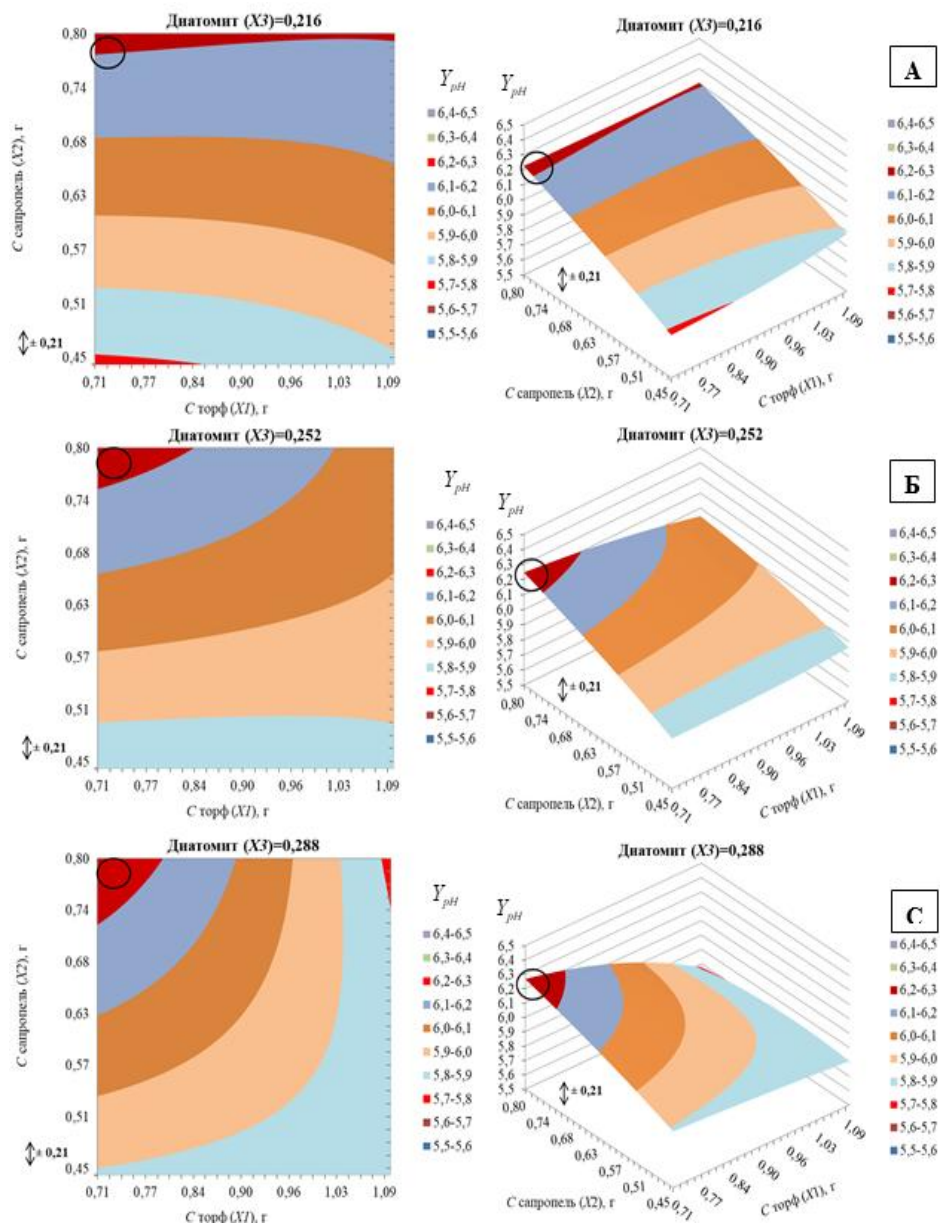


Рисунок 5 – Графики изменения pH_{H_2O} при разном соотношении компонентов в составе ТДМ (торфа, сапропеля и диатомита (при зафиксированном уровне диатомита А – 0,216; Б – 0,252; С – 0,288))

