

И.И. Васенев, А.В. Степанов, П.И. Васенев



**Почво- и углерод-сберегающие
технологии повышения
продуктивности травостоя
с использованием отходов
промышленности и сельского
хозяйства**

Москва 2023

Васенев И.И., Степанов А.В., Васенев П.И. Почво- и углерод-сберегающие технологии повышения продуктивности травостоя с использованием отходов промышленности и сельского хозяйства: методические рекомендации по результатам апробации. – М.: Изд-во РГАУ-МСХА. – 2023. – 48 с.

В методических рекомендациях изложены результаты успешной апробации и агроэкологической оценки эффективности применения целого ряда почво- и углерод-сберегающих технологий повышения продуктивности травостоя с использованием отходов промышленности и сельского хозяйства на участке восстановления плодородия агрогенно-эрозионно деградированных дерново-подзолистых почв. По результатам агроэкологического мониторинга биологической продуктивности травостоя, сезонной динамики запасов органического углерода в верхних органоминеральных горизонтах реконструируемой дерново-подзолистой почвы, прямых измерений почвенных потоков CO₂ проведен сравнительный анализ углеродного баланса и потенциала ускоренной природоподобной секвестрации атмосферного углерода при использовании апробированных в работе технологий восстановления эрозионно деградированных подзолистых почв.

Издание предназначено для научных сотрудников, специалистов АПК и отделов озеленения, аспирантов, студентов старших курсов бакалавриата, специалитета и магистратуры, а также слушателей курсов повышения квалификации, специализирующихся в области (агро-)экологического мониторинга и/или заинтересованных в научно обоснованной агроэкологической оптимизации землепользования/земледелия с разработкой, адаптацией и/или экспериментальной верификацией наилучших доступных почво- и углерод-сберегающих технологий с использованием отходов промышленности и сельского хозяйства.

Рекомендовано к изданию учебно-методической комиссией Института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова. Подготовлены в рамках исследований по Российско-итальянскому проекту «Интеграция IoT датчиков и алгоритмов искусственного интеллекта для точного климатически сбалансированного сельского хозяйства и систем поддержки принятия решений» (грант Министерства науки и высшего образования РФ № 075-15-2021-1030)

Рецензенты: доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры земледелия и методики опытного дела РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева **М.А. Мазилов**, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой эрозии и охраны почв МГУ имени М.В. Ломоносова **О.А. Макаров**

©Васенев И.И., Степанов А.В., Васенев П.И., авторы, 2023
©ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2023
©Издательство

СПИСОК ОПРЕДЕЛЕНИЙ, СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	4
Введение.....	6
1. Актуальные задачи восстановления плодородия эрозионно деградированных почв с использованием отходов промышленности и сельского хозяйства	9
2. Объекты и методы исследования на Агроэкологическом стационаре РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева	14
3. Сезонная динамика свойств формируемого дернового горизонта по вариантам опыта	21
4. Сезонная динамика почвенной эмиссии CO ₂ по вариантам опыта	29
5. Сезонная динамика развития продукционного процесса и травостоя по вариантам опыта	32
6. Оценка углеродного баланса исследуемых модельных агроэкосистем с применением почво- и углерод-сберегающих технологий утилизации отходов промышленности и сельского хозяйства	36
Заключение	39
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	41

СПИСОК ОПРЕДЕЛЕНИЙ, СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

Агроэкологическая оценка земель	Комплексная характеристика земель, которая отражает их общее экологическое состояние, потенциальный уровень выполнения ими своих агроэкологических функций, экологические и экономические риски землепользования – с целью оптимизации их использования, охраны и, в случае необходимости, восстановления – с минимизацией рисков сельскохозяйственного производства и рентабельным получением продукции агроэкологически обоснованного количества и востребованного качества.
Агроэкологический мониторинг	Система специально организованных во времени и пространстве наблюдений за основными компонентами агроэкосистем (почвы, растения, животные, микроорганизмы, продукция, поверхностные и грунтовые воды, воздух) с целью выработки рекомендаций по агроэкологически обоснованной оптимизации их использования, сохранения и, в случае необходимости, восстановления – при минимальных рисках сельскохозяйственного производства и устойчивом рентабельном получении сельскохозяйственной продукции агроэкологически обоснованного количества и требуемого на рынке качества, с сохранением экологических функций и сервисов базовых компонентов агроландшафта.

Агроэкосистема	Искусственно созданная с целью получения сельскохозяйственной продукции и регулярно поддерживаемая человеком (поле, пастбище, огород, сад, защитное лесное насаждение и т.д.) экосистема.
Продукционный процесс растений	Динамический процесс развития/ формирования биомассы и урожайности растения/культуры, осуществляемый в связи с функционированием фотосинтезирующей системы растения/посева в агроэкологических (почвенно-климатических) условиях конкретного земельного участка.
Система поддержки принятия решений, СППР (англ. Decision support system, DSS)	Компьютерная автоматизированная система, целью которой является информационная поддержка принимаемых в сложных условиях решений для более оперативного, полного и объективного анализа проблемной ситуации. На основе системного анализа входных данных и использования встроенных баз знаний выдает информацию, помогающую более быстро и точно оценить ситуацию и оперативно принять оптимальное проектное, технологическое или корректирующее решение.
Системный анализ	Совокупность определенных научных методов и практических приемов анализа и решения слабоструктурированных проблем во всех сферах целенаправленной деятельности на основе системного подхода и представления объекта в виде системы взаимосвязанных элементов и компонентов.

CropTalker	IoT система агроэкологического мониторинга, позволяющая получать непрерывный (каждый час–полчаса) поток агроэкологических данных по текущему состоянию.
IoT (Internet of Things)	Информационно-инструментальная система (инфраструктура), позволяющая предоставлять расширенные дистанционно удаленные услуги путем соединения физических и виртуальных объектов (вещей) на основе функционально и конструктивно совместимых информационных, коммуникационных и инструментальных технологий.

Введение

Характерные для последних десятилетий ускоренно развивающиеся глобальные изменения климата и биоты серьезно обострили экологические проблемы антропогенно активизированной эрозии и агрогенной деградации интенсивно используемых пахотных почв [Агроэкологическая оценка..., 2012].

Наиболее остро эта проблема стоит в случае старопашотных дерново-подзолистых почв с изначально низким содержанием гумуса и небольшой исходной мощностью их дерновых горизонтов, которые преобладают в Нечерноземной зоне России и являются природной основой ее сельского хозяйства. На фоне характерных для XXI века глобальных изменений климата, быстро растет интерес к более интенсивному, но экологически безопасному сельскохозяйственному использованию этих земель с более стабильным режимом увлажнения и растущей из года в год суммой активных температур.

Ускоренное развитие эрозии, как правило, сопровождается резким падением плодородия пахотных почв и, в случае сильно эрозионно деградированных дерново-подзолистых почв, обуславливает необходимость проведения восстановительной агробиотехнической мелиорации.

Для восстановления агроэкологического качества и стабилизации углеродного баланса агрогенно деградируемых дерново-подзолистых почв традиционно используются известь-содержащие мелиоранты и органические удобрения, ограниченные высокой стоимостью коммерческих продуктов и экологическими рисками использования местных отходов промышленности и сельского хозяйства [Методическое пособие..., 2001].

Дополнительный интерес к агроэкологическим исследованиям по стабилизации углеродного баланса регенерируемого верхнего горизонта деградированных дерново-подзолистых почв связан с проблемой ускоренной деградации функционально-экологического качества почвогрунтов газонных экосистем в условиях повышенной рекреационной нагрузки на них в мегаполисах, где они играют жизненно важную роль в регулировании качества основных природных

компонентов городской среды [Vasenev e.a., 2017; 2020].

Повышенная нестабильность и ускоренная минерализация органики наиболее распространенных видов газонов и используемых при их создании и восстановлении почвогрунтов связаны с торфо-песчаным составом последних. Торф в этих условиях быстро минерализуется с некомпенсируемой эмиссией CO₂, увеличивая общие выбросы парниковых газов городскими экосистемами.

Агроэкологически обоснованное добавление фосфогипса в торфо-песчаные почвогрунты может способствовать частичной стабилизации их органического вещества, нейтрализации реакции среды, улучшению структуры создаваемых и восстанавливаемых горизонтов почв, стабилизации условий питания газонного травостоя [Yakovlev e.a., 2013].

Острой экологической проблемой наших дней стали и большие объемы навоза и птичьего помета, производимые на крупных животноводческих комплексах, которые узко локализованы и требуют разработки наилучших доступных технологий для экологически безопасного и экономически эффективного использования их отходов в качестве потенциально очень ценных и прибыльных органических удобрений [Ayilara e.a., 2020].

Целью данной работы является демонстрация основанных на мониторинговых исследованиях в двух специализированных микрополевых опытах результатов агроэкологической оценки эффективности использования фосфогипса и компоста на основе перепелиного помета при восстановлении эрозионно и антропогенно нарушенных дерново-подзолистых почв с формированием устойчивого травостоя и стабилизацией углеродного баланса регенерируемого верхнего горизонта почвы в условиях репрезентативного для агроландшафтов со старопахотными дерново-подзолистыми почвами центра Московской области Агроэкологического стационара на Полевой опытной станции Российского государственного аграрного университета – Московской сельскохозяйственной академии имени К.А. Тимирязева.

