

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук

На правах рукописи



ДОРОГАЯ ЕКАТЕРИНА СЕРГЕЕВНА

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

1.5.19. Почвоведение (биологические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата биологических наук

Уфа – 2026

Работа выполнена в лаборатории почвоведения Уфимского Института биологии – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (УИБ УФИЦ РАН)

Научный руководитель: **Сулейманов Руслан Римович**, доктор биологических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Уфимский Институт биологии, лаборатория почвоведения, главный научный сотрудник.

Официальные оппоненты: **Андроханов Владимир Алексеевич**, доктор биологических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт почвоведения и агрохимии Сибирского Отделения Российской Академии Наук», директор; **Гиниятуллин Камиль Гашикович**, кандидат биологических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Институт экологии, биотехнологии и природопользования, кафедра почвоведения имени И.В. Тюрина, доцент.

Защита диссертации состоится **«19» июня 2026** года в **14:00** на заседании диссертационного совета ЮФУ 801.01.13 по биологическим наукам на базе Академии биологии и медицины им. Д. И. Ивановского Южного федерального университета по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1, к. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. Ю.А. Жданова Южного федерального университета по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Р. Зорге, 21ж, и на сайте Южного федерального университета <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1348451/>

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Отзыв на автореферат в двух экз. (с указанием даты, полностью ФИО, ученой степени со специальностью, звания, организации, подразделения, должности, адреса, телефона, e-mail), заверенный печатью организации, просим направлять по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1, к. 707, ученому секретарю диссертационного совета ЮФУ 801.01.13 Бурачевская М.В., а также в формате .pdf на e-mail: mburachevskaya@sfedu.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.б.н.



Бурачевская Марина Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Ежегодные потери верхнего почвенного слоя в глобальном масштабе составляют от 10 до 16 миллионов га в год (Pimentel, 2006; Добровольский, 2008; Stockmann et al., 2022), и в условиях изменения климата возрастает вероятность дальнейшего снижения площади плодородных земель вследствие антропогенных воздействий и повышения темпов эрозии почв (Certini, Scalenghe, 2023; Ji et al., 2024). В то же время восстановление техногенно нарушенных участков может значительно улучшить экологическую обстановку в регионе, особенно при рекультивации с использованием отходов, и оптимизировать землепользование (Mukhopadhyay et al., 2014; Mi et al., 2020).

Республика Башкортостан (РБ) является одним из развитых центров горнодобывающей промышленности в Российской Федерации. Открытая разработка залежей полезных ископаемых привела к появлению большого количества техногенно нарушенных территорий (Ангелов и др., 2012; Литовский, Левковский, 2016; Волчков и др., 2018; Кучеровский и др., 2018; Никонов и др., 2022). Для их рекультивации необходима оценка состояния и разработка наиболее целесообразных для каждого участка методов, в том числе с возможностью использования растительных остатков, отходов деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности, а также полимерных структурообразователей для повышения плодородия и противоэрозионной устойчивости почв и грунтов.

Цель: разработка методов повышения плодородия и противоэрозионной устойчивости почв на техногенно нарушенных территориях при использовании органических отходов производств и полимерных структурообразователей.

Задачи: 1) изучить условия, способствующие развитию процесса почвообразования на техногенно нарушенных территориях Башкирского Зауралья; 2) оценить возможность создания техносолой с использованием отходов целлюлозно-бумажного производства (лигносульфоната натрия) для рекультивации техногенно нарушенных почв; 3) изучить влияние внесения лигносульфоната натрия и активного ила на содержание тяжелых металлов в дерново-подзолистой и торфяно-болотной почвах; 4) изучить эффективность использования бурых водорослей *Fucus vesiculosus* L. в качестве мелиорантов для улучшения агрохимических свойств дерново-подзолистых почв; 5) изучить влияние применения полимерных композиций в качестве структурообразователей на устойчивость почв и грунтов к водной эрозии в модельных условиях.

Научная новизна исследований. Впервые определен метагеном микробиоты почв и грунтов отвалов техногенно нарушенных участков Башкирского Зауралья методом секвенирования ДНК. Предложен инновационный метод создания экологически безопасных техносолой для рекультивации техногенно нарушенного участка на основе его грунта, отходов химической переработки древесины и микроорганизмов-биодеструкторов. Показано, что применение в качестве мелиорантов органических отходов глубокой переработки бурых водорослей и целлюлозно-бумажного

производства способствует повышению содержания органического углерода, снижению кислотности и подвижности ряда тяжелых металлов в дерново-подзолистых почвах. Определена эффективность использования полимерных композиций в качестве структурообразователей для повышения устойчивости к водной эрозии чернозема, песка и глины на склонах различной крутизны при моделировании ливневых осадков.

Теоретическая и практическая значимость. Разработанные экологически безопасные техносоли из отходов глубокой переработки бурых водорослей и лигносульфоната натрия могут быть использованы для более быстрого восстановления экосистемных функций почв при рекультивации техногенно нарушенных территорий, повышения плодородия вновь формирующегося почвенного покрова в соответствии с предложенными схемами, а также в качестве мелиорантов пролонгированного действия с постепенным высвобождением питательных элементов. При этом рационально решается задача утилизации большого объема производственных отходов. Выявлены виды, сочетания и дозы полимерных структурообразователей, которые могут быть использованы для повышения устойчивости почв к развитию водной эрозии на склонах различной крутизны.

Положения, выносимые на защиту:

1. Для ускорения процессов самовосстановления почв и восстановления экосистемных функций техногенно нарушенных участков, в том числе, микробиологических и растительных сообществ необходимо проведение рекультивационных мероприятий с учетом региональных особенностей ландшафтов.

2. Техносоли на основе смеси лигносульфоната натрия (отхода целлюлозно-бумажных производств) с грунтом отвала могут быть использованы при нехватке пригодной для обратной засыпки снятого слоя почвы при рекультивации.

3. Внесение органических отходов глубокой переработки водорослей *Fucus vesiculosus* L. и деревообрабатывающей промышленности улучшает агрохимические свойства и не приводит к превышению ПДК и ОДК тяжелых металлов в почвах с низким естественным плодородием.

4. Использование полимерных структурообразователей способствует увеличению устойчивости к водной эрозии чернозема 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 2020–2024 гг. Совместно с научным руководителем были определены основные направления работы, объекты и методы исследований, проведены полевые исследования на карьерах и отвалах Башкирского Зауралья. Лично автором были выполнены опыты по компостированию лигносульфоната натрия с материалами отвалов, оценка фитотоксичности и эксперименты по изучению противоэрозионной устойчивости почвы, песка и глины с

использованием полимерных структурообразователей при моделировании ливневых осадков. Выполнены модельные лабораторные исследования, в том числе, совместно с сотрудниками лаборатории почвоведения УИБ УФИЦ РАН и лаборатории экологического мониторинга и моделирования Отдела комплексных научных исследований КарНЦ РАН были. 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).

По материалам диссертации опубликовано 18 работ, в том числе в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК – 3, в научных изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science – 2, индексируемых в РИНЦ – 1.

Диссертация состоит из введения, 6 глав, выводов, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложений. Список литературы включает 392 источников, в том числе 217 работ зарубежных авторов. Диссертация изложена на 187 страницах машинописного текста, включает 20 таблиц, 21 рисунок и 2 приложения.

Соответствие паспорту специальности. Тема диссертации соответствует паспорту научной специальности 1.5.19. Почвоведение по пунктам 1 (Теор. проблемы генезиса и географии почв, их естественной и антропогенной эволюции), 6 (Техногенное и агрогенное хим. загрязнение почв, изменение их естественной кислотности, хим. состава и физико-химических свойств), 7 (Метагеном почв), 8 (Оценка плодородия почв и мониторинг его состояния), 12 (Охрана почв и почвенного покрова от деградации).

