

ДОРОГАЯ ЕКАТЕРИНА СЕРГЕЕВНА

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ И
СТРУКТУРООБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПЛОДОРОДИЯ И
УСТОЙЧИВОСТИ ПОЧВ**

Специальность: 1.5.19 – почвоведение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Уфа – 2024 г

Диссертационная работа выполнена в лаборатории почвоведения при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Уфимский Институт биологии Российской академии наук (2020–2024 гг.).

Научный руководитель:

Сулейманов Руслан Римович,
доктор биологических наук, профессор, гл.
науч. сотр. лаборатории почвоведения УИБ
УФИЦ РАН

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Ежегодные потери верхнего почвенного слоя планеты по разным подсчетам составляют от 10 до 16 миллионов гектаров в год [Stockmann et al., 2022; Pimentel, 2006; Добровольский, 2008]. Прогнозируется дальнейшее повышение темпов почвенной эрозии от экстремальных погодных явлений и снижение количества плодородных территорий [Certini, Scalenghe, 2023; Ji et al., 2024]. В то же время существует возможность восстановления утраченных земель путем рекультивации техногеннонарушенных участков. Восстановление плодородного слоя таких участков может значительно улучшить экологическую обстановку в регионе и обеспечить новые виды землепользования [Mi et al., 2020; Mukhopadhyay et al., 2014], а развитие на них вторичного леса представляет интерес в связи с потенциалом связывания атмосферного углерода и смягчения действия климатических изменений [Sullivan et al., 2006].

Республика Башкортостан является одним из развитых центров горнодобывающей промышленности в Российской Федерации. Скопление полезных ископаемых, традиционно добываемых методом открытой разработки, привело здесь к появлению большого количества нерекультивированных техногеннонарушенных территорий [Ангелов и др., 2012; Литовский, Левковский, 2016; Волчков и др., 2018; Кучеревский и др., 2018; Никонов и др., 2022].

Для успешного управления почвами местности, испытывающей сильное антропогенное влияние, необходима разработка схемы возврата утраченных земель и восстановления плодородия почв, включающая как оценку состояния техногеннонарушенных участков и прилегающих к ним территорий, так и разработку наиболее целесообразных для данного региона методов рекультивации.

Цель исследований состояла в оценке самовосстановления растительных экосистем и начального почвообразования на карьерах и отвалах Башкирского Зауралья и разработке методов восстановления почвенного покрова, и повышения плодородия и устойчивости почв на техногеннонарушенных территориях при использовании органических отходов производств и полимерных структурообразователей.

Задачи исследования:

- изучить почвенный микробиом нерекультивированных карьеров и отвалов, расположенных в Башкирском Зауралье, и дать оценку взаимосвязи между составом микробного сообщества и свойствами материала отвалов карьера для анализа условий, способствующих процессу почвообразования.

- оценить возможность и фитотоксичность применения смеси отходов целлюлозно-бумажного производства с материалом отвалов карьера для создания технозолей, которые могут быть использованы при рекультивации почв техногеннонарушенных территорий.

- оценить возможность использования отходов бурых водорослей *Fucus vesiculosus* L. в качестве почвенных мелиорантов для улучшения агрохимических свойств почв, отличающихся низким естественным плодородием.

- изучить влияние органических отходов переработки древесного сырья на содержание тяжелых металлов и металлов в почвах, отличающихся низким естественным плодородием.

- установить эффективность и фитотоксичность применения полимерных структурообразователей на снижение водной эрозии при обработке смоделированной рекультивированной поверхности почвогрунтов в опыте по дождеванию.

Научная новизна исследований. Впервые методом секвенирования ДНК определен микробиом материала карьеров и отвалов Башкирского Зауралья.

Предложен инновационный метод создания технозолей на основе отходов целлюлозно-бумажного производства и непосредственно материала восстанавливаемого участка. Протестирована фитотоксичность вариантов технозолей и установлена безопасность их применения при проращивании редиса.

Изучено влияние органических отходов глубокой переработки бурых водорослей и целлюлозно-бумажного производства на агрохимические и санитарные свойства почв с низким естественным плодородием. Показано, что применение данных органических отходов влияет на повышение содержания органического углерода и минеральных компонентов почв, оказывает раскисляющее действие на кислые почвы, а также может снижать степень подвижности некоторых тяжелых металлов.

Определены показатели водной эрозии при моделировании ливневых осадков высокой интенсивности на легкоглинистом агрочерноземе, песчаном и глинистом грунтах на склонах при использовании полимерного структурообразователя на основе полиакрилонитрила. Предложена наиболее эффективная доза для противоэрозионной обработки на легкоглинистом агрочерноземе и глинистом грунте.

Проведено сравнение эрозионных потерь легкоглинистого агрочернозема при моделировании ливневых осадков высокой интенсивности на склоне с использованием в качестве полимерных структурообразователей анионного и катионного полимеров, и интерполиэлектролитного полимерного комплекса. Выявлено, что лучшую противоэрозионную активность на легкоглинистом агрочерноземе проявляет интерполиэлектролитный полимерный комплекс, но его использование оказывает фитотоксическое действие на рост клевера красного. Использование анионного полимера оказывает положительное влияние на рост клевера красного, способствуя увеличению его биомассы.

Практическая значимость. Оценка техногеннонарушенных территорий и разработка методов их рекультивации является необходимым процессом в схеме возврата утерянных земель и восстановления плодородия почв. Это актуальная задача для горнодобывающих предприятий в сфере защиты окружающей среды от последствий добычи ископаемых. Изученные виды и схемы внесения органических отходов производств можно использовать в мелиорации почв, что позволит не только повысить плодородие новых созданных почв для более быстрого восстановления экосистемных функций при рекультивации техногеннонарушенных территорий, но и решит вопрос безопасной с экологической точки зрения утилизации производственного шлама. Выявленные в

модельном опыте дозы и тип полимерных структурообразователей могут быть использованы для повышения устойчивости почв к развитию водной эрозии при ливневых осадках и орошении.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Самовосстановление техногеннонарушенных участков имеет длительный период, занимающий десятки лет. Микробиом и растительные сообщества новых почв могут отличаться от местных типов. Искусственная рекультивация необходима для более быстрого восстановления экосистемных функций техногеннонарушенных участков.

2. Технозоли на основе смеси лигносульфоната натрия (отхода целлюлозно-бумажных производств) с материалом отвала карьеров могут быть использованы при нехватке пригодной для обратной засыпки местной почвы при рекультивации.

3. Внесение органических отходов глубокой переработки водорослей *Fucus vesiculosus* L. и деревообрабатывающей промышленности повышает агрохимические свойства и может снижать подвижность тяжелых металлов почв, отличающихся низким естественным плодородием.

4. Использование полимерных структурообразователей увеличивает устойчивость к водной эрозии легкоглинистого агрочернозема на склонах до 15°.

Степень достоверности работы подтверждена результатами модельных опытов, современными методами экспериментальных и аналитических исследований, статистической обработкой полученных результатов, их анализом и обобщением.

Личный вклад автора. Автором обобщены результаты исследований, проведенных в 2021–2024 гг. Совместно с научным руководителем были определены основные направления работы, объекты и методы исследований. Совместно с сотрудниками лаборатории почвоведения УИБ УФИЦ РАН, а также с сотрудниками лаборатории экологического мониторинга и моделирования Отдела комплексных научных исследований КарНЦ РАН были выполнены модельные лабораторные исследования. Лично автором были выполнены опыты по компостированию лигносульфоната натрия с материалом отвала карьеров и модельный опыт по дождеванию почв при использовании полимерных структурообразователей. Анализ агрохимических и физических свойств почв проведен с участием автора. Обобщение полученных результатов, формулировка выводов и основных защищаемых положений сделаны лично автором при направляющем и корректирующем участии научного руководителя.

Апробация работы и публикации. Основные положения диссертационной работы доложены и опубликованы в материалах международных, Всероссийских и региональных конференциях: «Геосфера. Современные проблемы естественных наук» (Уфа, 2021), «Биологическая рекультивация и мониторинг нарушенных земель» (Сатка, 2022), «SOIL Erosion and Torrential Flood» (Белград, 2022), «Актуальные вопросы теории и практики лесного почвоведения» (Петрозаводск, 2023), «Почвы и окружающая среда» (Новосибирск, 2023), «Современные проблемы биологии, наук о Земле, спорта и туризма» (Уфа, 2023), «IX съезд Общества почвоведов им. В.В. Докучаева» (Казань, 2024).