Работа выполнена при поддержке Российско-итальянского проекта «Интеграция IoT датчиков и алгоритмов искусственного интеллекта для точного климатически сбалансированного сель-

ского хозяйства и систем поддержки принятия решений» (грант Министерства науки и высшего образования РФ № 075-15-2021-1030) на базе Демонстрационного опыта по использованию фосфогипса для повышения устойчивости и экологического качества углерод-депонирующих экосистем, заложенного при поддержке АО «Апатит».

1. Актуальные задачи восстановления плодородия эрозионно деградированных почв с использованием отходов промышленности и сельского хозяйства

На фоне глобальных изменений климата серьезно обострились агроэкологические проблемы антропогенно активизированной эрозии и агрогенной деградации интенсивно используемых пахотных почв [Tilaki e.a., 2022; Nou e.a., 2022].

Повышенная интенсивность и продолжительность менее частых, чем ранее, весенних и летних осадков формирует повышенный поверхностный сток и провоцирует ускоренное развитие эрозии с потерей наиболее богатых гумусом мелкозернистых частиц из верхнего горизонта почвы [Nou e.a., 2022].

Сменяющие их засушливые периоды стали более продолжительными, чем ранее [Di Paola e.a., 2018], и активизируют процессы некомпенсированной минерализации растительных остатков и органического вещества почв, что еще сильнее сокращает запасы гумуса в верхних почвенных горизонтах [Васенев и др., 2001].

Дегумификация верхних горизонтов почв обычно сопровождается их дезагрегацией и переуплотнением вследствие значительного снижения их пористости, что приводит к пониженной способности быстро поглощать осадки и часто сопровождается дальнейшим ускорением агрогенно активизированной эрозии [Цифровые технологии..., 2022].

Наиболее остро эта проблема стоит в случае старопашотных дерново-подзолистых почв с изначально низким содержанием гумуса и небольшой исходной мощностью их дерновых горизонтов [Морев, 2017]. Даже в природном состоянии дерново-подзолистые почвы, доминирующие в Нечерноземной зоне Европейской части России и Западной Сибири, характеризуются малой мощностью органоминеральных, гумусово-аккумулятивных горизонтов и низкими запасами почвенного органического вещества (или гумуса), которые быстро истощаются при интенсивном сельскохозяйственном использовании и из-за широко распространенной

антропогенной деградации почв.

Ускоренное развитие их эрозии часто сопровождается резким падением плодородия почв, что в случае сильно выраженной эрозии обуславливает необходимость проведения восстановительной агротехнической мелиорации эрозионно деградированных дерново-подзолистых почв, которая обязательна при их сильном техногенном нарушении и последующей рекультивации этих почв в зоне воздействия строительных и транспортных проектов [Vasenev e.a., 2021].

Наряду с этим, на фоне характерных для XXI века ускоренно развивающихся глобальных изменений климата, быстро растет интерес к более интенсивному, но экологически безопасному сельскохозяйственному использованию этих земель [Saadaoui e.a., 2017; Tiefenbacher e.a., 2021] с относительно стабильным режимом увлажнения почвы и растущим из года в год количеством активных температур [Vasenev e.a., 2013; 2015].

Для улучшения структурно-агрегатного состояния и стабилизации углеродного баланса дерново-подзолистых почв традиционно используются известь-содержащие мелиоранты [Агроэкологическая оценка..., 2012]. Однако их широкое применение часто бывает ограничено высокой стоимостью коммерческих мелиорантов и нередко фиксируемым повышенным содержанием тяжелых металлов при использовании известь-содержащих промышленных отходов [Santa-Cruz e.a., 2021].

Наше исследование предусматривает изучение влияния промышленных отходов, массово накапливаемых при производстве фосфорных удобрений – фосфогипса – на стабилизацию углеродного баланса регенерируемого верхнего горизонта деградированных дерново-подзолистых почв.

Фосфогипс является основным побочным продуктом производства фосфорных удобрений, который необходимо ежегодно утилизировать для снижения негативного воздействия на окружающую среду в месте его производства и временного хранения [Santa-Cruz e.a., 2021; Gorbunov e.a., 1992].

В то же время фосфогипс содержит катионы, способствующие стабилизации гумусовых веществ, и характеризуется высокой и

повышенной концентрацией целого ряда макро- и мезо-элементов питания растений, прежде всего – фосфора и серы [Sultanova e.a., 2017], потенциальной способностью регулировать реакцию почвенной среды, условия питания растений [Григулетский и др., 2021; Синявский и др., 2022] и микроорганизмов, углеродный статус почв и подвижность загрязняющих веществ.

Фосфогипс традиционно используется для мелиорации и нейтрализации щелочной реакции среды солонцеватых почв [Grabas e.a., 2019; Saadaoui e.a., 2017; Wang, 2020], но были опубликованы работы с положительными результатами его применения на подзолистых почвах – без существенного подкисления их реакции [Окорков, 2007].

Дополнительный интерес к агроэкологическим исследованиям по стабилизации углеродного баланса регенерируемого верхнего горизонта деградированных дерново-подзолистых почв связан с проблемой ускоренной деградации функционально-экологического качества почвогрунтов газонных экосистем в условиях повышенной рекреационной нагрузки на них в мегаполисах, где они играют жизненно важную роль в регулировании качества основных природных компонентов городской среды [Vasenev e.a., 2013; 2015; Визирская и др., 2013; Yakovlev e. a., 2013].

В то же время большинство газонов, искусственно созданных на торфяно-песчаных почвогрунтах или капитально реконструированных с их использованием, характеризуются повышенной нестабильностью материала их почвогрунтов и состояния травостоя в условиях повышенной аэрации органической массы торфа и высокой антропогенной нагрузки [Shchepereleva e.a., 2017; 2019], а следовательно, требуют регулярного обновления почвенного материала и значительных дополнительных затрат по уходу.

В значительной мере повышенная нестабильность и ускоренная минерализация органического вещества наиболее распространены газонов и используемых при их создании и восстановлении почвогрунтов связаны с торфо-песчаным составом последних [Vasenev e.a., 2018]. Торф в торфо-песчаных почвогрунтах, как правило, быстро минерализуется с образованием CO_2 , увеличивая общие выбросы парниковых газов городскими экосистемами.

Добавление фосфогипса в торфо-песчаные почвенные субстраты может способствовать частичной стабилизации их органического вещества, нейтрализации реакции среды и улучшению питания газонного травостоя. Это важно для существенного продления планового периода сохранения газонов и регенерированных верхних горизонтов городских почв, снижения затрат на восстановление эродированных почв и уход за газоном, а также уменьшения потоков парниковых газов из газонных урбоэкосистем.

К наиболее острым экологическим проблемам нашего времени относятся и большие объемы навоза и птичьего помета, ежегодно производимые на крупных животноводческих комплексах [De Neve e.a., 2003]. Они являются сырьем для производства агроэкологически привлекательных, очень ценных [Vetterlein, Hüttl, 1999] и потенциально прибыльных органических удобрений.

Однако в большинстве случаев высокорентабельные крупные животноводческие комплексы очень узко локализованы, что серьезно усложняет логистику применения их навоза и птичьего помета и требует разработки наилучших доступных технологий для экологически безопасного и экономически эффективного их использования [Urta e.a., 2019; Grabas e.a., 2019; Ayilara e.a., 2020].

Перепелиные птицефабрики, производящие наиболее питательно ценное мясо и яйца, относятся к активно развивающемуся направлению животноводства в Центральной России, где с ростом благосостояния значительной части населения неуклонно растет спрос на более качественные продукты питания.

При этом перепелиный помет характеризуется повышенным содержанием макро- и микроэлементов питания растений, что делает его особенно привлекательным для использования в виде компоста для восстановления эрозивно деградированных дерново-подзолистых почв с формированием на них устойчивого травостоя.

Более того, одновременно могут быть решены задачи по сокращению выбросов парниковых газов в атмосферу, что чрезвычайно важно для смягчения или замедления процессов глобального изменения климата и может принести дополнительное финансирование проектам по восстановлению деградированных земель.

2. Объекты и методы исследования на Агроэкологическом стационаре РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

Исследования проводились на Агроэкологическом стационаре Полевой опытной станции Российского государственного аграрного университета - Московской сельскохозяйственной академии имени К.А. Тимирязева (рис. 2.1) в годичном цикле с осени 2022 г. по осень 2023 г. при необычно высоком количестве осадков в период с мая по август 2023 года: 644 мм, что составляет 215% от среднего количества осадков за май-август в предшествующий двенадцатилетний период с 2011 по 2022 года (табл. 2.1).