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., д.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 члену-корреспонденту РАН, д.б.н. Бахмет О.Н. и к.с-х.н. Юркевич М.Г., а также профессору СПбГУ 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 утраченных плодородных территорий (обзор литературы)

Приводится обзор методов борьбы с наиболее распространенным видом почвенной деградации – эрозией почв (Герасимов, 2019; Научные основы защиты почв от деградации..., 2022; Práválie, 2021). Рассматриваются способы использования в качестве противоэрозионных почвенных добавок органических отходов производств (Магомедов, Абдуллаев, 2021; Adediran et al., 2012; Duhan et al., 2020; Hafez et al., 2022; Sheoran et al., 2021) и полимерных структурообразователей (Курочкина и др., 2013; Панова и др., 2020; Khabirov et al., 1998; Novoskoltseva et al., 2021; Luan et al., 2023). Приводятся факты в пользу недостаточности применения мер противоэрозионной обработки почв для обеспечения потребности населения в плодородных землях (Zhao et al., 2019). Рассматриваются возможности возвращения техногенно нарушенных участков в земельный фонд (Mukhopadhyay et al., 2014; Mi et al., 2020). Описаны методы оценки техногенно нарушенных территорий для выбора оптимального способа их рекультивации, и основные стратегии восстановления (Heerngoien et al., 2021; Wang et al., 2021; Wang et al., 2023; Maurice et al., 2024; Webb et al., 2024). Делаются выводы о низкой степени рекультивации утраченных 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

Объектами исследований явились: грунты, вновь формирующиеся и фоновые почвы заброшенных нерекультивированных отвалов и карьеров Баймакского и Хайбуллинского районов, расположенных в Зауралье РБ. Для модельных исследований были использованы: чернозем выщелоченный, аллювиальный песок, делювиальная глина в опыте с полимерными структурообразователями; торфяно-болотная и дерново-подзолистые почвы разного гранулометрического состава в опытах по использованию лигносульфоната натрия, активного ила и отходов глубокой переработки бурых водорослей *Fucus vesiculosus* L. Лабораторно-аналитические исследования проводили общепринятыми методами (Аринушкина, 1970; Агрохимические..., 1975; Вадюнина, Корчагина, 1986). Содержание тяжелых металлов определяли методами инверсионной вольтамперометрии (Achterberg, van den Berg, 1994), масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и атомно-абсорбционным (Воробьева, 2006); обменные катионы (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) определяли атомно-абсорбционным спектрофотометром по методике (Van Reeuwijk, 2002); анализ химического состава отхода переработки водорослей *Fucus vesiculosus* L. проводили по (ГОСТ 26185-84; Zhang et al., 2009) в лаборатории ФГБУ "РосАгрохимслужба". Микробиоту грунтов и формирующихся почв

исследовали в лаборатории ФГБНУ ВНИИСХМ 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; в качестве обучающего набора последовательностей (124) использовалась библиотека справочных данных SILVA (Quast et al., 2013). Эксперименты по оценке устойчивости чернозема, песка и глины, обработанных полимерными структурообразователями, к водной эрозии проводили на лабораторной дождевальном установке (Соболь и др., 2017) при уклонах 3°, 7°, 15° и интенсивности дождевания 6–7 мм/мин. Определяли время начала стока, мутность и массу твердого стока. Гранулометрический состав определяли лазерным дифракционным анализатором размера частиц «Ласка-ТД» (Госреестр СИ РФ №72792-18). Результаты анализов обрабатывались статистически с помощью программы Excel.

3. Почвообразование на техногенно нарушенных территориях

Исследования агрохимических свойств почв и грунтов техногенно нарушенных участков (ТНУ) в сочетании с методом метагеномной оценки разнообразия почвенных микроорганизмов проводились на следующих карьерах и отвалах:

1. ТНУ Тубинский: отвал, самовосстановление >60 лет (на 2021 г.), без естественного почвенного покрова, обнаружены участки формирования почвы под степной растительностью. Агрохимические показатели: рН H₂O – 7,62; органический углерод (Сорг.) – 1,4 %, щелочногидролизуемый азот (Нщел) – 84 мг/кг. Фон: ненарушенный участок, почвенный покров представлен маломощным (до 8 см) литозёмом под степной растительностью. Агрохимические показатели: рН H₂O – 5,77; Сорг – 9,6 %, Нщел – 448 мг/кг.

2. ТНУ Куль-Юрт-Тау: отвал, самовосстановление >35 лет (на 2021 г.), без почвенного покрова, обнаружены отдельные участки формирования почвы, предположительно частично сформированных на месте, частично наносного характера, под молодыми зарослями березы. Агрохимические показатели грунта, перемешанного с подстилкой: рН H₂O – 6,16; Сорг – 6,1 %, Нщел – 336 мг/кг. Фон: ненарушенный участок, почвенный покров представлен маломощным (до 10 см) литозёмом под степной растительностью. Агрохимические показатели: рН H₂O – 6,63; Сорг – 4,5 %, Нщел – 224 мг/кг.

3. ТНУ Семеновский: отвал, не более 1 года самовосстановления (на 2021 г.), без признаков формирования почвенного покрова. Агрохимические показатели: рН H₂O – 7,27; Сорг – 2,1 %, Нщел – 98 мг/кг. Фон: ненарушенный участок, почвенный покров представлен литозёмом (мощностью до 17 см) под степной растительностью. Агрохимические показатели: рН H₂O – 6,57, Сорг – 3,8 %, Нщел – 182 мг/кг.

4. ТНУ Туба-Каин: отвал, не более 6 лет самовосстановления (на 2021 г.), без признаков формирования почвенного покрова. Агрохимические показатели:

pH H₂O – 7,35; Сорг – 0,3 %, Нщел – отсутствует (<0,1 мг/кг). Фон: ненарушенный участок, почвенный покров представлен маломощным (до 11 см) литозёмом под степной растительностью. Агрохимические показатели: pH H₂O – 6,68, Сорг – 2,8 %, Нщел – 126 мг/кг.

5. ТНУ карьер стройматериалов: отвал, самовосстановление не менее 35 лет (на 2021 г.), без признаков формирования почвенного покрова. Агрохимические показатели: pH H₂O – 7,62, Сорг – 0,9 %, Нщел – 42 мг/кг. Фон: ненарушенный участок, почвенный покров представлен маломощным (до 11 см) литозёмом под степной растительностью. Агрохимические показатели: pH H₂O – 6,14; Сорг – 5,1 %, Нщел – 252 мг/кг.

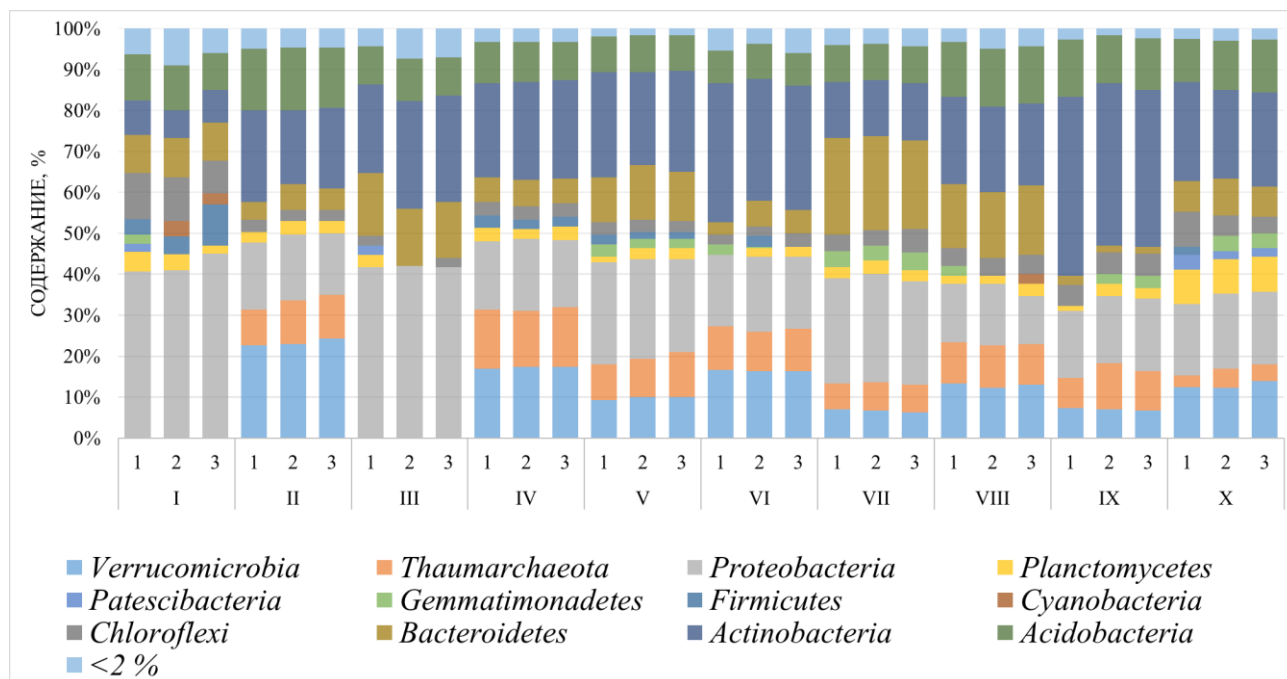
6. ТНУ Бурибай: отвал, самовосстановление не менее 35 лет (на 2021 г.), почвенный покров не сформирован. Агрохимические показатели: pH H₂O – 2,78; Сорг – 1,8 %, Нщел – не определяется. Фон: ненарушенный участок, почвенный покров представлен маломощным (до 12 см) литозёмом под степной растительностью. Агрохимические показатели: pH H₂O – 5,71, Сорг – 1,7 %, Нщел – 84 мг/кг.