Некоторые этапы работы были выполнены при поддержке следующих грантов: грант Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2020-922 от 16.11.2020 на создание и развитие Научного центра мирового уровня “Агротехнологии будущего”, гранта РНФ № 22-16-00145.

По материалам диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе – 6 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю, а также сотрудникам УИБ УФИЦ РАН д.б.н. Габбасовой И.М., к.с-х.н. Гарипову Т.Т., к.б.н. Комиссарову М.А., к.б.н. Сидоровой Л.В., к.с-х.н. Назыровой Ф.И., к.с-х.н. Простяковой З.Г., сотрудникам Отдела комплексных научных исследований КарНЦ РАН к.с-х.н. Юркевич М.Г. и д.б.н. Бахмет О.Н., а также д.б.н. Абакумову Е.В. за помощь в проведении модельных опытов, аналитических исследований и консультации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Деградация почв, методы борьбы с эрозией почв и способы восстановления утерянных плодородных территорий (обзор литературы)

Приводится обзор методов борьбы с наиболее распространенным видом почвенной деградации – эрозией почв. Рассматриваются способы использования в качестве противоэрозионных почвенных добавок органических отходов производств и полимерных структурообразователей. Приводятся факты в пользу недостаточности применения мер противоэрозионной обработки почв для обеспечения потребности населения в плодородных землях. Рассматриваются возможности возвращения техногеннонарушенных участков в земельный фонд. Описаны методы оценки техногеннонарушенных территорий для выбора оптимального способа их рекультивации, и основные стратегии восстановления. Делаются выводы о низкой степени рекультивации утерянных плодородных территорий и необходимости усовершенствования существующих и разработки новых методов их восстановления с использованием экологически безопасных и экономически выгодных стратегий.

2. Объекты и методы исследований

Исследованы агрохимические свойства, санитарно-гигиенические показатели и микробиом заброшенных нерекультивированных отвалов и карьеров шести месторождений, расположенных на юго-востоке Республики Башкортостан в Баймакском и Хайбуллинском районах.

В лабораторных условиях выполнены модельные опыты по использованию отходов деревообрабатывающей промышленности и отходов глубокой переработки бурых водорослей, а также полимерных структурообразователей для повышения плодородия почв и их устойчивости к водной эрозии.

Лабораторно-аналитические исследования проводили общепринятыми методами [Аринушкина, 1970; Sokolov, 1975]. Содержание тяжелых металлов, мышьяка и металлов в почве проводили по методикам инверсионной вольтамперометрии [Achterberg, van den Berg, 1994], масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и атомно-абсорбционного метода [Воробьева, 2006]. Микробиом исследовали методом экстракции ДНК с использованием набора MN FastDNA Spin (MN, Германия) для тотального выделения ДНК из почвы. Секвенирование выполняли на секвенаторе Illumina MiSeq (Illumina, США) в соответствии с протоколом производителя. Таксономическая аннотация выполнялась с использованием naïve Bayesian classifier, а библиотека справочных данных SILVA использовалась в качестве обучающего набора последовательностей (124) [Quast et al., 2013].

Результаты анализов обрабатывались статистически с помощью программы Excel.

3. Почвообразование на техногеннонарушенных территориях

Изучены пробы техногеннонарушенных участков (ТНУ) и природных фоновых почв (Фон) с использованием агрохимических и санитарных методов в сочетании с методом метагеномной оценки разнообразия почвенных микроорганизмов на следующих карьерах и отвалах, расположенных в Башкирском Зауралье:

1. ТНУ-Тубинский: отвал карьера, период самовосстановления >60 лет (на 2021 г.), участок не имел естественного почвенного покрова, обнаружены отдельные участки формирования молодой почвы под частично деградированной в результате пастбищной дигрессии степной растительностью. Агрохимические показатели первичных почв: рН H₂O 7,62, общий углерод 1,4 %, щелочно-гидролизующий азот 84 мг/кг.

2. Фон-Тубинский: ненарушенный участок, почвенный покров сплошной, представленный маломощными литоземами (мощностью до 8 см) под степной растительностью. Агрохимические показатели: рН H₂O 5,77, общий углерод 9,6 %, щелочно-гидролизующий азот 448 мг/кг.

3. ТНУ-Кульюртау: отвал карьера, период самовосстановления >35 лет (на 2021 г.), участок не имел естественного почвенного покрова, обнаружены отдельные участки формирования новых почв, предположительно частично наносного характера, частично сформированных на месте под молодыми зарослями березы. Агрохимические показатели первичных почв: рН H₂O 6,16, общий углерод 6,1 %, щелочно-гидролизующий азот 336 мг/кг.

4. Фон-Кульюртау: ненарушенный участок, почвенный покров сплошной, представленный маломощными литоземами (мощностью до 10 см) под степной растительностью. Агрохимические показатели: рН H₂O 6,63, общий углерод 4,5 %, щелочно-гидролизующий азот 224 мг/кг.

5. ТНУ-Семеновский: отвал карьера, не более 1 года самовосстановления (на 2021 г.), участок не имел естественного почвенного покрова, признаков формирования нового почвенного слоя не обнаружено. Агрохимические

показатели мелкозема участка: рН Н₂О 7,27, общий углерод 2,1 %, щелочно-гидролизуемый азот 98 мг/кг.

6. Фон-Семеновский: ненарушенный участок, почвенный покров сплошной, представленный маломощными литоземами (мощностью до 17 см) под степной растительностью. Агрохимические показатели: рН Н₂О 6,57, общий углерод 3,8 %, щелочно-гидролизуемый азот 182 мг/кг.

7. ТНУ-Туба-Каин: отвал карьера, не более 6 лет самовосстановления (на 2021 г.), участок не имел естественного почвенного покрова, признаков формирования нового почвенного слоя не обнаружено. Агрохимические показатели мелкозема участка: рН Н₂О 7,35, общий углерод 0,3 %, щелочно-гидролизуемый азот – отсутствует (ниже погрешности определения 0,1 мг/кг).

8. Фон-Туба-Каин: ненарушенный участок, почвенный покров сплошной, представленный маломощными литоземами (мощностью до 11 см) под степной растительностью. Агрохимические показатели: рН Н₂О 6,68, общий углерод 2,8 %, щелочно-гидролизуемый азот 126 мг/кг.

9. ТНУ-Карьер стройматериалов: отвал карьера, период самовосстановления не менее 35 лет (на 2021 г.), участок не имел естественного почвенного покрова, признаков формирования нового почвенного слоя не обнаружено. Агрохимические показатели мелкозема участка: рН Н₂О 7,62, общий углерод 0,9 %, щелочно-гидролизуемый азот 42 мг/кг.

10. Фон-Карьер стройматериалов: ненарушенный участок, почвенный покров сплошной, представленный маломощными литоземами (мощностью до 11 см) под степной растительностью. Агрохимические показатели: рН Н₂О 6,14, общий углерод 5,1 %, щелочно-гидролизуемый азот 252 мг/кг.

11. ТНУ-Бурибай: период самовосстановления не менее 35 лет (на 2021 г.), участок не имел естественного почвенного покрова, признаков формирования нового почвенного слоя не обнаружено. Агрохимические показатели мелкозема участка: рН Н₂О 2,78, общий углерод 1,8 %, щелочно-гидролизуемый азот 224 мг/кг.

12. Фон-Бурибай: ненарушенный участок, почвенный покров сплошной, представленный маломощными литоземами (мощностью до 12 см) под степной растительностью. Агрохимические показатели: рН Н₂О 5,71, общий углерод 1,7 %, щелочно-гидролизуемый азот 84 мг/кг.

Визуальный анализ участков показал, что почвообразующие тела нарушенных территорий находились на стадии первичного почвообразовательного процесса. На ТНУ-Кульюртау выявлено накопление подстилки средней толщины под пологом молодых берез. На ТНУ-Тубинский на дне карьера образовался дерн и прослеживалось образование слабо выраженного очёса. На остальных исследованных ТНУ, а также на крутых склонах ТНУ-Кульюртау и ТНУ-Тубинский накопления подстилки и формирования гумусово-аккумулятивного горизонта не происходило.