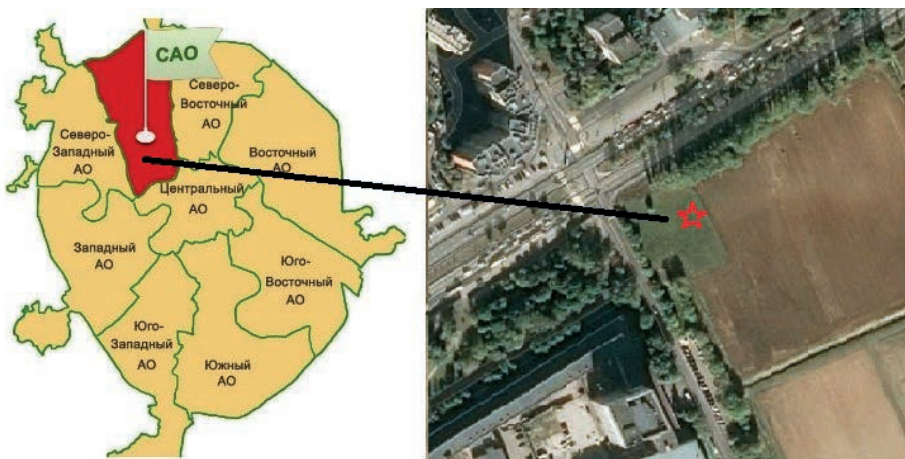


Рис. 2.1. Местоположение (55°50'24" северной широты 37°33'02" восточной долготы) микрополевых опытов по повышению продуктивности травостоя с применением фосфогипса и компоста перепелиного помета на Агроэкологическом стационаре РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

Таблица 2.1. Погодные условия в период с мая по август 2023 года в сравнении со средними данными за этот период для 2011–2022 годов (по данным метеообсерватории имени В.А. Михельсона РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева).

Месяц	Декада	Средняя температура воздуха, °С		Количество осадков, мм			
		2011–2022	2023	2011–2022	2023		
Май	1		8.6	61	11	73	
	2	13.6	16.4		4		
	3		16.5		58		
Июнь	1		15.8	77	35	140	
	2	17.3	19.8		1		
	3		18.6		104		
Июль	1		21.7	84	6	305	
	2	19.7	17.1		143		
	3		19.3		156		
Август	1		24.1	78	0	126	
	2	17.6	21.5		117		
	3		16.6		9		
Май – август		17.1		18.0	300		644

Профиль эрозионно деградированных пахотных дерново-подзолистых почв на Агроэкологическом стационаре РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева состоит из следующих горизонтов:

- АЕВр – пахотный эродированный, гетерогенный по составу горизонт мощностью около 20 см, неоднородный по окраске и слоению, переуплотненный и значительно дезагрегированный, с супесчаными и суглинистыми морфонами из ис-

ходного гумусово-аккумулятивного, элювиального и переходного элювиально-иллювиального горизонтов;

- EВt – переходный элювиально-иллювиальный горизонт мощностью около 10-15 см, неоднородный по окраске и сложению, переуплотненный и значительно дезагрегированный с элювиальными супесчаными и иллювиальными тяжелосуглинистыми морфонами;
- Вt – плотный текстурно-дифференцированный иллювиальный горизонт мощностью около 60-65 см, тяжелосуглинистого состава моренного происхождения.

Его сильно деградированный пахотный горизонт чрезмерно уплотнен и поэтому имеет низкие запасы влаги (табл. 2.2). Он характеризуется кислой реакцией среды и низким содержанием почвенного органического углерода, нитратов и подвижной серы при среднем содержании подвижного фосфора и калия, повышенном содержании аммония (табл. 2.2).

Таблица 2.2. Средние значения и стандартные отклонения ($M \pm \delta$) физических, физико-химических и химических параметров пахотного горизонта эрозионно деградированных пахотных дерново-подзолистых почв в месте проведения полевого опыта

Плотность сложения почвы, г/см ³	Весовая влажность почвы, %	pH _{KCl}	Содержание органического углерода, %
1.32±0.07	8.4±1.9	5.04 ± 0.18	0.80 ± 0.08

Содержание подвижных форм основных элементов питания, мг/кг				
NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	P ₂ O ₅	K ₂ O	S
4.67±1.45	40.2±4.5	72.4±2.3	61.9±14.0	1.33±1.10

В ходе агротехнической мелиорации с восстановлением дернового горизонта антропогенно эродированной пахотной дерново-подзолистой почвы с применением торфо-песчаного почво-грунта на элементарных площадках микрополевого опыта были созданы однотипные регенеративные органоминеральные горизонты мощностью 15 см из материала традиционно исполь-

зуемого в проектах озеленения торфо-песчаного почво-грунта (с массовым соотношением торфа к песку 1 к 3), с применением, по вариантам опыта, компоста из перепелиного помета в дозе 2,0 т/ га, фосфогипса в дозах 1,5 т/га и 3,0 т/га и комбинации компоста в дозе 2,0 т/га с фосфогипсом в дозах 4,5 т/га и 6,0 т/га.

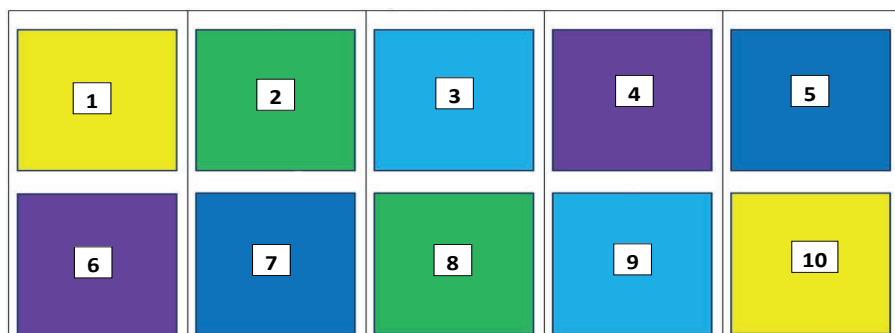
Компост из перепелиного помета характеризуется высокой остаточной влажностью, щелочной реакцией среды, высоким содержанием общего азота и очень высоким содержанием подвижных форм фосфора и калия (табл. 2.3).

Таблица 2.3. Средние значения и стандартные отклонения ($M \pm \delta$) влажности, pH и содержания основных элементов питания в компосте

Весовая влажность, %	pH _{H2O}	Содержание подвижных форм, мг/кг		Содержание азота, %
		P ₂ O ₅	K ₂ O	
47.8±2.9	9.21±0.02	3050±50	4550±50	1.80±0.05

Фосфогипс характеризуется повышенным содержанием всего набора необходимых растениям макро- и микроэлементов: фосфора – 1–1,4%, серы – до 38%, кремнезема – 0,26%, цинка – 0,03% – и имеет много кальция (21%), катионы которого потенциально способны частично нейтрализовать кислую реакцию среды почвы и существенно увеличить насыщенность почвенного поглощающего комплекса.

Схема первого микрополевого опыта по агроэкологической оценке последствий применения фосфогипса с элементарными участками площадью 4 м² (2 м x 2 м) включает заложенные в двойной повторности вариант контроля (с традиционно используемым в проектах озеленения торфо-песчаным почво-грунтом без применения мелиорантов) и варианты с дополнительным применением фосфогипса в дозах 1,5 т/га и 3,0 т/га (рис. 2.2).

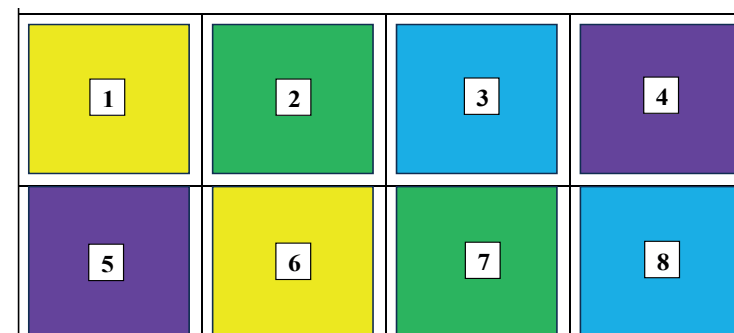


Вариант опыта	Дозы применения фосфогипса, т/га	№ № элементарных участков
I	-	1; 10
II	1,5	2; 8
III	3,0	3; 9

Рис. 2.2. Схема расположения элементарных участков 1-го микрополевого опыта по агроэкологической оценке последствий применения фосфогипса

Схема второго микрополевого опыта по агроэкологической оценке последствий применения компоста из перепелиного помета с элементарными участками площадью 4 м² (2 м x 2 м – рис. 2.3) включает заложенные в двойной повторности вариант контроля (с традиционно используемым в проектах озеленения торфо-песчаным почво-грунтом без применения компоста), варианты с применением компоста из перепелиного помета (в дозе 2,0 т/га) и варианты с применением компоста (в дозе 2,0 т/га) в сочетании с увеличивающимися дозами фосфогипса (4,5 т/га и 6,0 т/га), которые были добавлены в торфо-песчаный почво-грунт.

При формировании в августе 2022 года на участках микрополевых опытов травостоя использовали травосмесь с доминированием овсяницы и райграса: райграс пастбищный (*Lolium perenne*) (40%), овсяница красная Максим 1 (*Festuca rubra*) (40%), овсяница красная Гринлайт (*Festuca rubra*) (10%), мятлик луговой (*Poa pratensis*) (10%) – с нормой высева 50 г/м² (200 г на элементарный участок опыта).



Вариант опыта	Дозы применения:		№ № элементарных участков
	компоста, т/га	фосфогипса, т/га	
I	-	-	1; 6
II	2.0	-	2; 7
III	2.0	4.5	3; 8
IV	2.0	6.0	4; 5

Рис. 2.3. Схема расположения элементарных участков 2-го микрополевого опыта по агроэкологической оценке последствий применения компоста

Для проведения сезонного мониторинга почвенных потоков CO₂ на всех участках после первоначального формирования травяного покрова в августе 2022 года были установлены основания напочвенных экспозиционных камер, временно размещаемых в периоды прямых наблюдений за почвенными потоками (рис. 2.4).