Визуальный анализ участков показал, что грунты отвалов находились на стадии первичного почвообразовательного процесса. На ТНУ Куль-Юрт-Тау выявлено образование подстилки средней мощности под пологом берез. На ТНУ Тубинский на дне карьера образовался дерн и прослеживалось образование слабо выраженного очёса. На остальных исследованных ТНУ, а также на крутых склонах Куль-Юрт-Тау и Тубинский образования подстилки и формирования гумусово-аккумулятивного горизонта не происходило.

Выявлена общая тенденция изменения агрохимических показателей грунтов ТНУ по сравнению с фоном в сторону нейтрализации кислотности, снижения содержания органического углерода и щелочногидролизующего азота. При этом не выявлено превышение ПДК и ОДК валовых форм Pb, Cd, Hg, Zn, Cu, Ni и As, а также подвижных Zn, Cu, Ni.

Таксономический состав микробиоты грунтов и фоновых почв был представлен в основном суммой следующих прокариотных фил: бактерий *Acidobacteria*, *Actinobacteria*, *Bacteroidetes*, *Chloroflexi*, *Cyanobacteria*, *Firmicutes*, *Gemmatimonadetes*, *Patiscibacteria*, *Planctomycetes*, *Proteobacteria* и *Verrucomicrobia* и архей *Thaumarchaeota* (рис. 1).

Actinobacteria и *Proteobacteria* являлись доминирующими филами, что характерно для большинства бактериальных почвенных сообществ (Васмага 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 Тубинский и Куль-Юрт-Тау.



где I – ТНУ Тубинский, II – Фон Тубинский, III – ТНУ Куль-Юрт-Тау, IV – Фон Куль-Юрт-Тау, V – ТНУ Семеновский, VI – Фон Семеновский, VII – ТНУ Туба-Каин, VIII – Фон Туба-Каин, IX – Фон карьер стройматериалов, X – Фон Бурибай.

Рисунок 1. Относительная представленность бактериальных фил в микробных сообществах ТНУ и их фоновых участков

Альфа-разнообразие показало необычно высокий уровень дисперсии для грунтов ТНУ Куль-Юрт-Тау и ТНУ Тубинский, а бета-разнообразие – наличие выраженной кластеризации почв ТНУ, хотя микробное сообщество ТНУ Семеновский было сходно с группой фоновых почв.

Нарушенные участки характеризовались резкой потерей питательных веществ и менее заметной перестройкой микробиологических сообществ. В почвах, формирующихся на ТНУ, наблюдалась обратная зависимость: увеличение содержания питательных веществ происходило быстрее, чем восстановление стабильного состава микробиоты, и во многом определялось текущей антропогенной нагрузкой на формирующиеся почвы и типом растительности, произрастающей на этих новых почвах. В целом процесс самовосстановления техногенно нарушенных участков не зависел от исходных агрохимических свойств почв и содержания в них тяжелых металлов и мышьяка.

4. Применение органических отходов для повышения плодородия и устойчивости почв рекультивируемых территорий

4.1. Использование лигносульфоната натрия для создания техносолей в целях рекультивации техногенно нарушенных территорий. Эффективным и экономически целесообразным методом восстановления техногенно нарушенных территорий может стать применение искусственно улучшенных почв или целенаправленно изготовленных техносолей (Коваленко и др., 2008; O'Brien et al, 2017). Перспективным материалом для использования в качестве

основы при создании техносолой является отход химической переработки древесины – лигносульфонат натрия (ЛН) и, кроме того, обладает свойствами, перспективными для иммобилизации загрязняющих веществ (Левандовская, Чупакова, 2005; Kurniawan et al., 2022).

В лабораторном опыте исследовали агрохимические свойства смесей грунтов (Г) и ЛН, компостированных в течение трех месяцев при внесении микроорганизмов-биодеструкторов (М) – штаммов *Acinetobacter calcoaceticus* UOM 22 и *Pseudomonas kunmingensis* СА 3 (Кузина и др., 2022; Korshunova et al., 2022) и/или аммиачной селитры (марки N-33%). Смеси готовили в пропорциях Г:ЛН = 1:½, 1:1 и 1:2 (без внесения добавок, с добавкой 1 г удобрения (0,34 г д.в.) или 1 г удобрения + М в дозе 1 мл (= 10⁹ КОЕ)/300 г субстрата). Каждые две недели отбирали промежуточные пробы, которые замораживали для деактивации действия микроорганизмов сразу после взятия. Всего было выполнено семь промежуточных отборов проб, и одна – из готовых смесей после компостирования.

Внесение ЛН в Г приводило к образованию на поверхности субстрата вязкой пленки, препятствующей интенсивному испарению влаги и существенно изменяло его агрохимические свойства (табл. 1).

Таблица 1. Агрохимические свойства смеси грунта (Г) и лигносульфата натрия (ЛН)

Вариант	pH KCl	Сорг, %	Нщел, мг/кг
Г	3,1±0,1	0,6±0,1	42,0±0,1
Г + М	3,0±0,1	0,6±0,1	47,3±3,3
Г + N + М	3,3±0,1	0,7±0,1	458,5±17,5
Г + ½ЛН	4,0±0,1	28,3±0,9	42,0±0,2
Г + ½ЛН + N	3,8±0,1	27,2±1,0	197,8±8,1
Г + ½ЛН + N + М	3,9±0,1	29,3±1,4	362,3±25,7
Г + ЛН	4,1±0,1	39,3±2,9	43,8±1,8
Г + ЛН + N	4,0±0,1	35,6±2,2	266,0±15,4
Г + ЛН + N + М	4,0±0,1	43,2±3,2	238,0±21,5
Г + 2ЛН	4,1±0,1	57,2±3,3	52,5±12,6
Г + 2ЛН + N	4,1±0,1	52,4±3,0	271,3±14,0
Г + 2ЛН + N + М	4,2±0,1	55,9±2,9	134,8±4,5

При внесении ЛН по всем вариантам опыта произошла нейтрализация кислотности в среднем на 1 единицу pH; Сорг возрастало пропорционально дозе ЛН; на содержание щелочногидролизуемого азота существенное влияние оказывало только внесение аммиачной селитры. С увеличением срока компостирования смесей наблюдалось снижение кислотности и содержания органического углерода и щелочногидролизуемого азота.

После завершения опыта полученные смеси проверяли на фитотоксичность при проращивании семян скороспелого редиса (Филатов и др., 2021). Фитотоксическое действие оценивали по количеству проросших семян через 48 часов и сухой массе проростков, собранных на 4 сутки с начала опыта. Всхожесть семян во всех вариантах была 100 %. Только в смеси Г + ½ЛН проявилась

«слабая» степень фитотоксичности ($\Phi = 23,35$ (Привалова и др., 2006)), остальные варианты не проявляли фитотоксического действия ($\Phi < 20$).

Таким образом, при всех соотношениях грунта и ЛН смеси содержали значительное количество органического углерода, в них наблюдалось снижение избыточной кислотности и интенсивности влагоиспарения, практически не проявлялась фитотоксичность. Такие смеси вполне пригодны для рекультивации техногенно нарушенных территорий.