Выявлена общая тенденция изменения агрохимических показателей на ТНУ по сравнению с фоном в сторону повышения уровня щелочности материала и снижения общего органического углерода и щелочно-гидролизованного азота.

Для оценки степени загрязнения провели анализ содержания тяжелых металлов Pb, Cd, Hg, Zn, Cu, Ni в валовой концентрации и подвижной формы тяжелых металлов Zn, Cu, Ni и анализ валового состава мышьяка Na техногеннонарушенных участках содержание тяжелых металлов и мышьяка не превышало установленные уровни ПДК и ОДК.

Таксономический состав исследуемых образцов был представлен в основном суммой следующих прокариотных фил: бактерий Acidobacteria, Actinobacteria, Bacteroidetes, Chloroflexi, Cyanobacteria, Firmicutes, Gemmatimonadetes, Patescibacteria, Planctomycetes, Proteobacteria и Verrucomicrobia и архей Thaumarchaeota (рисунок 3.1).

Actinobacteria и Proteobacteria являлись доминирующими филами, что характерно для большинства бактериальных почвенных сообществ [Vasuga et al., 2022; Wu et al., 2022]. В каждом образце также была обнаружена значительная доля Acidobacteria и Bacteroidetes. Очень малой долей типов Verrucomicrobia и Thaumarchaeota (менее 2%) характеризовались образцы, полученные из мест первичного почвообразования на ТНУ (ТНУ-Тубинский и ТНУ-Культюртау).

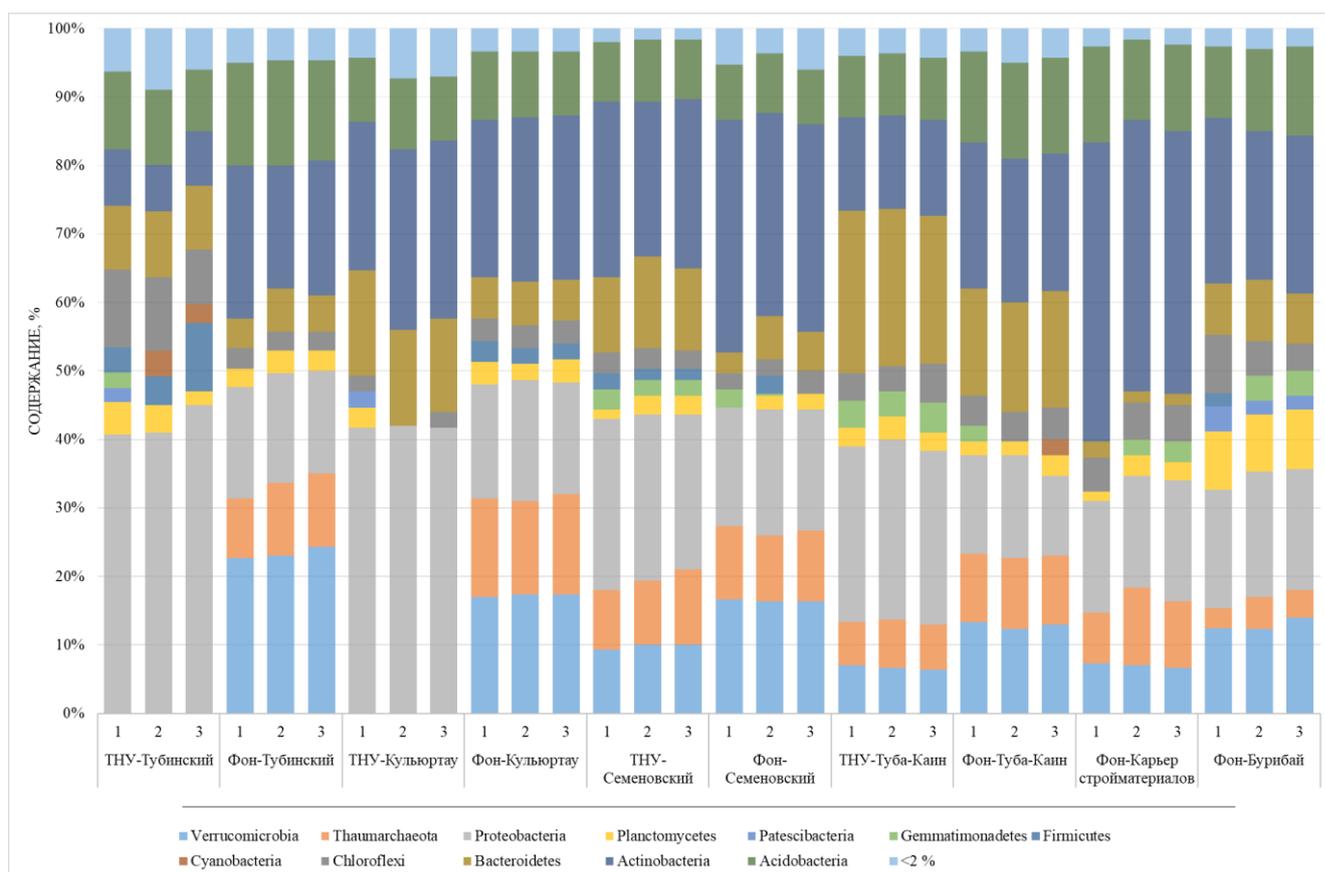


Рисунок 3.1. Относительная представленность бактериальных фил в микробных сообществах ТНУ и их фоновых участков.

Альфа-разнообразие показало необычно высокий уровень дисперсии для образцов ТНУ-Культюртау и ТНУ-Тубинский. Оценка бета-разнообразия позволяет говорить о наличии выраженной кластеризации почв ТНУ, хотя микробное сообщество ТНУ-Семеновский было сходно с группой фоновых почв.

Статистический анализ корреляционных зависимостей выявил, что наблюдаемый процесс самовосстановления техногеннонарушенных почв не имел прямой зависимости от исходных агрохимических свойств почв и содержания в них тяжелых металлов и мышьяка.

Нарушенные участки характеризовались быстрой потерей питательных веществ и более медленной перестройкой микробиологических сообществ. Первичные почвы, сформировавшиеся на ТНУ, демонстрировали обратную зависимость: увеличение содержания питательных веществ происходило быстрее, чем восстановление стабильного состава микробиоты, и во многом зависело от текущей антропогенной нагрузки на формирующиеся почвы и от типов растительности, произрастающей на этих новых почвах.

4. Использование лигносульфоната натрия для создания технозолей в целях рекультивации техногеннонарушенных территорий

Эффективным и экономически целесообразным методом для восстановления техногеннонарушенных территорий может стать применение искусственно улучшенных почв или целенаправленно изготовленных технозолей. Одним из наиболее перспективных материалов для использования в качестве основы при создании технозолей является отход химической переработки древесины – лигносульфонат натрия [Ерошина, 2010; Ariyanta et al., 2023].

Исследовали агрохимические свойства смесей лигносульфоната натрия (ЛН) с материалом отвала карьера (МОК), полученных в лабораторном опыте по компостированию в течение трех месяцев в присутствии микроорганизмов-биодеструкторов (Микр.) и/или минерального азотсодержащего удобрения (N). Смеси готовили в пропорциях МОК:ЛН = 1:½, 1:1 и 1:2, для каждой пропорции готовили варианты без внесения добавок, с добавкой 1 г удобрения или с добавкой 1 г удобрения + Микр в дозе 1 мл/100 г субстрата. Всего с контролем получили 12 вариантов смесей, исполненных в двух повторностях.

Пробы компостировали в пластиковых сосудах без дренажа. Каждые две недели после тщательного перемешивания отбирали промежуточные пробы в размере 20–25 г из каждого сосуда. Пробы замораживали при -18°C. Через 82 дня от начала компостирования опыт завершили, образцы высушивали на воздухе. Всего было выполнено семь промежуточных отборов проб в процессе компостирования, и одна проба отбиралась из готовых смесей через 250 дней от начала опыта по компостированию.

Внесение ЛН в МОК приводило к образованию на поверхности субстрата пленки, препятствующей интенсивному испарению влаги. Компостирование способствовало минерализации органического вещества и увеличению микробиологической активности (рис. 4.1), а также повышению уровня pH H₂O.