Сентябрь 2022 г.

Октябрь 2022 г.

Рис. 2.4. Микрополевым эксперимент с основаниями напочвенных экспозиционных камер для проведения сезонного мониторинга почвенных потоков CO₂

Мониторинг и оценка содержания органического углерода в верхнем горизонте формируемой дернины почвы, почвенных режимов температуры, влажности и динамики формирования травянистой биомассы проводился с использованием традиционных методов агроэкологического мониторинга [Визирская и др., 2013; Yakovlev e.a., 2013; Vasenev e.a., 2015; Shchepeleva e.a., 2017] и функционально-экологической оценки земель [Васенев и др., 2010; Vasenev e.a., 2017; 2018; Shchepeleva e.a., 2019].

Мониторинг влажности и температуры почвы с использованием IoT-датчиков CropTalker и портативных электронных устройств: почвенного термометра Checktemp 1 и влагомера Theratrobe NH2. Определение почвенных потоков углекислого газа портативным газоанализатором LiCor-820 in situ [Спыну и др., 2022]. Учет надземной травянистой биомассы и скорости ее роста методом последовательного скашивания и IoT-датчиками CropTalker [Цифровые технологии..., 2022].

3. Сезонная динамика свойств формируемого дернового горизонта по вариантам опыта

Проведенные в первом микрополевым опыте по агроэкологической оценке последствий применения фосфогипса сезонные мониторинговые исследования показали относительно небольшое, но статистически значимое (даже на фоне сезонной динамики) снижение по сравнению с контрольным вариантом плотности сложения верхнего дернового горизонта (мощностью в 6 см) регенерируемой дерново-подзолистой почвы в обоих вариантах внесения фосфогипса (рис. 3.1).

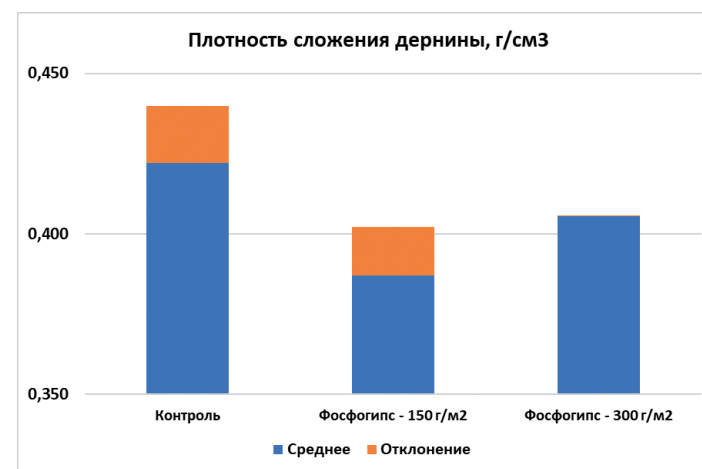


Рис. 3.1. Средние значения за теплый сезон 2023 года (май - сентябрь) и стандартные отклонения плотности сложения верхнего дернового горизонта (0–6 см) регенерируемой дерново-подзолистой почвы по вариантам микрополевого опыта с применением фосфогипса

В условиях основного летнего сезона (май - август) 2023 года с сильно превышающим среднеголетние значения количеством осадков (см. табл. 2.1) значительные изменения влажности верхнего дернового горизонта регенерируемой почвы в вариантах с применением фосфогипса статистически незначимы на фоне ярко выраженной сезонной динамики (рис. 3.2).

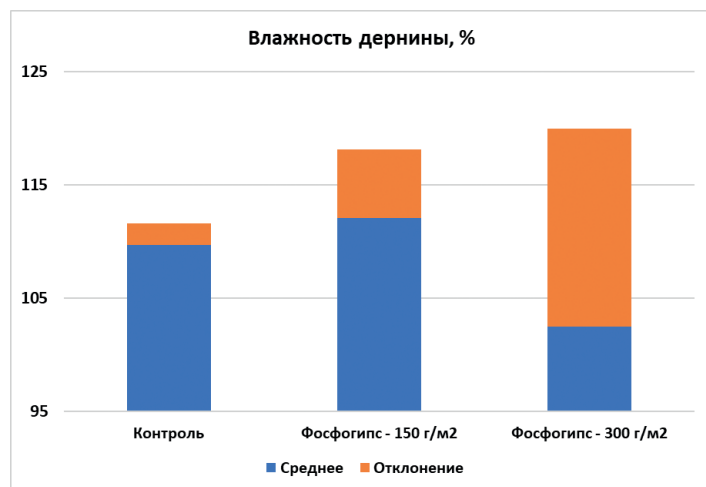


Рис. 3.2. Средние значения за теплый сезон 2023 года (май - сентябрь) и стандартные отклонения влажности верхнего дернового горизонта (0–6 см) регенерируемой дерново-подзолистой почвы по вариантам микрополевого опыта с применением фосфогипса

Исходное содержание органического вещества в начале основного вегетационного периода 2023 года (рис. 3.3, 28.04.2023) незначительно и статистически незначимо различается между вариантами микрополевого опыта с применением фосфогипса. Максимальные различия между средними значениями содержания органического вещества в трех вариантах опыта не превышают 2,5%, что составляет не более 10 относительных процентов от его содержания в исследованных вариантах и, в целом, характерно для торфяно-песчаных почв.

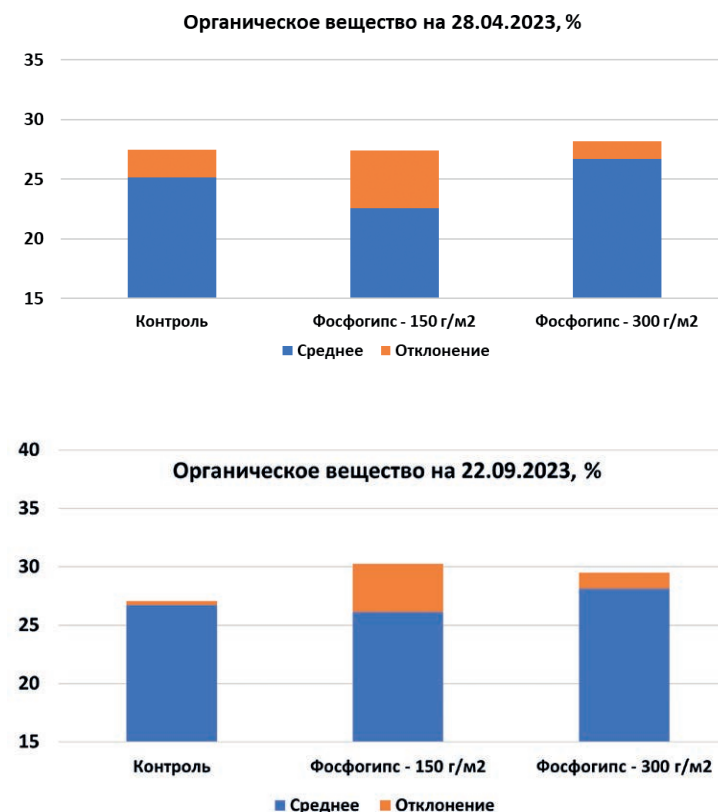


Рис. 3.3. Сезонная динамика средних значений и стандартных отклонений содержания органического вещества в верхнем дерновом горизонте (0–6 см) регенерируемой дерново-подзолистой почвы по вариантам микрополевого опыта с применением фосфогипса

В конце основного вегетационного периода (рис. 3.3, 22.09.2023) все варианты опыта показали значительное, но статистически недостоверное увеличение содержания органического вещества в верхнем дерновом горизонте (0–6 см) регенерируемой дерново-подзолистой почвы – с максимальным приростом при дозе применения фосфогипса 150 г/м² (1,5 т/га).

Во втором, двухфакторном, микрополевом опыте по агроэкологической оценке последствий применения компоста из перепелиного помета и фосфогипса состав и свойства регенериру-

емого дернового горизонта (табл. 3.1) первоначально довольно существенно отличаются от пахотного и гумусово-аккумулятивно-го горизонта доминирующих в регионе полнопрофильных дерново-подзолистых почв [Васенев и др., 2010; Визирская и др., 2013; Vasenev e.a., 2013; 2015; Shchepelova e.a., 2019], но уже через три месяца исходно существенные различия по содержанию в них нитратов, обменного кальция и магния в значительной мере сглаживаются.

Таблица 3.1. Средние значения и стандартные отклонения ($M \pm \delta$) pH и содержания обменных катионов в регенерируемом дерновом горизонте эрозионно-деградированных дерново-подзолистых почв по вариантам опыта летом и осенью 2022 г.

Вариант опыта	Месяц 2022 года	pH _{H2O}	Содержание обменных катионов, ммоль/100 г	
			Ca	Mg
Контроль	VIII	7.67±0.08	114±6.9	20.2±0.5
	XI	7.94±0.02	45.2±4.1	20.3±1.5
Применение компоста в дозе 2 т/га	VIII	7.73±0.07	102±19.2	20.8±1.5
	XI	7.94±0.02	29.0±8.5	19.0±2.0
Применение компоста в дозе 2 т/га и фосфогипса в дозе 4,5 т/га	VIII	7.30±0.06	131±12.4	20.0±1.2
	XI	7.76±0.04	37.7±4.2	17.0±1.1
Применение компоста в дозе 2 т/га и фосфогипса в дозе 6 т/га	VIII	7.21±0.03	142 ± 6.4	18.1±0.5
	XI	7.68±0.04	49.4±5.2	17.6±0.9

Более того, в вариантах с использованием компоста это может происходить даже быстрее, чем в контрольном варианте горизонта, регенерируемого только на основе торфяно-песчаной смеси (табл. 3.1, 3.2).