4.2. *Использование бурых водорослей для улучшения агрохимических свойств почв.* Бурые водоросли *Fucus vesiculosus* L. применяются в пищевой и фармакологической промышленности (Подкорытова и др., 2020; Golshany et al., 2024), а отходы их переработки могут использоваться в качестве мелиорантов. Полисахариды бурых водорослей обладают высокой биологической активностью при внесении в почвы (Chatterjee et al., 2017; Dmytryk et al., 2018; Janceva et al., 2019; Saadaoui et al., 2019), но состав водорослей часто зависит от времени сбора и способа обработки. В наших исследованиях использовались отходы следующего состава: $2,10 \pm 0,03$ мг галловой кислоты/г фенольных соединений; $0,048 \pm 0,004$ % пролина; $7,4 \pm 0,03$ % альгината; $1,1 \pm 0,1$ мкг/г маннита; суммарной концентрация сахаров: $104,1 \pm 5,2$ мг/г, из которых рибоза составляет $4,0 \pm 0,4$ %, 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, в том числе 0,3 % Ca, 1-2 % Mg, 6-8 % K и до 4 % Na, что может способствовать засолению почв (Подкорытова и др., 2020).

Исследование проводили на дерново-подзолистых почвах разного гранулометрического состава (глинистого, суглинистого и супесчаного), а также на торфяно-болотной почве. Почвы высушивали до воздушно-сухого состояния, просеивали через сито с диаметром ячеек 2 мм и смешивали с сухим промышленным жмыхом водорослей до достижения соотношения, равного 0,5 % ($\Phi-0,5$), 2 % ($\Phi-2$), 5 % ($\Phi-5$) и 10 % ($\Phi-10$) от массы почвы, увлажняли до 80 % влагоемкости и выдерживали при $21-23^\circ\text{C}$ в течение 60 дней. Перемешивание и полив проводили раз в неделю.

Внесение отходов *Fucus vesiculosus* L. способствовало нейтрализации почвенной кислотности на 2-3 ед. pH (табл. 2). Содержание органического углерода дерново-подзолистых почв возрастало от 1,3 до 5,8 раз в зависимости от дозы и гранулометрического состава почвы. При этом изменения содержания общего азота и подвижного фосфора не были статистически значимыми.

Сумма поглощенных катионов увеличивалась наиболее существенно (в 3 раза) в супесчаной почве с ее изначально низким содержанием. Количество Ca^{2+} , Mg^{2+} и K^+ увеличилось на 0,4–3 смоль/кг, в то время как Na^+ – в 4–9 раз, что создает риск осолонцевания дерново-подзолистых почв. При этом солонцеватость возрастала в зависимости от гранулометрического состава в глинистой и суглинистой почвах до «средней» и до «сильной» – в супесчаной.

Следовательно, дозы внесения отходов глубокой переработки фукуса целесообразно ограничивать с учетом этого фактора.

Таблица 2. Агрохимические свойства почв после 60 дней компостирования с отходами глубокой переработки *Fucus vesiculosus* L.

Вариант	рН Н ₂ O	Сорг	№общ	Р ₂ O ₅ подв., мг/кг	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ	Степень солонце- ватости, %
		%			смоль/кг					
Дерново-подзолистая глинистая (ДПг)										
ДПг (контр.)	5,30	0,48	0,18	10,5	3,2	1,6	0,1	0,2	5,1	2,0
ДПг /Ф-0,5	5,89*	0,66	0,23	11,2	3,4	1,6	0,4*	0,2	5,6	7,1
ДПг /Ф-2	6,47*	1,48*	0,21	10,8	3,7*	1,5	0,7*	0,2	6,1	11,5
ДПг /Ф-5	7,11*	1,76*	0,21	12,8	5,4*	2,3*	1,0*	0,1	8,8	11,4
ДПг /Ф-10	7,62*	2,78*	0,28	12,3	6,3*	2,1*	1,7*	0,2	10,3	16,5
Дерново-подзолистая среднесуглинистая (ДПсг)										
ДПсг (контр.)	5,27	0,96	0,22	16,2	4,3	1,4	0,1	0,5	6,3	1,8
ДПсг /Ф-0,5	5,56	1,71*	0,23	17,2	4,5	2,1*	0,5*	0,7	7,8	6,4
ДПсг /Ф-2	5,80	1,94*	0,21	17,3	4,8	2,4*	0,8*	0,9	8,9	9,0
ДПсг /Ф-5	5,94*	2,44*	0,21	17,5	4,9	2,4*	0,8*	1,2*	9,3	8,6
ДПсг /Ф-10	7,40*	2,50*	0,20	16,6	5,3*	2,6*	1,6*	1,2*	10,7	15,0
Дерново-подзолистая супесчаная (ДПсп)										
ДПсп (контр.)	5,11	1,28	0,12	10,2	2,0	0,2	0,05	0,1	2,4	2,1
ДПсп /Ф-0,5	5,38	1,62*	0,13	9,7	1,9	0,2	0,3*	0,1	2,5	12,0
ДПсп /Ф-2	6,38*	1,71*	0,12	14,3	2,8*	0,4*	0,6*	0,2*	4,0	15,0
ДПсп /Ф-5	7,33*	2,24*	0,14	13,6	2,9*	0,5*	1,0*	0,2*	4,6	21,7
ДПсп /Ф-10	8,01*	3,12*	0,19	13,8	4,5*	0,9*	1,9*	0,5*	7,8	24,4
Торфяно-болотная (ТБ)										
ТБ (контр.)	5,49	35,93	1,80	42,3	44,6	5,3	0,4	0,1	50,4	0,8
ТБ /Ф-0,5	5,34	36,51	1,68	45,5	44,2	5,2	0,4	0,1	49,9	0,8
ТБ /Ф-2	5,39	35,78	1,73	47,3	46,8	5,7	1,0*	0,2	53,7	1,9
ТБ /Ф-5	5,54	36,31	1,65	65,3	42,0	5,7	1,2*	0,3*	49,2	2,4
ТБ /Ф-10	5,71*	36,93	1,80	60,1	46,6	6,9*	2,8*	0,5*	56,8	4,9

* $p \leq 0,05$.

Внесение отходов глубокой переработки фукуса не оказало существенного влияния на агрохимические свойства торфяно-болотной почвы, и только при самой высокой дозе (Ф-10) возросло содержание поглощенных Mg^{2+} , K^+ и Na^+ , но степень солонцеватости не превышала «слабый» уровень.

4.3. 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 (Kurniawan et al., 2022; Ariyanta et al., 2023).

Для оценки влияния ЛН и АИ на содержание металлов в почвах было проведено исследование по их использованию в почвенных смесях при компостировании в разных дозах. Дерново-подзолистую почву разного гранулометрического состава (ДПсп, ДПсг и ДПг) и слаборазложившийся сфагновый горизонт торфяно-болотной почвы (ТБ) высушивали, просеивали через сито с диаметром ячеек 2 мм и помещали в вегетационные сосуды без дренажа. Вносили добавки ЛН (только для ДПсг и ТБ) или АИ из локальных (заводских) очистных сооружений в дозах 1%, 2,5%, 5% и 10% от сухого веса почвы, перемешивали и увлажняли до 70 % от полной влагоемкости. Компостировали при 23° С и перемешивании раз в неделю в течение 90 суток. По завершении инкубирования определяли содержание валовых и подвижных форм металлов Mn, Cu, Zn, Ni, Pb, Cd, Co, Cr, Fe, Al, Ti и Mo в почвах.

Исходные почвы в целом соответствовали санитарным нормам и генетическим особенностям почвообразования (Ганжара, 2001; Федорец и др., 2015; СанПиН 1.2.3685-21). Теоретически, внесение добавок ЛН и АИ не должно значимо влиять на валовое содержание ТМ в исследуемых вариантах почвенных смесей. При этом возможны эффект разбавления, когда содержание элемента в добавке ниже, чем в почве, или эффект накопления, если оно было выше. Более важно с экологической точки зрения изменение содержания подвижных форм ТМ, которое в значительной степени зависит от реакции среды и отражает снижение или увеличение биодоступности элемента в почвенном растворе.

Самое высокое валовое содержание ТМ наблюдалось в ТБ почве с сильноокислой реакцией среды и высоким содержанием Сорг, при этом оно не превышало санитарных норм. Эффект разбавления при внесении ЛН наблюдался для Ni и Cd, накопления – для Pb. При возрастании дозы АИ проявилась тенденция к росту валового содержания Pb, и уменьшению Mn, Zn, Ni, Cd, Cr и Al, то есть добавление АИ в целом более эффективно снижало содержание металлов в ТБ.