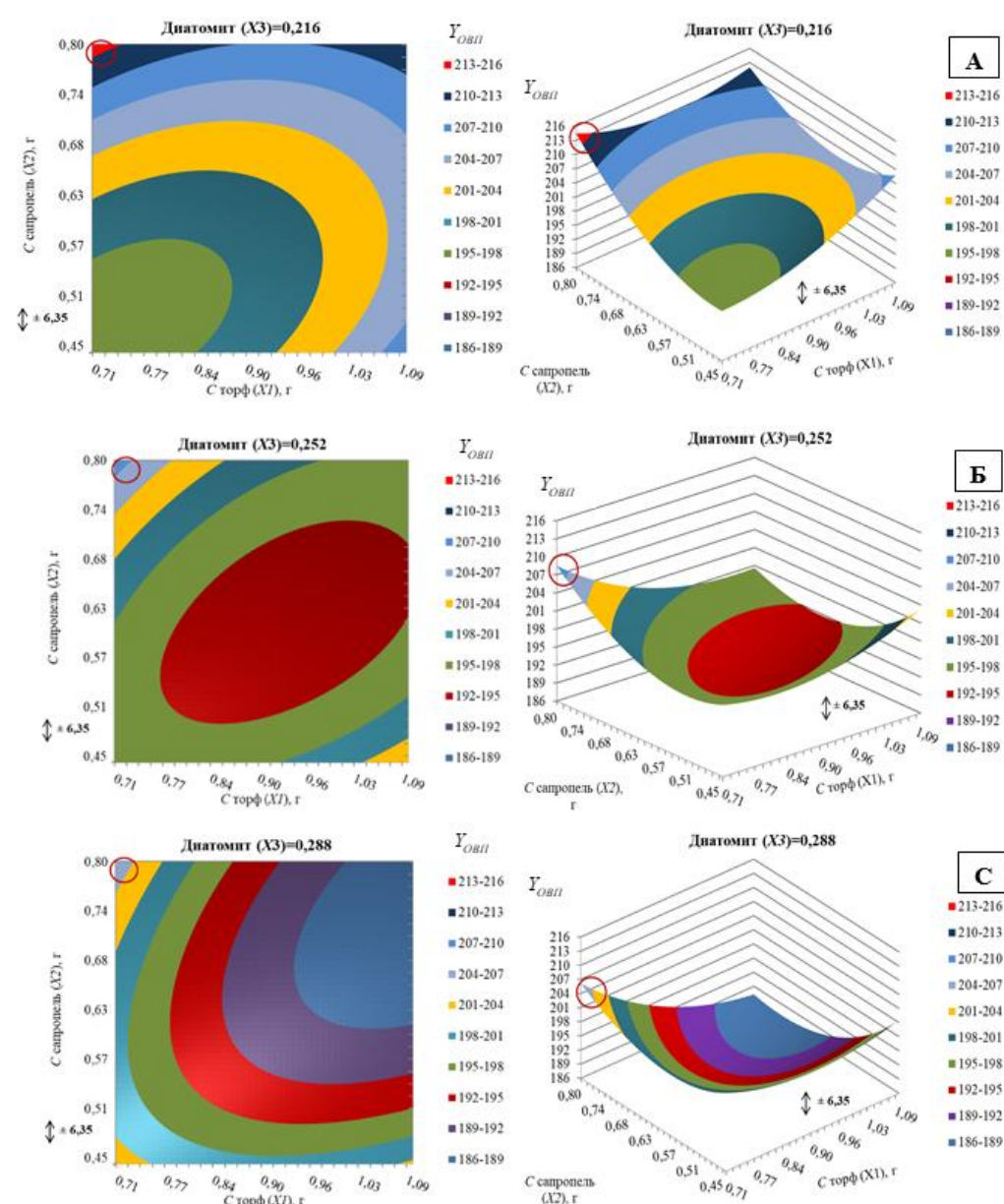


Рисунок 6 – Графики изменения ОВП при разном соотношении компонентов в составе ТДМ (торфа, сапропеля и диатомита (при зафиксированном уровне диатомита А – 0,216; Б – 0,252; С – 0,288))