Таблица 3.2. Средние значения и стандартные отклонения ($M \pm \delta$) содержания основных элементов питания в регенерируемом дерновом горизонте эрозионно-деградированных дерново-подзолистых почв по вариантам опыта летом и осенью 2022 г.

Вариант опыта	Месяц 2022 года	Содержание нитратов, мг/кг	Содержание подвижных форм, мг/кг	
			P ₂ O ₅	P ₂ O ₅
Контроль	VIII	202±32.3	62.5±5.6	211±25.9
	XI	24.2±6.4	263±74.9	547±93.1
Применение компоста в дозе 2 т/га	VIII	130±29.0	329±99.3	422±57.1
	XI	24.8±4.1	317±93.2	1068±318
Применение компоста в дозе 2 т/га и фосфогипса в дозе 4,5 т/га	VIII	177±36.8	461±66.2	375±45.0
	XI	21.5±7.2	404±125	652±173
Применение компоста в дозе 2 т/га и фосфогипса в дозе 6 т/га	VIII	205±16.9	479±117	313±41.6
	XI	13.7±2.1	429±96.7	340±82.1

Проведенные исследования показали относительно небольшое, но статистически значимое (даже на фоне сезонной динамики летом 2023 г.) снижение по сравнению с контрольным вариантом плотности сложения верхнего дернового горизонта регенерируемой почвы (мощностью 6 см) в обоих вариантах внесения компоста в сочетании с фосфогипсом (рис. 3.4).

В то же время, в условиях летнего сезона 2023 года с очень высоким количеством осадков (см. табл. 2.1) изменения влажности верхнего дернового горизонта регенерируемой почвы достаточно очевидны и статистически значимы только в случае внесения компоста без фосфогипса (рис. 3.5).

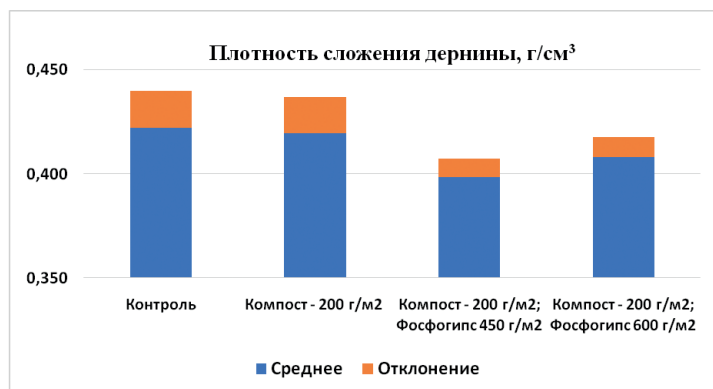


Рис. 3.4. Средние значения за сезон и стандартные отклонения плотности сложения верхнего дернового горизонта (0–6 см) регенерируемой дерново-подзолистой почвы по вариантам микрополевого опыта с применением компоста и фосфогипса

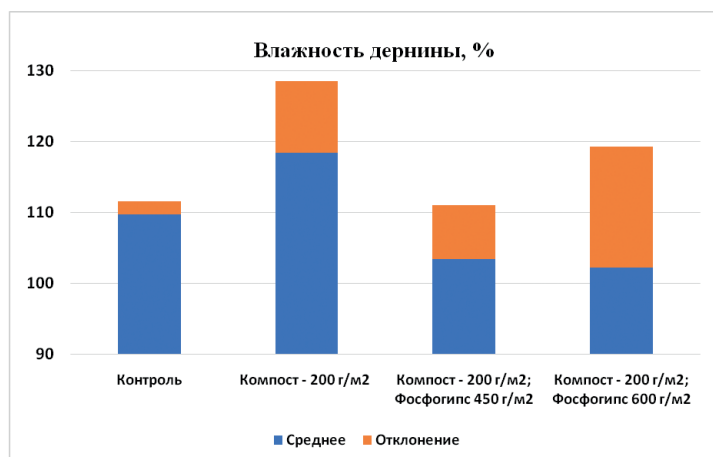


Рис. 3.5. Средние значения за сезон и стандартные отклонения влажности верхнего дернового горизонта (0–6 см) регенерируемой дерново-подзолистой почвы по вариантам микрополевого опыта с применением компоста и фосфогипса

Исходное содержание органического вещества в начале основного вегетационного периода (рис. 3.6, 28.04.2023) незначительно и статистически незначимо различается между вариантами эксперимента

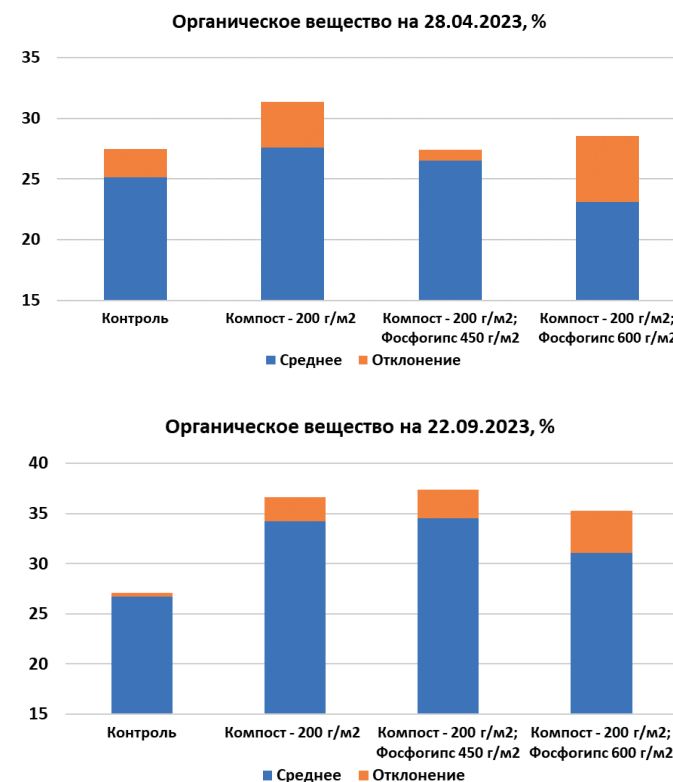


Рис. 3.6. Сезонная динамика средних значений и стандартных отклонений содержания органического вещества в верхнем дерновом горизонте (0–6 см) регенерируемой дерново-подзолистой почвы по вариантам микрополевого опыта с применением компоста и фосфогипса

Максимальные различия между средними значениями содержания органического вещества в разных вариантах второго микрополевого опыта, как и в первом опыте (см. рис. 3.3), не превышают 2,5%, что составляет не более 10 относительных процентов от его содержания в исследованных вариантах и, в целом, характерно для торфяно-песчаных почв.

В конце основного вегетационного периода (рис. 3.6, 22.09.2023) два варианта опыта – с внесением 2 т/га компоста из перепелиного помета и с внесением компоста в сочетании с фосфогипсом соответственно в дозах 2,0 т/га + 4,5 т/га – показали очевидно статистически значимое и однозначно выраженное (даже на фоне сезонной динамики) накопление органического вещества в верхнем дерновом горизонте (мощностью 6 см) регенерируемой дерново-подзолистой почвы. В то же время содержание органического вещества в контрольном варианте осталось практически неизменным.

4. Сезонная динамика почвенной эмиссии CO₂ по вариантам опыта

В большинстве исследуемых в двух микрополевых опытах вариантов почвогрунтов, используемых для восстановления дернового горизонта эрозионно деградированных дерново-подзолистых почв ярко выражена сезонная динамика почвенной эмиссии CO₂ (рис. 4.1 – 4.3), измеряемой в дневное время, в период с 10:00 до 15:00.