По сравнению с торфяно-болотной в дерново-подзолистых почвах валовое содержание почти всех изученных металлов было значительно ниже и различалось в зависимости от гранулометрического состава. При внесении ЛН в суглинистую ДП наблюдалась тенденция к возрастанию валового содержания Ni, Pb и Co, а при добавлении АИ – Ni, Cd, Co и Ti, в то время содержание Cu и Pb снижалось. В супесчаной почве при внесении АИ незначительный эффект накопления проявлялся в отношении Pb, Cd, Al, Ti, уменьшалось только содержание Mo. В отличие от ДПсп и ДПсг, в почве тяжелого гранулометрического состава ДПг существенных изменений при внесении АИ не наблюдалось.

Более важно с экологической точки зрения изменение содержания подвижных форм ТМ, которое отражает снижение или увеличение биодоступности элемента в почвенном растворе. При добавлении как ЛН, так и

АИ в торфяно-болотную почву несколько увеличилась подвижность Mn, Pb, Fe и снизилась – Co.

В ДПсг существенное увеличение содержания подвижных форм Mn, Fe и Al произошло при внесении ЛН, особенно в повышенных дозах, и только Mn – при добавлении АИ. В супесчаной почве заметных изменений в подвижности металлов не происходило. В глинистой почве при добавлении АИ увеличилась подвижность Mn и Ni.

При этом изменения в валовом содержании металлов были выражены в гораздо меньшей степени по сравнению с подвижной формой.

Корреляционные зависимости между типом почв, исходным содержанием валовой формы ТМ, дозами ЛН и АИ и содержанием подвижной формы элементов показали, что содержание подвижных форм зависело в основном от типа почвы, а не от дозы добавки ЛН или АИ (рис. 2).

		Почвы				Добавки		Валовая форма элемента											
		БТ	ДПсг	ДПсп	ДПг	ЛН	АИ	Mn	Cu	Zn	Ni	Pb	Cd	Co	Cr	Fe	Al	Ti	Mo
Подвижная форма	Mn	Red	Blue	Blue	Blue	Red	Blue	Red	Red	Red	Red	Blue	Red	Red	Red	Red	Red	Blue	Blue
	Cu	Red	Blue	Blue	Blue	Red	Blue	Red	Red	Red	Red	Blue	Red	Red	Red	Red	Red	Blue	Blue
	Zn	Blue	Blue	Red	Red	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Red	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
	Ni	Blue	Blue	Blue	Red	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Red	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
	Pb	Blue	Blue	Blue	Red	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Red	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
	Cd	Blue	Blue	Blue	Red	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Red	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
	Co	Red	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Red	Red	Red	Red	Blue	Red	Red	Red	Red	Red	Blue	Blue
	Cr	Red	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Red	Red	Red	Red	Blue	Red	Red	Red	Red	Red	Blue	Blue
	Fe	Red	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Red	Red	Red	Red	Blue	Red	Red	Red	Red	Red	Blue	Blue
	Al	Blue	Blue	Blue	Red	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Red	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
	Ti	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
	Mo	Blue	Blue	Blue	Red	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue

где корреляционный коэффициент (r) менялся от синего (обратная зависимость) к красному (прямая зависимость) в соответствии со следующей шкалой:

-0,93...-0,82	-0,78...-0,63	-0,62...-0,31	-0,21...-0,14	-0,1...0,1	0,12...0,22	0,23...0,48	0,52...0,85	0,89...0,99
---------------	---------------	---------------	---------------	------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Рисунок 2. Тепловая схема корреляционной матрицы в компостируемых смесях между типом почв и применяемой добавки, валовым содержанием металлов и подвижными формами металлов в смесях.

5. Применение полимерных структурообразователей для повышения плодородия и устойчивости почв рекультивируемых территорий

Водорастворимые полимеры содержат активные функциональные группы -COOH, -CONH₂, -CONH и -CN и широко применяются в сельском хозяйстве для снижения эрозии почв (Курочкина и др., 2013; Панова и др., 2020; Novoskoltseva et al., 2021; Luan et al., 2023). Но 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).

5.1. *Влияние обработки структурообразователями на противоэрозионную устойчивость чернозема, песка и глины.* ПМ на основе производных акрила проявили себя как эффективное средство для снижения эрозии почв в сельском хозяйстве (Курочкина и др., 2013; Панова и др., 2020; Novoskoltseva et al., 2021; Yingcheng Luan et al., 2023). Применение структурообразователя на основе гидролизованного полиакрилонитрила, получаемого из нитрила акриловой кислоты, не только достоверно снижает потерю почв и почвенных питательных элементов при эрозии, но также не имеет свойственного многим другим полимерам отрицательного воздействия на физические свойства почв (Yonghui Yang et al., 2012; Zhang et al., 2023). Кроме того, в составе полиакрилонитрила не содержатся опасные незаполимеризованные мономеры (Панова и др., 2021).

С другой стороны, известно, что применение полимерных структурообразователей может быть более эффективно при использовании смеси анионных и катионных полимеров или т.н. интерполиэлектrolитных комплексов (ИПЭК), которые благодаря своей структуре значительно меньше вымываются с поверхности почв (Панова и др., 2020; Новоскольцева и др., 2021; Якименко и др., 2021).

Целью исследования явилось изучение эффективности полимерных структурообразователей для повышения противоэрозионной устойчивости почв разного гранулометрического состава, сформированных на склонах различной крутизны в условиях дождевых осадков разной интенсивности.

Объектом исследования явился чернозём средневещелоченный, легкоглинистый Южной лесостепи Республики Башкортостан, характеризующийся средней мощностью гумусово-аккумулятивного горизонта (70 см), средней гумусированностью (7,5 %), слабокислой реакцией среды ($\text{pH H}_2\text{O} = 6,8$), повышенным содержанием подвижного фосфора (118 мг/кг) и высоким – обменного калия (168 мг/кг). В качестве субстратов также использовали аллювиальный мелкозернистый песок и делювиальную бесструктурную глину.

Полимерные структурообразователи были представлены:

1. Композиция «Реагент ВПРГ (сухой гипан)» (ВПРГ) на основе анионного гидролизованного полиакрилонитрила: серо-желтый порошок, полностью растворим в воде с образованием растворов высокой щелочности (в пределах $\text{pH} = 8-12,5$ для 1% водного раствора) с динамической вязкостью не менее 5 мПа для 1% водного раствора при 20°C, не горюч и не взрывоопасен. Рекомендованная концентрация – 10,6 г/л.

2. Композиция «ВПК-402» (ВПК) на основе 28 %-го раствора полидиаллилдиметиламмоний хлорида с активной функциональной группой - $\text{N}^+(\text{CH}_3)_2$: вязкая прозрачная жидкость желтоватого цвета без запаха, полимер не горюч, не токсичен, полностью растворим в воде и безопасен для окружающей среды. Рекомендованная концентрация – 28 мл/л.

3. Интерполиэлектrolитные комплексы (ИПЭК), состоящие из смеси ВПРГ в качестве анионного полимера и ВПК – катионного полимера при их разных соотношениях.

Почву, песок и глину помещали в пластиковые сосуды размером 0,15x1,00 м и высотой 0,2 м с двумя дренажными отверстиями на дне и высушивали до воздушно-сухого состояния, затем располагали на малогабаритной лабораторной дождевальной установке при углах наклона 3°, 7°, 15° и моделировали осадки в виде сильного ливня с интенсивностью 6–7 мм/мин.

Растворы полимеров ВПРГ и ВПК в заданной концентрации готовили непосредственно перед обработкой почвы и вносили путем распыления над поверхностью. Компоненты ИПЭК наносили последовательно, вначале распыляли раствор ВПК, затем сразу – ВПРГ.

Оценку устойчивости к водной эрозии определяли по времени начала стока и количеству смытого материала за 30 минут после начала стока.