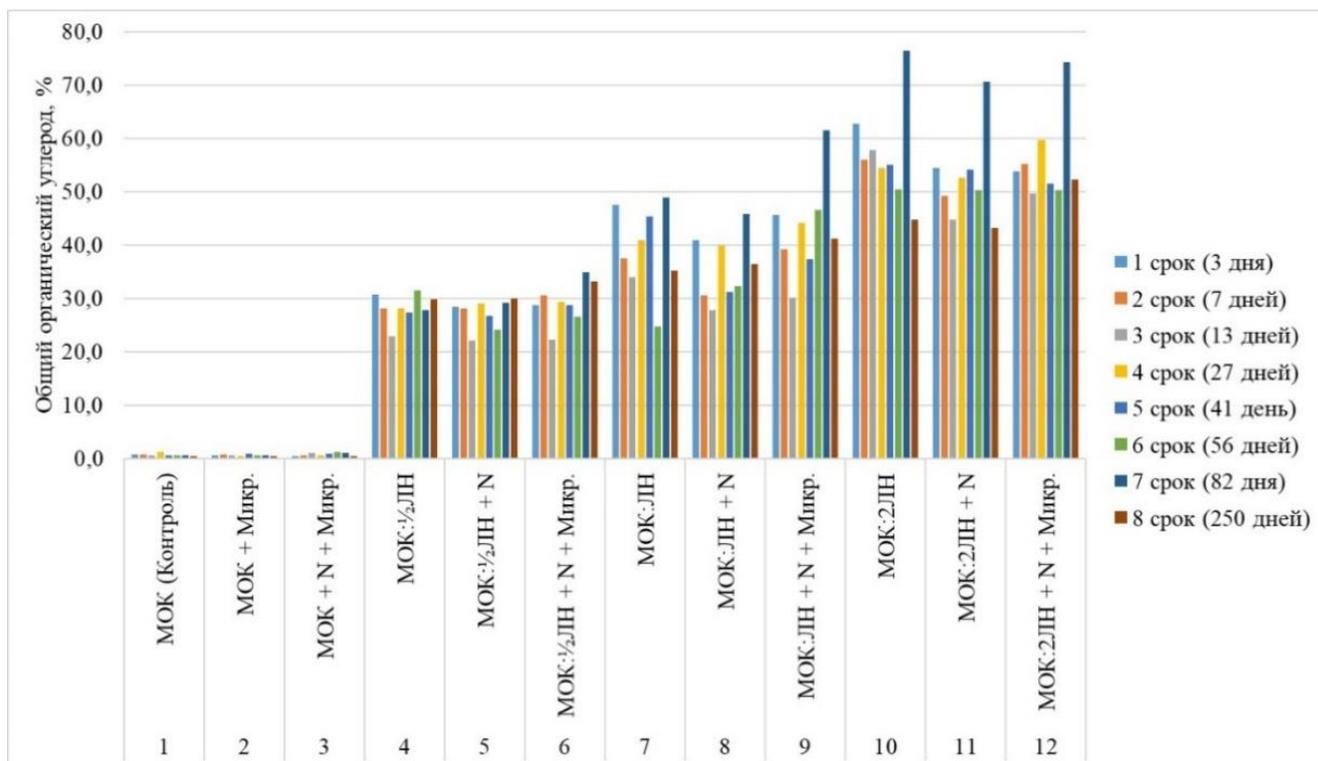


Рисунок 4.1. Динамика содержания общего органического углерода при компостировании в смесях на основе мелкозема отвалов карьера и лигносульфоната натрия.

Статистический регрессионный анализ полученных результатов выявил следующие закономерности: с увеличением доли ЛН повышается органический углерод и рН H_2O ; внесение N имеет основное влияние на содержание щелочно-гидролизующего азота, но отрицательно влияет на содержание органического углерода; добавка Микр. положительно влияет на содержание органического углерода и щелочно-гидролизующего азота; увеличение срока компостирования приводит к росту значений рН H_2O , но ведет к снижению содержания органического углерода и щелочно-гидролизующего азота смесей.

После завершения опыта полученные смеси проверяли на фитотоксичность при проращивании семян скороспелого редиса [Филатов и др., 2021]. Сухие смеси перетирали и просеивали через сито 1 мм и отбирали навеску массой 0,1 г из каждого варианта. В чашки Петри помещали фильтровальную бумагу, пропитанную раствором, полученным при смешивании 0,1 г навески с 10 мл дистиллированной воды, выкладывали на нее по 10 семян примерно одного размера. Повторяли для каждого варианта в трех повторностях. В качестве контроля использовали чашки Петри с фильтровальной бумагой, промоченной только 10 мл дистиллированной воды. Оценка фитотоксичности проводилась по количеству проросших семян через 48 часов, а также по сухой массе семян и проростков, собранных на 4 сутки с начала опыта по проращиванию. Опыт показал, что всхожесть семян во всех вариантах была 100 %. Проращивание началось одновременно на второй день после посева, на 4-й день ростки

достигали высоты в 3–4 см. Лучшие результаты прироста биомассы были получены для варианта МОК:½ЛН + N + Микр.: 60 %.

Таким образом, все варианты смесей на основе лигносульфоната натрия и материала отвала карьера имели высокие агрохимические показатели, не проявляли фитотоксического действия и обладали способностью образовывать пластичную пленку на поверхности, препятствующую интенсивному влагоиспарению. Применение высоких доз лигносульфоната натрия для сельскохозяйственных нужд может способствовать утилизации отходов переработки древесины с пользой для экологического земледелия.

5. Методы повышения плодородия и устойчивости почв рекультивируемых территорий

Для поддержания свойств нового почвенного покрова рекультивируемых территорий и уменьшения потери агрохимических качеств почв при эрозии необходимо применение веществ, способствующих оструктуриванию почв и созданию механически прочных почвенных агрегатов.

5.1. Применение органических отходов

Органические отходы могут служить доступным, недорогим и потенциально эффективным мелиорантом почв [Adediran et al., 2012; Li et al., 2019; Cybulak et al., 2021; El-mrini et al., 2022; Hafez et al., 2022; Зубкова и др., 2023].

5.1.1. Использование бурых водорослей для улучшения органического состава и химических свойств почв

Бурые водоросли *Fucus vesiculosus* L. имеют высокий спрос для пищевой и фармакологической промышленности [Подкорытова и др., 2020; Golshany et al., 2024]. Для оценки возможности использования отходов *F. vesiculosus* в качестве почвенных мелиорантов было проведено исследование влияния на агрохимические свойства почв при компостировании их с отходов переработки водорослей.

Компостирование проводили в пластиковых сосудах объемом 1 л без дренажа. В качестве почв использовали дерново-подзолистые почвы разного гранулометрического состава (глинистую (ДПГп), суглинистую (ДПСГп) и супесчаную (ДПСпп) почвы) и болотную верховую торфяную почву (БВТп), которые высушивали до воздушно-сухого состояния, просеивали через сито 2 мм и в количестве 500 г смешивали с сухим промышленным жмыхом водорослей *Fucus vesiculosus* L. (фукус) до достижения содержания, равного 0 %, 0,5 %, 2,0 %, 5,0 % и 10% от массы. Варианты выдерживали при 21–23°C и 70–80% от максимальной влагоемкости почвы в течение 60 дней, полное перемешивание и полив проводили раз в неделю. После завершения компостирования каждый

вариант тщательно перемешивали и высушивали на воздухе, затем просеивали через сито 1 мм и анализировали. Повторность – трехкратная.

Полисахариды бурых водорослей имеют доказанную высокую биологическую активность при внесении в почвы [Janceva et al., 2019; Dmytryk et al., 2018; Chatterjee et al., 2017; Saadaoui et al., 2019], но состав водорослей часто зависит от времени сбора и способа обработки. В наших исследованиях для отходов фукус было определено: содержание фенольных соединений: $2.10 \pm 0,03$ мг галловой кислоты/г; пролина: $0,048 \pm 0,004$ %; альгината: $7.4 \pm 0,03$ %; маннита: $1.1 \pm 0,1$ мкг/г; суммарной концентрация сахаров: $104,1 \pm 5.2$ мг/г. Состав и содержание сахаров [Усов, Билан, 2009]: рибоза – $4.0 \pm 0,4$ %, ксилоза – $12,9 \pm 1,6$ %, гексоза – $10,6 \pm 0,8$ %, пентоза – $26,4 \pm 2,7$ %, глюкоза – $5.1 \pm 0,5$ % и галактоза – $23,4 \pm 2.1$ %.