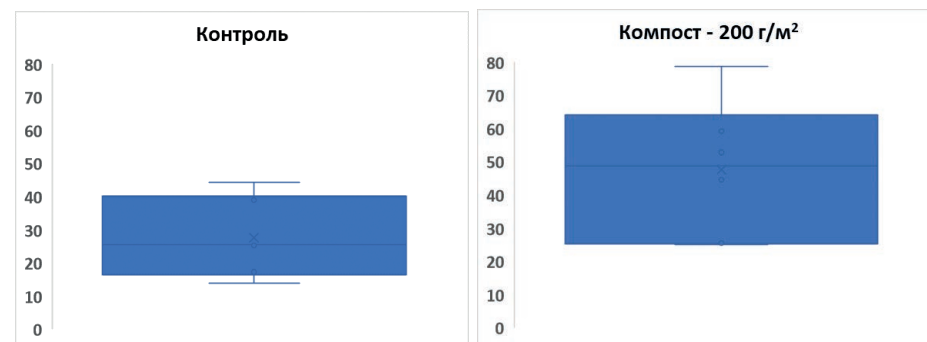


Рис. 4.1. Диаграммы размаха сезонной динамики суточных значений почвенной эмиссии CO₂ (г/м² в сутки) в вариантах микрополевого опыта с контролем и применением компоста

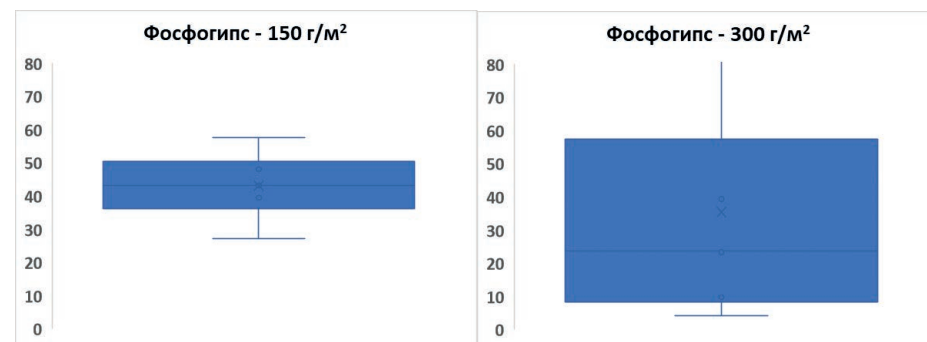


Рис. 4.2. Диаграммы размаха сезонной динамики суточных значений почвенной эмиссии CO₂ (г/м² в сутки) в вариантах микрополевого опыта с применением фосфогипса

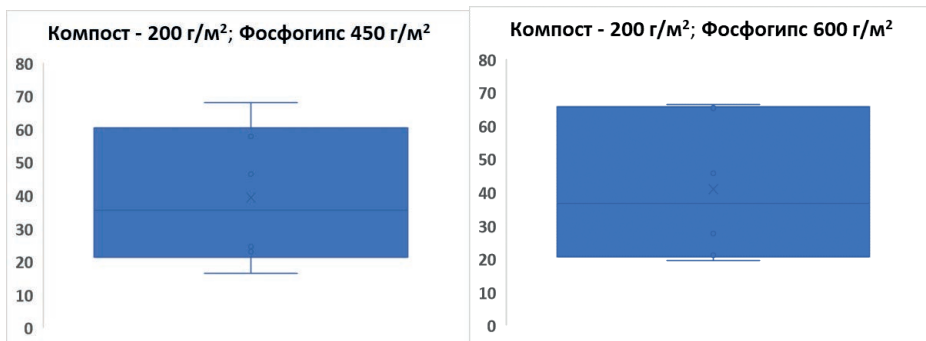


Рис. 4.3. Диаграммы размаха сезонной динамики суточных значений почвенной эмиссии CO_2 (г/м^2 в сутки) в вариантах микрополевого опыта с применением комбинации компоста и фосфогипса

В меньшей степени это выражено в варианте опыта с внесением 1,5 т/га фосфогипса, который характеризуется статистически значимым увеличением почвенной эмиссии CO_2 по сравнению с контролем (рис. 4.4).

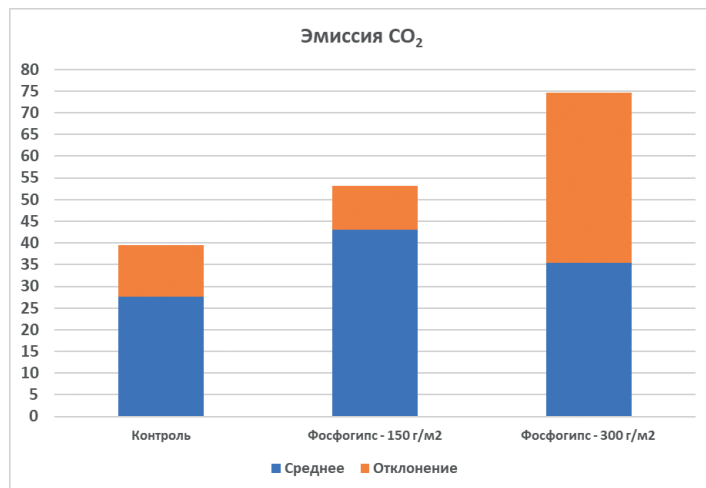


Рис. 4.4. Средние значения за сезон и стандартные отклонения суточных значений почвенной эмиссии CO_2 (г/м^2 в сутки) регенерируемой дерново-подзолистой почвы по вариантам микрополевого опыта с применением фосфогипса

Все варианты с применением компоста и комбинаций компоста с фосфогипсом также характеризуются в среднем значительным повышением общей интенсивности почвенной эмиссии CO_2 , но на фоне ярко выраженной сезонной динамики различия между этими вариантами опыта статистически недостоверны (рис. 4.5).

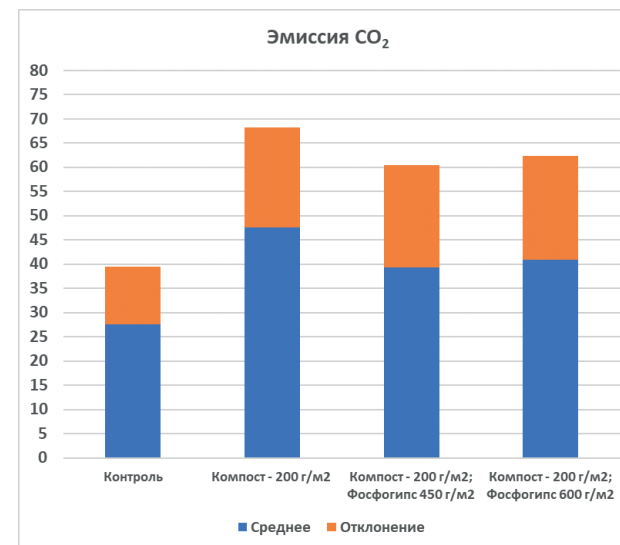


Рис. 4.5. Средние значения за сезон и стандартные отклонения суточных значений почвенной эмиссии CO_2 (г/м^2 в сутки) регенерируемой дерново-подзолистой почвы по вариантам микрополевого опыта с применением компоста и фосфогипса

5. Сезонная динамика развития продукционного процесса и травостоя по вариантам опыта

Наиболее ярко выражены различия между вариантами первого микрополевого опыта по агроэкологической оценке последствий применения фосфогипса при анализе сезонной динамики проективного покрытия травостоя (рис. 5.1).

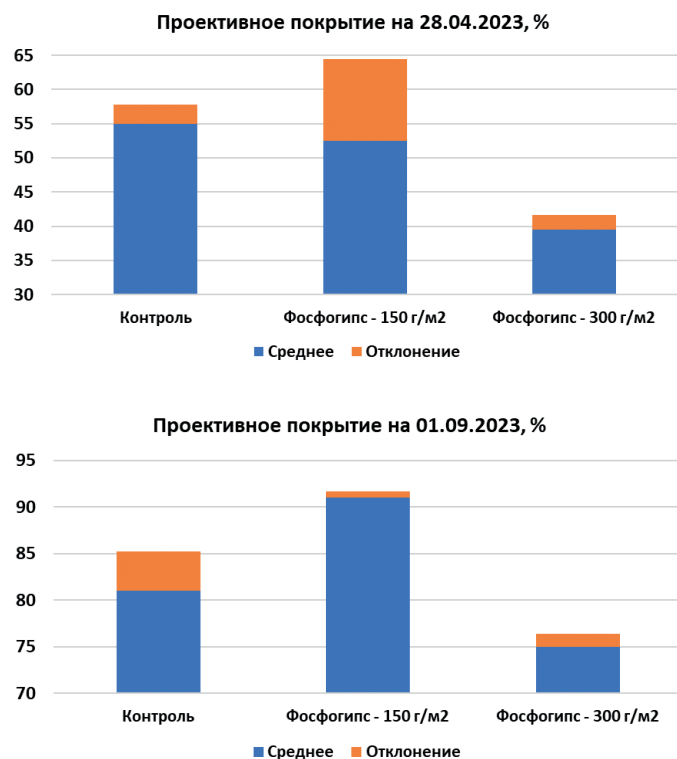


Рис. 5.1. Сезонная динамика средних значений и стандартных отклонений проективного покрытия травостоя на регенерируемой дерново-подзолистой почве по вариантам микрополевого опыта с применением фосфогипса

Если в начале весеннего периода вегетации максимальные средние значения проективного покрытия характерны для варианта контроля, вариант с применением фосфогипса в минимальной дозе 1,5 т/га характеризуется очень неравномерным проективным покрытием, а на варианте с двойной дозой фосфогипса (3,0 т/га) оно почти в полтора раза ниже контроля (рис. 5.1, 28.04.2023), то уже в конце первого летнего периода (на 1.09.2023) среднее значение проективного покрытия в варианте с применением фосфогипса в дозе 1,5 т/га превышает 90%, что статистически достоверно выше контроля на 15% при минимальном пространственном варьировании проективного покрытия и сокращении разницы между вариантом с двойной дозой фосфогипса и контролем до 6%.

В случае второго микрополевого опыта по агроэкологической оценке последствий применения компоста и совместного применения компоста и фосфогипса ранневесеннее проективное покрытие в начале основного вегетационного периода 2023 года также было самым высоким и стабильным по площади на контрольном варианте опыта (рис. 5.2, 28.04.2023).