Таблица 3. Время начала и масса твердого стока

№	Угол	Субстрат	Вариант опыта	Время начала стока, мин	Твердый сток, г
1	3°	Чернозем	Контроль	11±1	39±6
2			ВПРГ	12±1	9±2
3		Песок	Контроль	8±1	3±1
4			ВПРГ	10±0	3±1
5		Глина	Контроль	4±1	158±12
6			ВПРГ	6±2	105±22
7	7°	Чернозем	Контроль	9±1	298±33
8			ВПРГ	14±1	86±7
9		Песок	Контроль	8±1	463±45
10			ВПРГ	10±2	160±10
11		Глина	Контроль	2±1	620±65
12			ВПРГ	5±1	657±26
13	15°	Чернозем	Контроль	7±3	628±79
14			ВПРГ	12±2	255±46
15			ВПРГ-2	9±1	48,03±5
16			ВПРГ-4	11±1	23,54±4
17		Песок	Контроль	8±1	3450±167
18			ВПРГ	8±0	3715±156
19			ВПРГ-2	8±1	3821,51±39
20			ВПРГ-4	10±1	4022,36±80
21		Глина	Контроль	1±0	2072±138
22			ВПРГ	5±1	2219±184
23			ВПРГ-2	5±1	5287,39±61
24			ВПРГ-4	6±1	3827,81±54

При моделировании ливневых осадков начало смыва чернозема зависело от угла наклона поверхности почвы и начиналось с 11-ой минуты при уклоне 3°, с 9-ой – при 7° и 6-ой – при 15°. Обработка структурообразователем ВПРГ способствовала повышению противозерозионной устойчивости и отодвигало время образования твердого стока на 2–5 минут. У песка время начала стока практически не зависело от уклона и составило приблизительно 8 минут. Обработка ВПРГ увеличивала это время на 2 минуты при 3–7° уклона, но не повлияла на этот показатель при 15°. В отличие от почвы и песка, на глине сток

начинался через 4 минуты при уклоне 3° и уже через 1 минуту при уклонах 7° и 15° , а при обработке ВПРГ – на 5–6 минуте при всех уклонах (табл. 3).

При отсутствии противоэрозионной обработки масса твердого стока чернозема возрастала в 7 и 16 раз при увеличении уклона с 3° до 7° и 15° , соответственно.

Аналогичная тенденция наблюдалась для глины, где при большей общей массе твердого стока это возрастание составило 4 и 14 раз. Масса смыва песка при уклоне 3° была наименьшей, но резко возрастала до 3450 г при 15° .

В то же время при малом уклоне в 3° определяющий вклад в противоэрозионную устойчивость необработанных субстратов, по-видимому, вносила водопроницаемость, что вело к меньшему смыву вещества на песке за счет его рыхлой структуры. Однако при увеличении уклона рыхлая структура песка, в сочетании с такими факторами, как низкая связанность частиц и их крупный размер (Артемьева, 2010), приводили к снижению устойчивости песка к смыву тем сильнее, чем выше был уклон.

Обработка чернозема выщелоченного структурообразователем ВПРГ в концентрации 10,6 г/л способствовала уменьшению твердого стока на 77 %, 71 % и 59 % при увеличении уклона поверхности от 3° до 7° и 15° соответственно. Применение ВПРГ на песке и глине было значительно менее эффективно, особенно при повышенных уклонах. Масса твердого стока с чернозема при уклоне 15° с увеличением концентрации ВПРГ в 2 и 4 раза снижалась на 90–96 % по сравнению с контролем, а смыв начинался на 5 минут позже. На глине повышение концентрации в 2 раза привело к началу возникновения «эффекта смазки». Дальнейшее повышение концентрации до 4 раз усиливало связи между полимером и частицами глины, что немного снижало скольжение, но было недостаточным для того, чтобы полностью избавиться от «эффекта смазки».

В отличие от анионного полимера ВПРГ обработка почвы катионным полимером ВПК оказалась более эффективной. Хотя сток начинался раньше, чем при применении ВПРГ и лишь на 2 и 4 минуты позже (при 7° и 15°) относительно контроля, величина твердого стока была существенно ниже, не превышая 5,5 г. Увеличение концентрации ВПК до 57 и 114 мл/л даже при уклоне 15° привело к 99 % снижению смыва. В то же время снижение концентрации ВПК до 14 мл/л по эффективности практически не уступало рекомендованной производителем концентрации препарата (28 мл/л). Вероятно, это может быть связано с такими свойствами ВПК, как высокая плотность заряда и возможность диссоциации в растворах с образованием положительно заряженных ионов.

Интерполиэлектролитные комплексы (ИПЭК), в отличие от водорастворимых полимеров, способны дольше сохраняться на поверхности почвы, образуя влаго- и воздухопроницаемые корки, устойчивые к растворению за счет дезактивации активных гидрофильных групп при взаимодействии как с частицами почвы, так и с молекулами противоположно заряженных полимеров, образующих смесь ИПЭК (Михейкин и др., 2004; Панова и др., 2021). Влияние на противоэрозионную устойчивость чернозема ИПЭК на основе ВПРГ и ВПК в разных концентрациях, исследовали при уклоне 15° , как наиболее подверженному эрозионному воздействию (рис. 3).

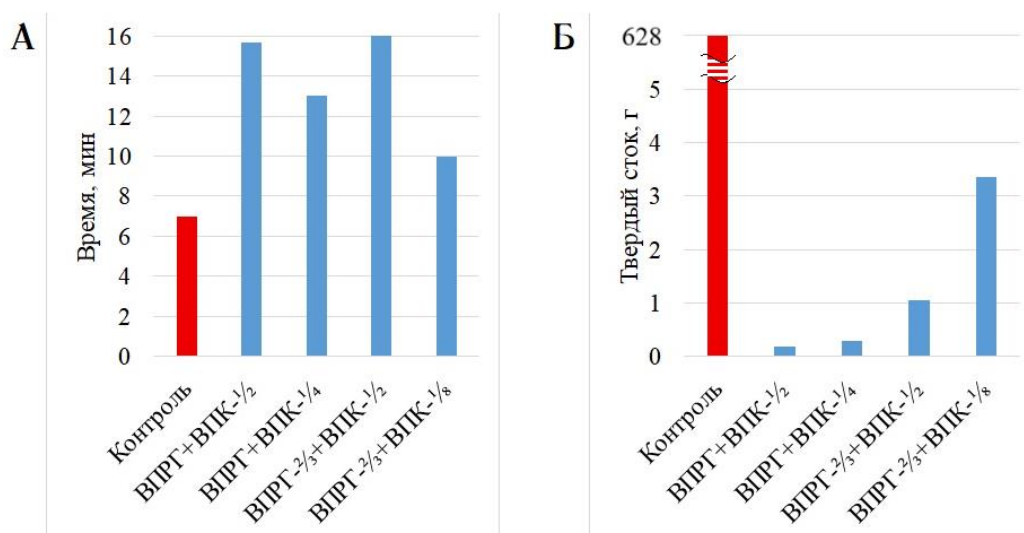


Рисунок 3. Время начала стока (А) и масса твердого стока (Б) по сравнению с контролем при дождевании чернозема, обработанного ИПЭК на уклоне 15°.

Применение ИПЭК увеличило время начала стока на 4–12 минут по сравнению с контролем. Кроме того, для всех вариантов, кроме комплекса с наименьшими концентрациями структурообразователей (ВПРГ- $\frac{2}{3}$:ВПК- $\frac{1}{8}$), время начала стока увеличивалось также относительно вариантов с обработками отдельно ВПРГ или ВПК. Уменьшение доли ВПРГ в составе ИПЭК способствовало увеличению времени начала смыва. Соответственно, учитывая тот факт, что смыв вещества при использовании любого из исследованных ИПЭК был крайне низким и его значениями можно пренебречь, наиболее выгодным вариантом смеси по повышению противозерозионной устойчивости почвы оказался ИПЭК с пониженными концентрациями структурообразователей в соотношении ВПРГ- $\frac{2}{3}$:ВПК- $\frac{1}{4}$. Вероятно, такое соотношение компонентов приводило к максимальному взаимодействию как между функциональными группами полимеров, так и с почвой, что позволило создать наиболее стабильную полимерную корку на поверхности чернозема.

При этом снижение концентраций каждого из полимеров в составе ИПЭК приводило к увеличению массы смытого вещества.

Таким образом, применение ИПЭК даже при дозах полимеров, концентрация которых в смеси ниже, чем при одиночном использовании, приводило к значительному снижению твердого стока чернозема выщелоченного и увеличению времени начала стока даже в условиях крутого склона.

5.2. Влияние обработки структурообразователем ВПРГ на гранулометрический состав чернозема выщелоченного. Для изучения гранулометрического состава эрозионных наносов чернозема выщелоченного были использованы: твердый сток без обработки поверхности при уклоне 3°, 7° и 15°; твердый сток почвы после ее обработки ВПРГ в концентрациях 10,6 г/л (ВПРГ) при тех же уклонах; а также после обработки ВПРГ в концентрациях 21,2 г/л (ВПРГ-2) и 42,4 г/л (ВПРГ-4) при уклоне поверхности 15°.