Помимо легкоминерализуемых органических компонентов, водоросли также накапливают растворенные в морской воде соли, что может увеличивать содержание катионов в почвах [Подкорытова и др., 2020] (таблица 5.1).

Таблица 5.1. Агрохимические свойства почв после 60 дней компостирования с отходами глубокой переработки *Fucus vesiculosus* L., внесенных в дозах 0 %, 0,5 %, 2 %, 5 % и 10 % от массы субстрата

Вариант	рН H ₂ O	ООУ	N _{общ}	P _{подв} , мг/100г	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
		%			мг/кг			
Дерново-подзолистая глинистая почва (ДПГп)								
ДПГп (контроль)	6,30	0,48	0,18	105,0	630,4	194,9	99,1	84,2
ДПГп/фукус-0,5	6,89*	0,66	0,23	111,5	671,3	191,8	96,7	78,4
ДПГп/фукус-2	7,47*	1,48*	0,21	107,5	742,3*	177,0	155,2*	79,7
ДПГп/фукус-5	8,11*	1,76*	0,21	128,3	1073,6*	271,3*	229,2*	47,9
ДПГп/фукус-10	8,62*	2,78*	0,28	122,6	1260,1*	249,5*	379,5*	92,7*
Дерново-подзолистая среднесуглинистая почва (ДПСгп)								
ДПСгп (контроль)	5,77	3,96	0,22	162,0	2856,9	164,1	67,2	379,7
ДПСгп/фукус-0,5	5,56	4,71*	0,23	172,0	3090,8	253,6*	104,9*	270,5
ДПСгп/фукус-2	5,80	4,94*	0,21	172,5	2956,0	284,6*	177,3*	357,7
ДПСгп/фукус-5	5,94*	5,44*	0,21	174,7	2975,0	290,3*	186,3*	462,6*
ДПСгп/фукус-10	7,40*	5,50*	0,20	165,5	2511,0	316,2*	371,6*	472,4*
Дерново-подзолистая супесчаная почва (ДПСпп)								
ДПСпп (контроль)	5,41	1,28	0,12	10,2	394,0	18,7	40,6	34,4
ДПСпп/фукус-0,5	5,38	1,62*	0,13	9,7	371,4	22,8	65,1*	46,1*
ДПСпп/фукус-2	6,38*	1,71*	0,12	14,3	566,4*	51,6*	139,5*	65,3*
ДПСпп/фукус-5	7,33*	2,24*	0,14	13,6	574,1*	58,2*	223,0*	93,2*
ДПСпп/фукус-10	8,01*	3,12*	0,19	13,8	899,8*	112,3*	437,4*	213,3*
Болотная верховая торфяная почва (БВТп)								
БВТп (контроль)	5,49	35,93	1,80	42,3	8914,4	635,8	81,2	53,2
БВТп/фукус-0,5	5,34	36,51	1,68	45,5	8849,4	626,1	82,7	48,4
БВТп/фукус-2	5,39	35,78	1,73	47,3	9357,3	682,5	232,3*	67,8
БВТп/фукус-5	5,54	36,31	1,65	65,3	8404,5	682,3	283,2*	108,9*
БВТп/фукус-10	5,71*	36,93	1,80	60,1	9316,3	832,8*	633,7*	180,3*

где ООУ – общий органический углерод, N_{общ} – общий почвенный азот, P_{подв} – подвижный фосфор; * отмечены значения с $p \leq 0.05$ (значительные изменения химических свойств).

Внесение отходов фукус имело существенное влияние ($p \leq 0.05$) на содержание органического углерода во всех представленных типах дерново-подзолистых почв, в зависимости от дозы отходов фукус последовательно увеличивая содержание до 2,78–5,50 %. Также наблюдалось повышение щелочности среды для дерново-подзолистых почв с увеличением дозы отходов фукус до 7,4–8,62 рН H_2O . Содержание катионов растворимых солей (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ и K^+) значительно увеличивалось в основном для изначально низких показателей, наибольшее повышение содержания было отмечено для почвы супесчаной почвы: на 128 % для Ca^{2+} , 501 % для Mg^{2+} , и на 977 % и 519 % для Na^+ и K^+ , соответственно.

Изменения содержания общего азота и подвижного фосфора не были статистически значимыми.

Таким образом, проведенное исследование показало, что максимальная минерализация органического вещества протекала в вариантах с дерново-подзолистой глинистой почвой, отличающейся изначально низким содержанием почвенного органического вещества. На вариантах с дерново-подзолистыми суглинистыми и супесчаными почвами процессы минерализации и накопления почвенного органического вещества были несколько ниже. Самые низкие показатели отмечали для варианта с болотной торфяной верховой почвой, что возможно было связано с недостаточным временем перестройки микробного пула на минерализацию органического вещества, токсичностью привнесенных с водорослями фукус морских солей, нехваткой питательных элементов и нарушением оптимального соотношения C:N, необходимого для роста и развития микроорганизмов.

5.1.2. Влияние отходов целлюлозно-бумажной промышленности на содержание тяжелых металлов в почвах

При рекультивации почв, особенно в зонах с повышенным уровнем загрязнения и антропогенной нагрузки, важно как стимулирование плодородия восстановленных почв, так и уменьшение токсичности окружающей среды.

Лигносulfонат натрия (ЛН) и активный ил (АИ) имеют доказанную способность к улучшению физико-химических свойств почв [Левандовская, Чупакова, 2005; Согрина и др., 2018; Barbieri et al., 2020; Savy et al., 2022; Sobek et al., 2023] и, кроме того, обладают характеристиками, позволяющими предположить их перспективное использование в качестве агентов для иммобилизации загрязняющих веществ [Ariyanta et al., 2023; Kurniawan et al., 2022].

Для оценки влияния ЛН и АИ на содержание ТМ и металлов в почвах было проведено исследование по использованию различных доз ЛН и АИ в почвенных смесях при компостировании. Опыт проводили в лабораторных условиях. В качестве почвенной основы использовали: дерново-подзолистую почву разного гранулометрического состава (супесчаную (ДПСпп), суглинистую (ДПСгп) и

глинистую (ДПГп)); слаборазложившийся сфагновый торфяной горизонт болотной верховой торфяной почвы (БВТп).

В вегетационные сосуды без дренажа помещали по 1 кг почвы и добавку ЛН или АИ в дозе 1%, 2,5%, 5% и 10% от сухого веса почвы. Для опыта с ЛН использовали подзолистую суглинистую почву и болотную верховую торфяную. Действие АИ тестировали также на подзолистой глинистой и подзолистой песчаной почвах. После тщательного перемешивания варианты увлажняли до уровня 70 % от полной влагоемкости и инкубировали при постоянной температуре 23° С и перемешивании раз в неделю в течение 90 суток. Каждый вариант был представлен в трехкратной повторности.

Анализ на содержание ТМ и металлов в валовом содержании и подвижной форме проводили по завершении инкубирования. Определяли валовые и подвижные формы магния (Mn), меди (Cu), цинка (Zn), никеля (Ni), свинца (Pb) и кадмия (Cd), кобальта (Co) и хрома (Cr). Исследовали валовое содержание и содержание подвижных форм таких металлов, как железо (Fe), алюминий (Al), титан (Ti) и молибден (Mo) в почвах.

В целом, исходно почвы соответствовали санитарным нормам и генетическим особенностям почвообразования [САНПИН 1.2.3685-21; Ганжара, 2001; Федорец и др., 2015]. Превышение уровней ОДК и ПДК были отмечены для песчаной почвы (ДПСпп) в валовом содержании кадмия (0,8 мг/кг при ОДК 0,5 мг/кг) и для глинистой почвы (ДПГп) в содержании подвижной формы цинка, соответственно (24 мг/кг при ПДК 23 мг/кг).

Внесение добавок ЛН и АИ имело схожее влияние на изменение состава ТМ и металлов, но не всегда положительное. Корреляционной связи с дозой добавки не обнаруживалось. Прослеживалась зависимость в увеличении валовой и подвижной форм Pb и подвижных форм Fe и Mn при использовании добавок, что могло происходить вследствие исходного содержания этих элементов в промышленном растительном сырье.

Оценка направленности влияния типа почв и внесения добавок ЛН и АИ на каждый из элементов ТМ и металлов в валовой и подвижной форме с помощью статистического анализа корреляционной зависимости показала, что влияние добавок сильно зависело, как от начального содержания определяемых элементов, так и от типа почвы и ее агрохимического и гранулометрического состава.