В конце летнего вегетационного сезона различия по проективному покрытию между всеми вариантами опыта становятся явно несущественными (рис. 5.2, 22.09.2023) – при уровне варьирования его средних значений от 82 до 85%.

Наиболее выражены различия между рассматриваемыми вариантами микрополевых опытов в скорости образования надземной травянистой биомассы (рис. 5.3 и 5.4).

В первом микрополевым опыте среднее значение сформированной за сезон надземной травянистой биомассы в варианте с применением фосфогипса в минимальной дозе 1,5 т/га статистически достоверно в 4 раза превышает сезонную интенсивность продукционного процесса в варианте контроля (рис. 5.3). В случае с двойной дозой фосфогипса (3,0 т/га) различия с контролем снижаются до полутора кратных.

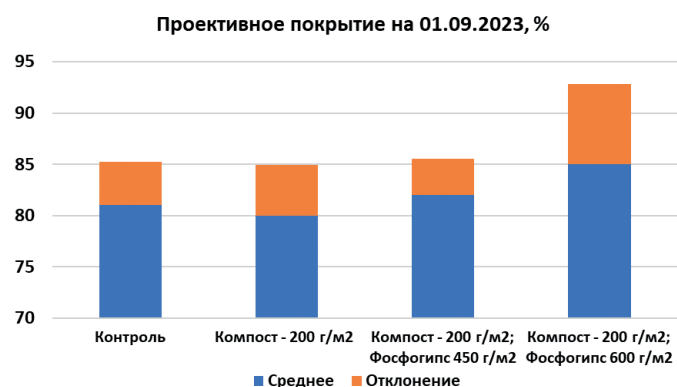
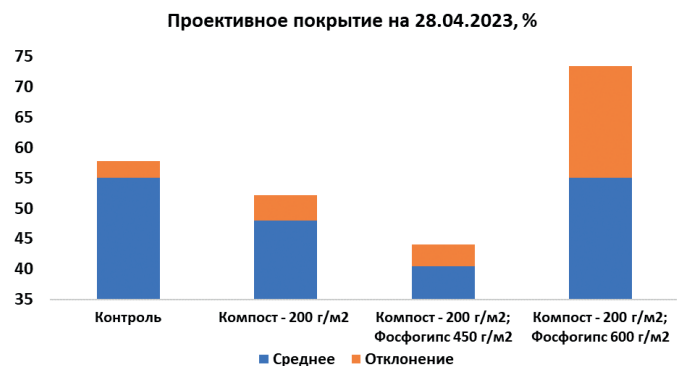


Рис. 5.2. Сезонная динамика средних значений и стандартных отклонений проективного покрытия травостоя на регенерируемой дерново-подзолистой почве по вариантам микрополевого опыта с применением компоста и фосфогипса

В трех основных вариантах второго микрополевого опыта – с внесением компоста из перепелиного помета в дозе 2,0 т/га и компоста в этой дозе в сочетании с фосфогипсом в дозах 4,5 т/ га и 6,0 т/га – они также очевидно статистически достоверны и достигают более чем 4-кратных превышений по отношению к контролю, с относительно небольшим разбросом между повторениями (рис. 5.4).

В наиболее биологически продуктивном варианте опыта с применением компоста общая масса сезонно накопленной травянистой биомассы была даже в 5 раз выше, чем в контрольном варианте опыта.

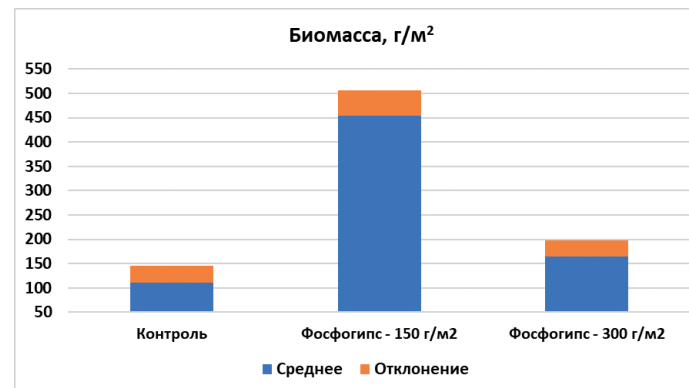


Рис. 5.3. Средние значения и стандартные отклонения сформированной за сезон надземной травянистой биомассы по вариантам микрополевого опыта с применением фосфогипса

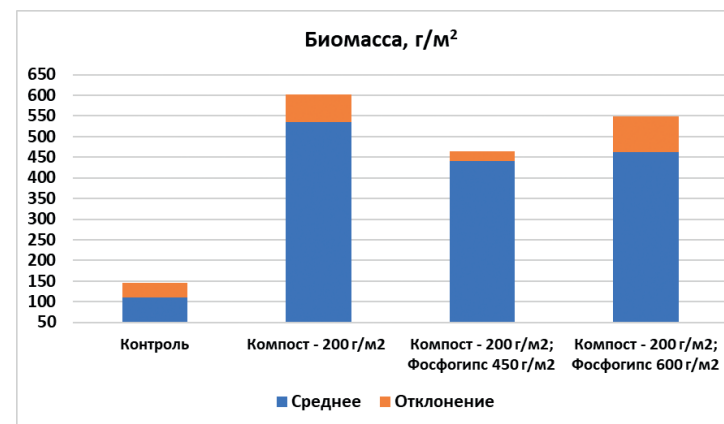


Рис. 5.4. Средние значения и стандартные отклонения сформированной за сезон надземной травянистой биомассы по вариантам микрополевого опыта с применением компоста и фосфогипса

6. Оценка углеродного баланса исследуемых модельных агроэкосистем с применением почво- и углерод-сберегающих технологий утилизации отходов промышленности и сельского хозяйства

Суммирование сезонного накопления органического углерода в верхнем дерновом горизонте регенерируемой дерново-подзолистой почвы ($\Delta\text{Corg-s}$), в надземной травянистой растительности ($\Sigma\text{Corg-gr}$) и ее корневой биомассе ($\Sigma\text{Corg-r}$) за вычетом общей почвенной эмиссии углерода за сезон (по данным прямого измерения почвенных потоков CO_2 *in situ* ($\Sigma\text{C-CO}_2$)) позволяет нам количественно оценить интегральные потоки углерода между локальными системами «почва-растение», исследованными в микрополевым опыте, и приземным слоем атмосферного воздуха (табл. 6.1).

Проведенный анализ результатов микрополевых опытов показывает ярко выраженное изменение от доминирования почвенной эмиссии CO_2 в сезонном балансе углерода варианта контроля (-819 г/м²) к интегральному поглощению углерода атмосферой в опытных вариантах с внесением 2 т/га компоста из перепелиного помета (879 г/м²), с использованием компоста в сочетании с фосфогипсом, соответственно, в дозах 2,0 т/га и 4,5 т/га (730 г/м²) и с использованием фосфогипса в дозе 1,5 т/га (590 г/м²).

Повышенные дозы применения фосфогипса снижают положительную динамику накопления органического углерода в восстанавливаемом дерновом горизонте регенерируемой дерново-подзолистой почвы и существенно повышают минерализационную активность почвенной микробиоты, что приводит к доминированию почвенной эмиссии CO_2 в сезонном балансе углерода локальной системы «почва-растение».

Применение компоста в дозе 2 т/га частично снимает отрицательное последствие применения фосфогипса вплоть до дозы 4,5 т/га, но уже «не срабатывает» при дозе фосфогипса 6 т/га.

Таблица 6.1. Оценка интегральных потоков углерода между локальными системами «почва-растение», исследованными в микрополевым опыте, и приземным слоем атмосферного воздуха за сезон май – сентябрь 2023 г.

Вариант опыта	$\Delta\text{Corg-s}$, г/м ²	$\Sigma\text{Corg-gr}$, г/м ²	$\Sigma\text{Corg-r}$, г/м ²	$\Sigma\text{C-CO}_2$, г/м ²	Общий сток углерода, г/м ²
Контроль	12	55	17	903	-819
Применение фосфогипса в дозе 1,5 т/га	1704	227	68	1410	590.0
Применение фосфогипса в дозе 3,0 т/га	321	83	25	1110	-680
Применение компоста в дозе 2 т/га	1434	267	80	902	879
Применение компоста в дозе 2 т/га и фосфогипса в дозе 4,5 т/га	1733	220	66	1289	730
Применение компоста в дозе 2 т/га и фосфогипса в дозе 6 т/га	4	231	69	1499	-1195

Это позволяет рассматривать применение компоста из перепелиного помета в дозе 2 т/га, фосфогипса в дозе 1,5 т/га и их комбинации при дозе фосфогипса не более 4,5 т/га на 2 т/га компоста для восстановления (регенерации) эрозионно деградированных дерново-подзолистых почв в качестве прототипов наилучших доступных технологий агробиотехнической мелиорации антропогенно нарушенных дерново-подзолистых почв, принимая

во внимание положительное агроэкологическое последствие применения верифицированных доз компоста и фосфогипса на стабилизацию углеродного баланса локальной агроэкосистемы, образование большого количества травянистой биомассы и экологически безопасную и экономически рентабельную утилизацию отходов промышленности и животноводства.