Для твердого стока была характерна повышенная доля частиц фракций 0,5–0,25 и 0,25–0,1 мм, относящихся к среднему и мелкому песку (табл. 4).

Таблица 4. Гранулометрический состав твердого стока чернозема

Вариант, уклон	Фракция, %				
	> 1 мм	1–0,5 мм	0,5–0,25 мм	0,25–0,1 мм	< 0,1 мм
Контроль, 3°	1,3	6,9	45,3	38,3	8,1
Контроль, 7°	3,0	6,8	53,2	32,7	4,3
Контроль, 15°	3,6	5,6	39,7	44,0	7,0
ВПРГ, 3°	0,2	4,1	48,8	41,6	5,3
ВПРГ, 7°	2,2	5,7	53,1	36,8	2,2
ВПРГ, 15°	3,0	7,2	48,7	35,6	5,5
ВПРГ-2, 15°	5,7	9,0	47,4	33,0	5,0
ВПРГ-4, 15°	2,6	8,7	43,7	38,8	6,1

Снижение массы твердого стока при применении ВПРГ не привело к существенному изменению распределения частиц по фракциям в этом диапазоне. Вместе с тем наблюдалась тенденция к некоторому снижению содержания частиц <0,1 мм.

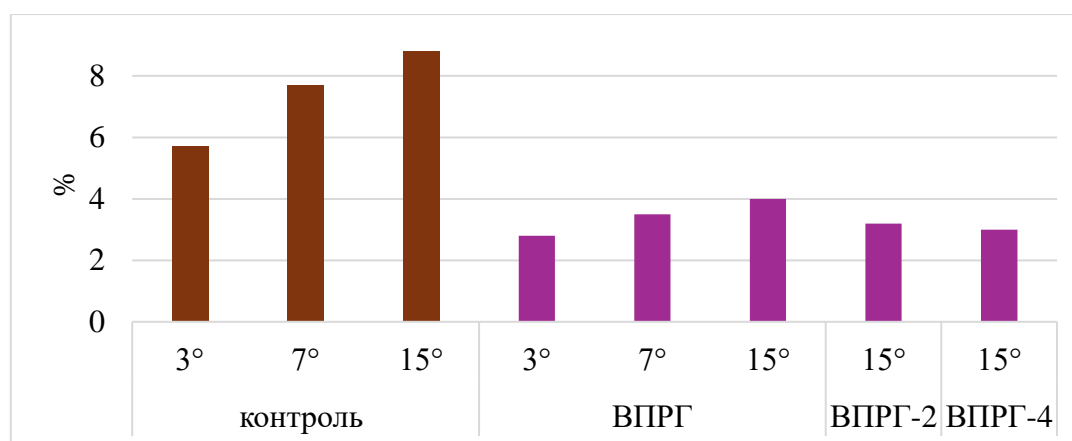


Рисунок 4. Содержание мелкодисперсных фракций (<0,01 мм) в твердом стоке, %

Исследование гранулометрического состава фракции твердого стока, полученной при просеивании через сито 0,1 мм, на приборе «Ласка-ТД» не выявило значимого содержания фракции ила (<0,001 мм) во всех образцах твердого стока (рис. 4).

Основная масса частиц приходилась на фракции крупной пыли (0,01–0,05 мм) и мелкого песка (0,05–0,1 мм) с содержанием, соответственно, от 50,4–62,4 % и 21,6–31,3 %. При этом, что после обработки ВПРГ наблюдалось уменьшение содержания мелкодисперсных фракций (<0,01 мм) в твердом стоке более, чем в 2 раза при всех углах наклона.

Повышение концентрации структурообразователя способствовало дальнейшему снижению содержания мелкодисперсных фракций.

5.4. Влияние обработки структурообразователями на фитотоксичность чернозема выщелоченного. При определении фитотоксичности в качестве тест-

культуры использовали растение клевера красного. Фитотоксичность оценивали по изменению среднего веса свежей массы верхней части растений, выращенных в течение 30 дней на обработанной структурообразователями почве относительно контроля без обработки.

Прорастание семян началось во всех сосудах на второй день опыта. Средняя всхожесть составила $95,0 \pm 1,5\%$ 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. При использовании структурообразователя ВПРГ для повышения противоэрозионной устойчивости во всех рассмотренных концентрациях, сухая биомасса растений клевера красного была выше таковой на контроле на 18–25 %, то есть проявился ростстимулирующий эффект (рис. 5).

При обработке чернозема препаратом ВПК его воздействие изменялось от незначительной ростстимуляции при дозах до 56 мл/л, до незначительного подавления роста при концентрации 114 мл/л.

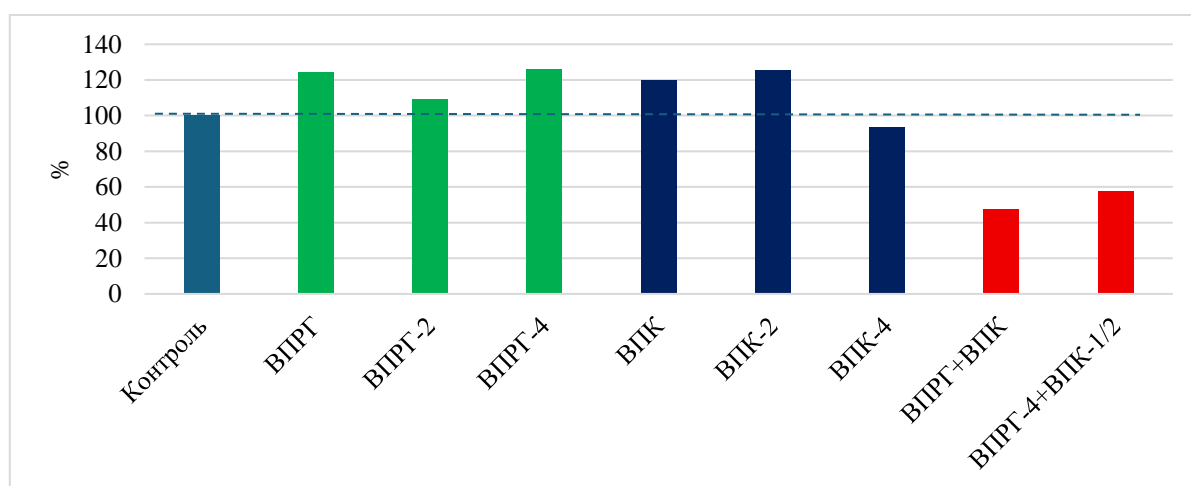


Рисунок 5. Биомасса надземной части клевера красного после обработки почвы структурообразователями, % от контроля

Фитотоксический эффект средней степени наблюдался лишь при совместном использовании структурообразователей в составе ИПЭК, хотя появление всходов во всех вариантах началось одновременно. Возможно, это было связано с нарушением водно-воздушного режима почвы: переувлажнением из-за снижения испарения с поверхности через более плотную полимерную корку (Panova et al., 2021) или же полимеры препятствовали поглощению растениями воды за счет снижения водопроницаемости и уплотнения почвы (Zhang et al, 2023). Снижение биомассы растений изменялось от 42 до 51 % при повышении доли ВПК в составе ИПЭК. Поэтому ИПЭК как наиболее эффективную противоэрозионную композицию более целесообразно использовать не на пахотных почвах с их небольшими уклонами, а при рекультивации отвалов, в ландшафтном дизайне, обустройстве дорожных откосов и т.д.

ВЫВОДЫ

1. На техногенно нарушенных участках по сравнению с фоновыми почвами выявлена общая тенденция нейтрализации кислотности, снижения содержания органического углерода и щелочногидролизуемого азота, а также изменение таксономического состава микробиологических сообществ. В почвах, формирующихся на ТНУ, наблюдается увеличение содержания питательных веществ и постепенное восстановление состава микробиоты, что в основном определяется антропогенной нагрузкой и типом растительности. В целом процесс самовосстановления ТНУ не зависит от исходных агрохимических свойств почв и содержания в них тяжелых металлов и мышьяка.

2. Техносоли, созданные на основе грунта ТНУ с добавлением лигносульфоната натрия, аммиачной селитры и микроорганизмов-биодеструкторов углеводов, характеризуются пониженным влагоиспарением, высоким содержанием органического углерода (27–56 %), щелочногидролизуемого азота (135–460 мг/кг), способствуют снижению избыточной кислотности, практически не проявляют фитотоксичности и вполне пригодны для рекультивации ТНУ, а также в качестве почвенных мелиорантов пролонгированного действия с постепенным высвобождением питательных элементов.