Таким образом, проведенное исследование выявило наличие зависимости между внесением добавок лигносульфоната натрия и активного ила в болотную верховую торфяную почву и подзолистую почву разного гранулометрического состава и содержанием в них тяжелых металлов магния, меди, цинка, никеля, свинца, кадмия, кобальта и хрома, и металлов железа, алюминия, титана и молибдена. Применение добавки активного ила по сравнению с лигносульфонатом натрия было более эффективно, при этом лучший положительный эффект на снижение содержания подвижных форм ТМ и металлов оказало внесение активного ила на подзолисто-песчаной почве. Кроме того, наблюдалось также повышение валового содержания некоторых элементов в готовых смесях почвы с добавками, что указывало на предшествующее загрязнение добавок этими элементами.

5.2. Применение полимерных структурообразователей

Степень взаимодействия полимерных структурообразователей с почвами и их структурирующая способность зависит от свойств как почв, так и полимерных материалов (ПМ) [Курочкина и др., 2013; Панова и др., 2020; Situ et al, 2023].

5.2.1. Использование анионного полимерного структурообразователя на основе полиакрилонитрила

Исследовали противозерозионное влияние на почвогрунты полимера торговой марки «Реагент ВПРГ (сухой гипан)» (ВПРГ), имеющего в основе анионный гидролизованный полиакрилонитрил. В качестве почвенных оснований использовали: легкоглинистый агрочернозем среднеэродированный (АЧ) [Сулейманов, Сайфуллин, 2017]; песчаный грунт (П); глинистый грунт (Г). В опыте использовался взрыхленный материал для создания условий, схожих с обратной засыпкой почв при рекультивации. Подготовку вариантов проводили по следующей схеме: без обработки раствором ВПРГ (контроль); с обработкой раствором ВПРГ в концентрации 10,6 г/л (С) для углов 3°, 7° и 15°, и в концентрациях 21,2 г/л (С_{x2}) и 42,4 г/л (С_{x4}) для уклона 15°. Для каждого варианта обработки использовалось по три сосуда.

В лабораторных условиях на дождевальной установке [Соболь и др., 2017] использовали три угла уклона в 3, 7 и 15° для учета влияния склона на интенсивность водной эрозии [Хакбердиев, 2020] и скорость дождевания, соответствующую сильному ливню (6–7 мм/мин) для создания экстремальных условий, способствующих развитию эрозионных процессов. Сосуды с вариантами помещали на дождевальную площадку и фиксировали время до начала стока (смыва вещества). После начала стока опыт проводили в течении 30 мин, отбирая промежуточные пробы стока на 0, 3, 5, 8, 15 и 30 минуте. Весь поверхностный сток собирали на фильтр для последующего высушивания и взвешивания смытого вещества почвогрунтов (таблица 5.2).

Таблица 5.2. Результаты опыта по дождеванию

№	Угол	Почвогрунт	Вариант опыта	Вес остатка, г	Начало смыва, мин
1	3°	Агрочернозем	АЧ-3 контроль	44±20	11±1
2			АЧ -3 ВПРГ-С	10±9	12±1
3		Песок	П-3 контроль	3±1	8±1
4			П-3 ВПРГ-С	3±1	10±0
5		Глина	Г-3 контроль	132±123	4±1
6			Г-3 ВПРГ-С	118±73	6±2
7	7°	Агрочернозем	АЧ -7 контроль	317±78	9±1
8			АЧ -7 ВПРГ-С	87±7	14±1
9		Песок	П-7 контроль	482±65	8±1
10			П-7 ВПРГ-С	146±90	10±2
11		Глина	Г-7 контроль	621±276	2±1

12			Г-7 ВПРГ-С	610±226	5±1
13	15°	Агрочернозем	АЧ-15 контроль	700±289	7±3
14			АЧ-15 ВПРГ-С	346±286	12±2
15			АЧ-15 ВПРГ-С _{x2}	48,03±43,06	9±1
16			АЧ-15 ВПРГ-С _{x4}	23,54±3,51	11±1
17			Песок	П-15 контроль	3516±367
18		П-15 ВПРГ-С		3615±356	8±0
19		П-15 ВПРГ-С _{x2}		3821,51±652,89	8±1
20		П-15 ВПРГ-С _{x4}		4022,36±882,56	10±1
21		Глина	Г-15 контроль	2072±538	1±0
22			Г-15 ВПРГ-С	2171±284	5±1
23			Г-15 ВПРГ-С _{x2}	5287,39±171,37	5±1
24			Г-15 ВПРГ-С _{x4}	3827,81±383,71	6±1

Обработка почвогрунтов ВПРГ-С имела положительные результаты на всех углах уклона по снижению количества смытого вещества и увеличению времени смыва только на агрочерноземе. Увеличенные концентрация ВПРГ также положительно влияли только на агрочернозем, снижая количество смытого вещества, но не на время начала стока. Действие на пробы глины и песка было отрицательным и в основном ухудшалось с увеличением концентрации ВПРГ.

Таким образом, применение анионного полимера на основе полиакрилонитрила на углах уклона поверхности до 15° имеет перспективное значение для агрочернозема в качестве реагента, снижающего действие факторов, приводящих к водной эрозии. Установлена наиболее эффективная концентрация ВПРГ в 10,71 г/л, что соответствует дозе 106 кг/га при растворении в 10 м³ воды.

5.2.2. Использование интерполиэлектrolитного комплексного структурообразователя

Известно, что применение полимерных структурообразователей может быть более эффективно при использовании смеси анионных и катионных полимеров или т.н. интерполиэлектrolитных комплексов (ИПЭК) [Панова и др., 2020; Новоскольцева и др., 2021; Якименко и др., 2021].

При дождевании на лабораторной установке [Соболь и др., 2017] изучили влияние использования анионного и катионного полимеров, а также их смесей, представляющих собой ИПЭК, на противоэрозионные свойства смоделированной рекультивированной поверхности почвы. В качестве почвы использовали легкоглинистый агрочернозем (АЧ) [Сулейманов, Сайфуллин, 2017]. Анионный полимер был представлен полимерной композицией «Реагент ВПРГ (сухой гипан)» (ВПРГ) [Барахнина, 2012; Нозадзе, 2014], катионный – полимерной композицией «ВПК-402» (ВПК) [Агзамов и др., 2021; Кузнецова, 2021].

Проводилась следующая подготовка вариантов: без обработки ПМ (контроль); с обработкой раствором одного из полимеров: ВПРГ в концентрациях 10,6 г/л (ВПРГ-С), 21,2 г/л (ВПРГ-С_{x2}) и 42,4 г/л (ВПРГ-С_{x4}) или ВПК в концентрации 28 мл/л (ВПК-С), 57 мл/л (ВПК-С_{x2}), 114 мл/л (ВПК-С_{x4}) и 14 мл/л (ВПК-С_{1/2}); с обработкой ИПЭК на основе смеси полимеров в концентрациях:

ВПРГ 10,6 г/л и ВПК 14 мл/л (ВПРГ-С:ВПК-С^{1/2}), ВПРГ 10,6 г/л и ВПК 7 мл/л (ВПРГ-С:ВПК-С^{1/4}), ВПРГ 7,14 г/л и ВПК 14 мл/л (ВПРГ-С^{2/3}:ВПК-С^{1/4}) и ВПРГ 7,14 г/л и ВПК 3,5 мл/л (ВПРГ-С^{2/3}:ВПК-С^{1/8}). Для каждого варианта обработки использовалось по три сосуда.

В лабораторных условиях на дождевальной установке [Соболь и др., 2017] использовали уклон 15° и скорость дождевания, соответствующую сильному ливню (6–7 мм/мин) для создания экстремальных условий, способствующих развитию эрозионных процессов. Сосуды с вариантами помещали на дождевальную площадку и фиксировали время до начала стока (смыва вещества). После начала стока опыт проводили в течении 30 мин, отбирая промежуточные пробы стока на 0, 3, 5, 8, 15 и 30 минуте. Весь поверхностный сток собирали на фильтр для последующего высушивания и взвешивания смытого вещества почвогрунтов (таблица 5.3).