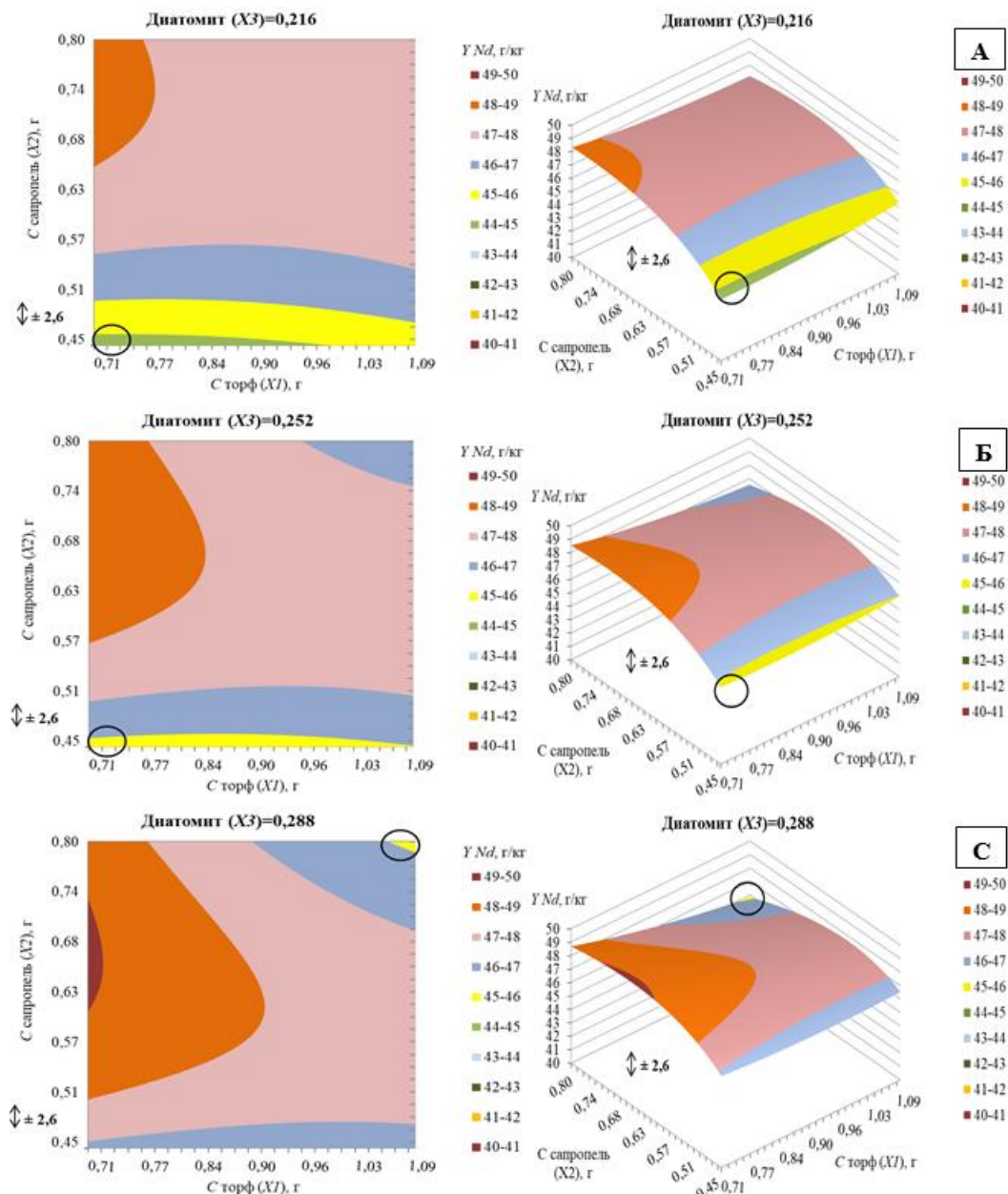


Рисунок 7 – Графики изменения концентрации нефти (нефедеструкции Nd , г/кг) при разном соотношении компонентов в составе ТДМ (торфа, сапропеля и диатомита (при зафиксированном уровне диатомита А – 0,216; Б – 0,252; С – 0,288)

Таблица 1 – Оптимальное соотношение компонентов ТДМ

Сырье	Граммы	
	0,720	0,770
Торф	0,450	0,470
Сапропель	0,216	0,223
Диатомит		
	Проценты	
	51,5	53,5
Торф	31,0	33,5
Сапропель	15,0	15,5
Диатомит		



Рисунок 8 – Технология поверхностного распределения и механического перемешивания ТДМ в условиях нефтезагрязнённого грунта. Сверху – равномерное распределение ТДМ по поверхности; снизу – рыхление почвы с ТДМ