3. Внесение лигносульфоната натрия и активного ила независимо от их дозы оказывает разнонаправленное действие на содержание валовых и подвижных форм ТМ, но не приводит к превышению ПДК и ОДК в торфяно-болотной и дерново-подзолистых почвах. Содержание металлов в большей степени определяется типом почвы, ее агрохимическими свойствами и гранулометрическим составом. Применение АИ по сравнению с ЛН более эффективно для снижения содержания металлов в торфяно-болотной почве.

4. Внесение бурых водорослей *Fucus vesiculosus* L. в дозах 0,5–10 % от массы почвы способствует нейтрализации кислотности на 2–3 ед. рН, увеличению содержания органического углерода от 1,3 до 5,8 раз в зависимости от дозы мелиоранта и гранулометрического состава дерново-подзолистых почв, но не оказывает существенного влияния на содержание общего азота и подвижного фосфора. При этом в ППК увеличивается количество Ca^{2+} , Mg^{2+} и K^+ на 0,4–3 смоль/кг, в то время как Na^+ – в 4–9 раз, что обуславливает рост степени солонцеватости в глинистой и суглинистой почвах до «средней» и до «сильной» – в супесчаной. Дозы внесения этих отходов целесообразно ограничивать с учетом этого фактора.

5. Обработка чернозема выщелоченного полимерной композицией ВПРГ в концентрации 10,6 г/л при моделировании сильного ливня и уклонах поверхности 3°, 7° и 15° способствует уменьшению твердого стока на 77 %, 71 % и 59 %, соответственно, а также содержания в его гранулометрическом составе мелкодисперсных фракций более чем в 2 раза. Применение ВПК-402 в концентрации 28 мл/л приводит к снижению массы твердого стока на 95–98 %, а их совместное использование – к почти полному отсутствию смыва почвы. Их эффективность в качестве структурообразователей на песке и глине значительно

ниже и проявляется только при малых уклонах. Фитотоксичность почвы изменяется от «среднетоксичной» при обработке интерполиэлектролитным комплексом до ростстимулирующего действия при внесении ВПРГ.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, входящих в Перечень ВАК

1. 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). – DOI 10.51419/20215511. – Режим доступа: https://agroecoinfo.ru/STATYI/2021/5/st_511.pdf (дата обращения 12.01.2026). К3

2. Эрозионная устойчивость целинного чернозема и чернозема с классическим и No-Till видами обработки в условиях моделируемого сильного ливня / **Е. С. Дорогая**, Р. Р. Сулейманов, И. Ю. Сайфуллин, А. О. Миннегалиев, С. В. Зайкин // Социально-экологические технологии. – 2022. – Т. 12, № 2. – С. 155-170. – DOI 10.31862/2500-2961-2022-12-2-155-170. К2

3. **Дорогая, Е. С.** Гранулометрический состав эрозионных наносов агрочернозема, обработанного полимерным структурообразователем / **Е. С. Дорогая**, Р. Р. Сулейманов, А. О. Миннегалиев // АгроЭкоИнфо. – 2024. – № 4(64). – DOI 10.51419/202144406. – Режим доступа: https://agroecoinfo.ru/STATYI/2024/4/st_406.pdf (дата обращения 12.01.2026). К3

Статьи в научных изданиях, входящих в Scopus, Web of Science

4. 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. – Vol. 12, No. 9. – P. 1991. – DOI 10.3390/agronomy12091991. К1.

5. Assessment of Chemical Properties, Heavy Metals, and Metalloid Contamination in Floodplain Soils under the Influence of Copper Mining: A Case Study of Sibay, Southern Urals / R. Suleymanov, **E. Dorogaya**, A. Gareev, A. Minnegaliev, M. Gaynanshin, S. Zaikin, L. Belan, I. Tuktarova, A. Suleymanov // Ecologies. – 2022. – Vol. 3, No. 4. – P. 530-538. – DOI 10.3390/ecologies3040039. К1.

Статьи в журналах, индексируемых в РИНЦ

6. **Дорогая, Е. С.** Влияние применения полимерных структурообразователей на фитотоксичность агрочернозема / **Е. С. Дорогая** // Экобиотех. – 2024. – Т. 7, № 1. – С. 1-7. – DOI 10.31163/2618-964X-2024-7-1-1-7. – Режим доступа: <https://ecobiotech-journal.ru/2024/pdf/ecbtch2401001.pdf> (дата обращения 17.01.2026).

Публикации в сборниках трудов конференций

7. **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 (г. Уфа, 01 декабря 2021 г.). Вып. 14. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2021. – С. 267-269.

8. 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 Всероссийской научной конференции с международным участием, Сатка, 12-16 сентября 2022 г. – Сатка : Притоника, 2022. – С. 59-62.

9. **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 : SETOF Conference, Goč, November 3rd, 2022 ; [organizer University of Belgrade, Faculty of Forestry, Belgrade, Republic of Serbia] ; editor in chief Nada Dragović : Abstract book. – Belgrade : University, Faculty of Forestry, 2022. – P. 16.

10. 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 : материалы X Всероссийской научной конференции по лесному почвоведению с международным участием, посвященной памяти Розалии Михайловны Морозовой (1928-2017), Петрозаводск, 18-22 сентября 2023 г. : тезисы докладов. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2023. – С. 160-161.

11. Создание почвогрунтов на основе лигносульфоната натрия и материала отвалов карьера / **Е. С. Дорогая**, Р. Р. Сулейманов, А. О. Миннегалиев, М. Г. Юркевич, О. Н. Бахмет // Почвы и окружающая среда : Всероссийская научная конференция с международным участием, посвященная 55-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН, 2-6 октября 2023 г., г. Новосибирск : сборник научных трудов. – Новосибирск: ИПА СО РАН, 2023. – С. 527-529. – DOI 10.31251/conf1-2023. – Режим доступа: <https://issa-siberia.ru/images/docs/conferenceMaterials.pdf> (дата обращения 12.01.2026).

12. **Дорогая, Е. С.** Влияние полимера на основе полиакрилонитрила на интенсивность смыва почвогрунтов / Е. С. Дорогая // Современные проблемы биологии, наук о Земле, спорта и туризма : сборник статей Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 100-летию Ф.А. Максютова (г. Уфа, 5 декабря 2023 г.). – Уфа: РИЦ УУНиТ, 2023. – С. 151-154.

13. **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. / Общество почвоведов им. В. В. Докучаева ; ответственные редакторы: П. В. Красильников, Н. О. Ковалева, Е. М. Столпникова. – Москва: МАКС Пресс, 2024. – С. 802-803. – Режим доступа: https://kpfu.ru/portal/docs/F2105999149/TEZISY.IX.sezd.pochvovedov_.Kazan_2024_2_.pdf (дата обращения 12.01.2026).

Иные публикации

14. Влияние осадков сточных вод в сочетании с различными добавками на азотное состояние чернозема выщелоченного / И. М. Габбасова, Т. Т. Гарипов, **Е. С. Дорогая**, М. А. Комиссаров, Ф. И. Назырова, А. С. Нигматзянов // *Агрохимия*. – 2023. – № 11. – С. 92-96. – DOI 10.31857/S0002188123110054. К1.

15. Microbiomes of Primary Soils and Mining Heaps of Polymetallic Ore Quarries / **Е. Dorogaya**, E. Abakumov, A. Zverev, E. Novikova, M. Garshin, A. Minnegaliev, R. Suleymanov // *Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 14, No. 8. – P. 3328. – DOI 10.3390/app14083328. К1.

16. Оценка содержания тяжелых металлов в подзолистой почве различного гранулометрического состава при внесении активного ила как основы наноудобрения (отход целлюлозно-бумажной промышленности) / М. Г. Юркевич, Р. Р. Сулейманов, **Е. С. Дорогая**, А. А. Курбатов // *Нанотехнологии в строительстве*. – 2022. – Т. 14, № 6. – С. 510-515. – DOI 10.15828/2075-8545-2022-14-6-510-515. К1.

17. 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. – DOI 10.15828/2075-8545-2023-15-4-359-372. К1.

18. 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. – DOI 10.18412/1816-0395-2024-7-32-36. К1.