Таблица 5.3. Пиковые и средние значения количества смытого вещества и времени появления стока при дождевании агрочернозема, обработанного одним из растворов ВПРГ, ВПК, ИПЭК

ПМ	Вариант	Вес остатка, г			Начало смыва, мин		
		max	min	средн.	max	min	средн.
ВПРГ	ВПРГ-С	632	60	346±286	13	10	12±2
	ВПРГ-С _{x2}	91	5	48±43	10	8	9±1
	ВПРГ-С _{x4}	27	20	24±4	12	10	11±1
ВПК	ВПК-С	8	1	5±4	10	10	10±0
	ВПК-С _{x2}	4	1	2±2	10	10	10±0
	ВПК-С _{x4}	1	1	1±0	12	11	11±1
	ВПК-С ^{1/2}	11	8	10±1	10	10	10±0
ИПЭК	ВПРГ-С:ВПК-С ^{1/2}	0	0	0±0	16	15	16±1
	ВПРГ-С:ВПК-С ^{1/4}	0	0	0±0	14	12	13±1
	ВПРГ-С ^{2/3} :ВПК-С ^{1/2}	2	0	1±1	22	13	18±5
	ВПРГ-С ^{2/3} :ВПК-С ^{1/8}	5	2	3±1	10	10	10±0

Применение ИПЭК снизило смыв вещества относительно контроля на 99,47–99,97 % в зависимости от состава и увеличило время начала стока на 4–11 мин. Кроме того, для всех вариантов кроме смеси с наименьшими концентрациями ВПРГ-С^{2/3}:ВПК-С^{1/8} время начала стока увеличивалось также относительно вариантов с обработками только ВПРГ или ВПК даже в высоких концентрациях (Таблица 5.3). При этом снижение концентраций каждого из полимеров в смеси приводило к увеличению количества смытого вещества, но уменьшение концентрации ВПРГ относительно концентрации ВПК до отношения ВПРГ-С^{2/3}:ВПК-С^{1/2} вело к увеличению времени начала смыва (таблица 5.3). Наиболее успешный вариант представлял собой ИПЭК в составе ВПРГ-С^{2/3}:ВПК-С^{1/2}.

Таким образом, применение ИПЭК даже с дозами полимеров, концентрация которых в смеси ниже, чем при одиночном использовании, вело к значительному снижению смыва вещества и увеличению времени начала стока даже на высоком угле уклона 15° (таблица 5.3).

5.2.3. Проверка фитотоксичности полимерных структурообразователей

Оценивали фитотоксичность применения на легкоглинистом агрочерноземе (АЧ) [Сулейманов, Сайфуллин, 2017] анионного полимера на примере полимерной композицией «Реагент ВПРГ (сухой гипан)» (ВПРГ) [Барахнина, 2012; Нозадзе, 2014], катионного полимера на примере полимерной композиции «ВПК-402» (ВПК) [Агзамов и др., 2021; Кузнецова, 2021], и их смесей, образующих интерполиэлектролитные комплексы (ИПЭК). В качестве тест-культуры использовали растение клевера красного [Шабалина, Демьяненко, 2012; Абузов и др., 2023]. Фитотоксичность применения полимерных материалов оценивали по изменению среднего веса свежей массы верхней части растений относительно контроля.

Проращивание клевера красного проводили в лабораторных условиях в течение 30 дней при температуре 18–20°. Для этого в пластиковые сосуды без дренажа помещали 500 г воздушно-сухого, очищенного от растительных остатков АЧ, на поверхности которого размещали 1,5 г семян примерно одного размера и цвета. Подготовленные варианты поливали дистиллированной водой. Первый полив осуществлялся раствором полимера в 300 мл дистиллированной воды на сосуд в зависимости от варианта обработки по следующей схеме: без полимера (контроль); раствор ВПРГ в концентрациях 10,6 г/л (ВПРГ-С), 21,2 г/л (ВПРГ-С_{x2}) или 42,4 г/л (ВПРГ-С_{x4}); раствор ВПК в концентрациях 28 мл/л (ВПК-С), 57 мл/л (ВПК-С_{x2}) или 114 мл/л (ВПК-С_{x4}); 150 мл раствора ВПК с концентрацией 28 мл/л + 150 мл раствора ВПРГ с концентрацией 10,6 г/л (ИПЭК ВПК-С:ВПРГ-С); 150 мл раствора ВПК с концентрацией 14 мл/л + 150 мл раствора ВПРГ с концентрацией 42,4 г/л (ИПЭК ВПК-С_{1/2}:ВПРГ-С_{x4}). Каждый вариант был исполнен трижды.

После окончания срока опыта верхнюю часть растений аккуратно срезали на уровне поверхности почвы и сразу взвешивали.

Прорастание семян началось во всех сосудах на второй день опыта. Средняя всхожесть составила 95,0±1,5% по всем вариантам, в том числе на контроле. Растения к окончанию опыта развились до фазы прикорневой розетки листьев во всех сосудах, но визуально плотность травостоя различалась между вариантами.

Наибольшая средняя масса свежей верхней части растения была получена в варианте с использованием ВПРГ-С: 7,11±0,22 г, наименьшая – при использовании ИПЭК в составе ВПК-С:ВПРГ-С: 2,80±0,11 г.

Средний прирост свежей массы верхней части растения в основном был выше на 17–25 %, чем на контроле, фитотоксическое воздействие на рост клевера красного проявлялось в вариантах с использованием ВПК-С_{x4} (снижение массы до 93 % от контроля) и обеих смесей ИПЭК (до 49–58 %).

В целом, использование полимера анионного полимера в дозе до 42,4 г/л не оказывало фитотоксического влияния на рост клевера красного, напротив, способствуя увеличению массы верхней части растения относительно контроля на 19–25 %. Применение катионного полимера также имело стимулирующее рост влияние при использовании концентраций до 114 мл/л (прирост свежей массы

верхней части растения на 17–20 %), но при концентрации 114 мг/л наблюдалось угнетение роста клевера красного, отражающееся в снижении свежей массы его надземной части. Применение ИПЭК оказывало значительное фитотоксическое влияние на рост клевера красного, при этом увеличение дозы катионного полимера относительно анионного в смеси приводило к более значительному угнетению роста растений.

ВЫВОДЫ

1. Для Башкирского Зауралья в Баймакском и Хайбуллинском районах на шести объектах с техногеннонарушенным почвенным покровом (отвалы карьеров и карьеры) процесс самовосстановления начался только на двух участках длительного периода заброшенности и не имел прямой зависимости от исходных агрохимических свойств почв и содержания в них тяжелых металлов и мышьяка. По сравнению с фоновыми природными почвами свойства техногеннонарушенных участков имели тенденцию к быстрой потере питательных веществ после снятия или нарушения почвенного слоя и более медленной перестройкой микробиологических сообществ, но для первичных почв техногеннонарушенных участков было характерно более быстрое восстановление питательных веществ, чем восстановление стабильного состава микробиоты. Степень самовосстановления зависела от текущей антропогенной нагрузки на формирующиеся почвы и от типов растительности, произрастающей на них.

2. В таксономическом составе техногеннонарушенных участков и фоновых природных почв преобладали филумы Actinobacteria и Proteobacteria, в меньшем количестве присутствовали Acidobacteria и Bacteroidetes. Для техногеннонарушенных участков наблюдалось снижение в составе микробных сообществ доли Actinobacteria и увеличение доли Proteobacteria и Bacteroidetes. Во всех почвенных образцах природного фона и техногеннонарушенных территорий без признаков первичного почвообразования присутствовало значительное количество представителей филумов бактерий Verrucomicrobia и архей Thaumarchaeota. В то же время данных филумов в формирующихся первичных почвах на техногеннонарушенных участках не обнаружено.

3. В результате компостирования отхода деревообрабатывающей промышленности лигносульфоната натрия с мелкоземом карьера в соотношениях 0,5:1, 1:1 и 2:1 получили технозоли с высокими агрохимическими показателями, низкой фитотоксичностью и способностью к влагоудержанию.

Использование высоких доз лигносульфоната натрия при создании технозолей способствует эффективной и экологически безопасной утилизации отходов деревообрабатывающей промышленности.

4. Применение промышленных отходов глубокой переработки водорослей *Fucus vesiculosus* L. в дозах 0,5 %, 2 %, 5 % и 10 % от количества субстрата при компостировании с дерново-подзолистыми почвами разного гранулометрического состава увеличивает содержание органического вещества и растворимых почвенных катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ и K^+ , и способствует раскислению почв.

5. Применение отходов деревообрабатывающей промышленности лигносульфоната натрия и активного ила в дозах 1 %, 2,5 %, 5 % и 10 % от количества субстрата при компостировании с дерново-подзолистыми почвами разного гранулометрического состава и болотной торфяной верховой почвой влияет на валовое содержание и подвижность в данных почвах тяжелых металлов магния, меди, цинка, никеля, свинца, кадмия, кобальта и хрома, и металлов железа, алюминия, титана и молибдена. Направленность и степень действие

добавок зависит от типа почвы, ее агрохимического и гранулометрического состава и от начального содержания определяемых элементов.

6. Исследование устойчивости легкоглинистого агрочернозема, глинистого и песчаного грунтов к водной эрозии при дождевании на лабораторной установке выявило, что степень проявления последствий водной эрозии усиливается при увеличении угла уклона поверхности от 3° до 7° и 15° и при изменении типа грунта от легкоглинистого агрочернозема к глине и песку.

9. Применение полимерного анионного структурообразователя на основе полиакрилонитрила снижает количество смытого вещества и увеличивает время начала стока для легкоглинистого агрочернозема и увеличивает время начала смыва глины при уклоне до 15°. При использовании на песке повышение смыва вещества становится тем сильнее, чем выше уклон и концентрация полимера.

Оптимальная доза полимерного анионного структурообразователя на основе полиакрилонитрила соответствует 106 кг/га при растворении в 10 м³ воды.

10. При дождевании на лабораторной установке на углах уклона 3°, 7° и 15° легкоглинистого агрочернозема с использованием полимерных структурообразователей на основе анионного полимера, катионного полимера и их смеси, представляющей собой интерполиэлектrolитный комплекс выявлено, что применение интерполиэлектrolитных комплексов оказывает большее влияние на снижение смыва и увеличение времени начала стока, чем применение одиночных полимеров даже в повышенных концентрациях.

Наиболее успешный из изученных вариант смеси по воздействию на эрозионную активность представляет собой интерполиэлектrolитный комплекс в состав которого входит анионный полимер в концентрации 7,14 г/л и катионный полимер в концентрации 3,5 мл/л.

11. Оценка фитотоксичности полимерных структурообразователей при проращивании клевера красного на легкоглинистом агрочерноземе показывает, что использование анионного полимера на основе полиакрилонитрила в дозе до 42,4 г/л (максимальной из изученных) способствует увеличению массы верхней части растения относительно контроля на 19–25 %. При использовании катионного полимера стимулирующее рост влияние наблюдается до концентрации 114 мл/л (максимальная из изученных), при которой начинает проявляться фитотоксическое действие на роста клевера красного. Применение интерполиэлектrolитных комплексов оказывает значительное фитотоксическое влияние на рост клевера красного, при этом увеличение дозы катионного полимера в составе приводит к большему угнетению роста растений.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Юркевич М.Г. Изменение содержания тяжелых металлов в почвах при внесении отходов целлюлозно-бумажной промышленности / М.Г. Юркевич, Р.Р. Сулейманов, **Е.С. Дорогая**, А.А. Курбатов // АгроЭкоИнфо. – 2021. – № 5(47).
2. Yurkevich M. Effect of Brown Algae (*Fucus vesiculosus* L.) on Humus and Chemical Properties of Soils of Different Type and Postgermination Growth of Cucumber Seedlings / M. Yurkevich, R. Suleymanov, E. Ikkonen, **E. Dorogaya**, O. Bakhmet // Agronomy. – 2022. – 12. – 1991.
3. Юркевич М.Г. Оценка содержания тяжелых металлов в подзолистой почве различного гранулометрического состава при внесении активного ила как основы нанодобрения (отход целлюлозно-бумажной промышленности) / М.Г. Юркевич, Р.Р. Сулейманов, **Е.С. Дорогая**, А.А. Курбатов // Нанотехнологии в строительстве. – 2022. – 14(6). С. 510–515.
4. **Дорогая Е.С.** О возможности использования лигносульфоната натрия в качестве nanoорганической основы для создания почвоподобных тел в целях рекультивации техногенно-деградированных земель / Е.С. Дорогая, Р.Р. Сулейманов, Е.В. Кузина, М.Г. Юркевич, О.Н. Бахмет // Нанотехнологии в строительстве. – 2023. – Т. 15. – № 4. С. 359–372.
5. **Дорогая Е.С.** Влияние применения полимерных структурообразователей на фитотоксичность агрочернозема / Е.С. Дорогая // Экобиотех. – 2024. – 7(1) – С. 1–7.
6. **Dorogaya E.** Microbiomes of Primary Soils and Mining Heaps of Polymetallic Ore Quarries / E. Dorogaya, E. Abakumov, A. Zverev, E. Novikova, M. Garshin, A. Minnegaliev, R. Suleymanov // Applied Sciences. – 2024. – 14(8) – 3328.
7. **Дорогая Е.С.** Устойчивость почвогрунтов к водной эрозии при обработке полимером на основе полиацетонитрила / Е.С. Дорогая, Р.Р. Сулейманов, А.О. Миннегалиев, И.М. Габбасова, М.А. Комиссаров // Экология и промышленность России. – 2024. – Т. 28. – № 7. – С. 32–36.
8. **Дорогая Е.С.** Гранулометрический состав эрозионных наносов агрочернозема, обработанного полимерным структурообразователем / Е.С. Дорогая Е.С., Р.Р. Сулейманов, А.О. Миннегалиев // АгроЭкоИнфо. – 2024. – № 4.

В материалах и тезисах Всероссийских и международных конференций

9. **Дорогая Е.С.** Использование лабораторной дождевальной установки для оценки эффективности полимерного структурообразователя / Е.С. Дорогая, Р.Р. Сулейманов // Геосфера. Современные проблемы естественных наук: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции, Уфа, 01 декабря 2021 года. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2021. – С. 267–269.
10. **Дорогая Е.С.** Исследование микробиома карьера по добыче строительных материалов в Зауралье Республики Башкортостан / Е.С. Дорогая,

Е.В. Абакумов, М.В. Гаршин, Р.Р. Сулейманов, А.О. Миннегалиев // Биологическая рекультивация и мониторинг нарушенных земель: материалы XI Всероссийская научная конференция с международным участием. Сатка, 12–16 сентября 2022 г. – Сатка: Изд-во «Притоника», 2022. – С. 59–62.

11. **Dorogaya E.** Using polymers to reduce water erosion in soils / E. Dorogaya, R. Suleymanov // SOIL Erosion and Torrential Flood: Prevention: Curriculum Development at the Universities of Western Balkan Countries Conference. Abstract book, November 3rd, 2022. – Goç. Belgrade: University, Faculty of Forestry, 2022. – P. 16.

12. **Дорогая Е.С.** Лигносульфонат натрия в смеси с серой лесной почвой для создания почвогрунтов с заданными свойствами / Е.С. Дорогая, Р.Р. Сулейманов, А.О. Миннегалиев, М.Г. Юркевич, О.Н. Бахмет // Актуальные вопросы теории и практики лесного почвоведения: X Всероссийская научная конференция по лесному почвоведению с международным участием, Петрозаводск, 18–22 сентября 2023 г. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2023. – С. 160–161.

13. **Дорогая Е.С.** Создание почвогрунтов на основе лигносульфоната натрия и материала отвалов карьера / Е.С. Дорогая, Р.Р. Сулейманов, А.О. Миннегалиев [и др.] // Почвы и окружающая среда: Всероссийская научная конференция с международным участием, посвященная 55-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, 02–06 октября 2023 года. – Новосибирск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения Российской академии наук, 2023. – С. 527–529.

14. **Дорогая Е.С.** Влияние полимера на основе полиакрилонитрила на интенсивность смыва почвогрунтов / Е.С. Дорогая // Современные проблемы биологии, наук о Земле, спорта и туризма: Всероссийская научно-практическая конференция, Уфа, 28 ноября 2023 г. – Уфа: РИЦ УУНиТ, 2023. – С. 151–154.

15. **Дорогая Е.С.** Применение полимерного структурообразователя для защиты почв от эрозии / Е.С. Дорогая // Почвы – опора России: тезисы докладов IX съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева, Казань, 12-16 августа 2024 г. – Казань: МАКС-Пресс, 2024. – С. 787–788.