Заключение

Проведенные исследования показали высокую эффективность и небольшие экологические риски использования компоста из перепелиного помета в дозе 2 т/га, фосфогипса в дозе 1,5 т/га и их комбинации при дозе фосфогипса не более 4,5 т/га на 2 т/га компоста для восстановления эрозионно нарушенных дерново-подзолистых почв в типичных для Московской области ландшафтных условиях со старопахотными дерново-подзолистыми почвами.

Более того, применение верифицированных доз и комбинаций этих мелиорантов в качестве улучшителя традиционно используемых в проектах озеленения торфо-песчаной почвогрунтов позволяет существенно улучшить их функциональные и экологические характеристики, включая регулирование водного режима и реакции среды, содержание макро- и мезо-элементов питания, стабилизацию почвенной поглощающей способности и степени насыщенности почвенного поглощающего комплекса, накопление углерода и поддержание положительного углеродного баланса в случае интенсивно используемых сельскохозяйственных угодий и городских газонов.

Использование компоста из перепелиного помета уже в дозе 2 т/га, а фосфогипса – уже в дозе 1,5 т/га способствовало быстрому и значительному накоплению органического углерода в верхнем дерновом горизонте исследуемых нарушенных и регенерируемых дерново-подзолистых почв.

Преимущественно влажным летом 2023 года наблюдалась повышенная интенсивность почвенной эмиссии CO₂ в вариантах с применением фосфогипса, но при значительно (многократно) более активном увеличении роста биомассы травостоя и ускоренном накоплении органического вещества в верхней части восстанавливаемого дернового горизонта можно говорить о секвестрирующем углерод атмосферы характере верифицированных нами технологий восстановления антропогенно нарушенных дерново-подзолистых почв с формированием устойчивого травостоя при утилизации фосфогипса и перепелиного помета.

Это позволяет рассматривать применение компоста из перепелиного помета в дозе 2 т/га, фосфогипса в дозе 1,5 т/га и их комбинации при дозе фосфогипса не более 4,5 т/га на 2 т/га компоста для восстановления (регенерации) эрозионно деградированных дерново-подзолистых почв в качестве прототипов наилучших доступных технологий агробиотехнической мелиорации антропогенно нарушенных дерново-подзолистых почв, имеющих положительное агроэкологическое последствие на формирование и стабилизацию положительного углеродного баланса почв и локальных агроэкосистем, формирование большого количества травянистой биомассы – с экологически безопасной и экономически рентабельной утилизацией широко распространенных отходов промышленности и животноводства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Агроэкологическая оценка земель и оптимизация землепользования / А. Л. Черногоров [и др.]. – Москва: Изд-во Московского ун-та, 2012. – 267 с. – ISBN 978-5-211-06308-2.
2. Васенев И. И. Агроэкологическое моделирование и проектирование: Интерактивный курс для подготовки магистров... / И. И. Васенев, А. В. Бузылев, Ю. А. Курбатова [и др.]. – Москва: РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева, 2010. – 260 с.
3. Визирская, М. М. Экологическая оценка роли городских газонов в формировании потоков парниковых газов / М. М. Визирская, А. С. Епихина, В. И. Васенев [и др.] // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. – 2013. – № 5. – С. 38–48.
4. Григулецкий, В. Г. Оценка эффективности применения фосфогипса в земледелии / В. Г. Григулецкий, О. В. Ширяев, Р. А. Ивакин // Экологический Вестник Северного Кавказа. – 2021. – Т. 17, № 4. – С. 20–28.
5. Методическое пособие и нормативные материалы для разработки адаптивно-ландшафтных систем земледелия: Методическое пособие и нормативные материалы / А. Н. Каштанов, И. П. Свинцов, Г. Н. Черкасов [и др.]. – Курск-Тверь: Чудо, 2001. – 260 с.
6. Морев, Д. В. Агроэкологическая оценка земель в условиях зонального ряда агроландшафтов с повышенной пестротой почвенного покрова: специальность 03.02.08 «Экология (по отраслям)»: диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Морев Дмитрий Владимирович. – Москва, 2017. – 137 с.
7. Окорков, В. В. Перспективы и пути использования фосфогипса для повышения плодородия кислых почв: методические указания / В. В. Окорков. – Владимир: Владимирский НИИ сельского хозяйства РАСХН, 2007. – 76 с.

8. Синявский И. В. Зависимость продуктивности севооборота от применения фосфогипса и удобрений / И. В. Синявский, А. М. Плотников, А. В. Созинов, Н. Д. Гущенская // *Аграрный научный журнал*. – 2022. – № 1. – С. 37-42. – DOI 10.28983/asj.y2022i1pp37-42.
9. Спыну, М. Т. Динамика эмиссии парниковых газов в почвах экологического стационара РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева / М. Т. Спыну, М. В. Тихонова, Е. М. Илюшкова [и др.] // *АгроЭкоИнфо*. – 2022. – № 4(52). – DOI 10.51419/202124429.
10. Султанова А. И. К вопросу утилизации отходов техногенного отхода фосфогипса / А. И. Султанова, А. О. Абдижаппар, М. А. Даулетов, А. С. Колесников // *Металлургия XXI столетия глазами молодых: Сборник докладов III международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Донецк, 2017* / Отв. ред. Кочура В.В. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2017. – С. 247–248.
11. Цифровые технологии агроэкологического мониторинга и оптимизация земледелия / И. И. Васенев, Н. А. Александров, И. В. Андреева [и др.]. – Москва: РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева, 2022. – 240 с. – ISBN 978-5-6048783-0-9.
12. Ayilara, M. S. Waste management through composting: Challenges and potentials / M. S. Ayilara, O. S. Olanrewaju, O. O. Babalola, O. Odeyemi // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12, No. 11. – P. 4456. – DOI 10.3390/su12114456.
13. De Neve, S. Carbon mineralization from composts and food industry wastes added to soil / S. De Neve, S. Sleutel, G. Hofman // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. – 2003. – Vol. 67, No. 1. – P. 13-20.
14. Di Paola, A. The expansion of wheat thermal suitability of Russia in response to climate change / A. Di Paola, L. Caporaso, A. Bombelli [et al.] // *Land Use Policy*. – 2018. – Vol. 78. – P. 70-77. – DOI 10.1016/j.landusepol.2018.06.035.
15. Gorbunov A. V. Effect of agricultural use of phosphogypsum on trace elements in soils and vegetation / A. V. Gorbunov, B. B. Maksjuta, M. V. Frontasyeva [et al.] // *Science of the Total Environment*. – 1992. – Vol. 122, No. 3. – P. 337-346. – DOI 10.1016/0048-9697(92)90051-S.
16. Grabas, K. Study on the Properties of Waste Apatite Phosphogypsum as a Raw Material of Prospective Applications / K. Grabas, A. Pawełczyk, W. Stręk [et al.] // *Waste and Biomass Valorization*. – 2019. – Vol. 10, No. 10. – P. 3143-3155. – DOI 10.1007/s12649-018-0316-8.
17. Hou L. Dynamics of soil N cycling and its response to vegetation presence in an eroding watershed of the Chinese Loess Plateau / L. Hou, K. Bao, X. Wei [et al.] // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. – 2022. – Vol. 336. – P. 108020. – DOI 10.1016/j.agee.2022.108020.
18. Saadaoui, E. Phosphogypsum: potential uses and problems—a review / E. Saadaoui, N. Ghazel, C. Ben Romdhane, N. Massoudi // *International Journal of Environmental Studies*. – 2017. – Vol. 74, No. 4. – P. 558-567. – DOI 10.1080/00207233.2017.1330582.
19. Santa-Cruz J. Metal Ecotoxicity Studies with Artificially Contaminated versus Anthropogenically Contaminated Soils: Literature Review, Methodological Pitfalls and Research Priorities / J. Santa-Cruz, I. I. Vasenev, H. Gaete [et al.] // *Russian Journal of Ecology*. – 2021. – Vol. 52, No. 6. – P. 479-485. – DOI 10.1134/S1067413621060126.
20. Shchepeleva, A. S. Changes of soil organic carbon stocks and CO₂ emissions at the early stages of urban turf grasses' development / A. S. Shchepeleva, V. I. Vasenev, I. M. Mazirov [et al.] // *Urban Ecosystems*. – 2017. – Vol. 20, No. 2. – P. 309-321. – DOI 10.1007/s11252-016-0594-5.
21. Shchepeleva, A. S. Analysis of carbon stocks and fluxes of urban lawn ecosystems in Moscow megapolis / A. S. Shchepeleva, M. M. Vizirskaya, V. I. Vasenev, I. I. Vasenev // *Urbanization: Challenge and Opportunity for Soil Functions and Ecosystem Services: Proceedings of the 9th SUTMA Congress*. – Cham: Springer International Publishing, 2019. – P. 80-88. – DOI 10.1007/978-3-319-89602-1_11.
22. Tiefenbacher, A. Optimizing carbon sequestration in croplands: A synthesis / A. Tiefenbacher, T. Sandén, H. P. Haslmayr [et al.] // *Agronomy*. – 2021. – Vol. 11, No. 5. – DOI 10.3390/agronomy11050882.

23. Tilaki, G. A. D. The effect of land management on carbon sequestration in salty rangelands of Golestan province, Iran / G. A. D. Tilaki, R. Rahmani, S. A. Hoseini, I. Vasenev // *Acta Ecologica Sinica*. – 2022. – Vol. 42, No. 1. – P. 82-89. – DOI 10.1016/j.chnaes.2021.03.001.
24. Urra, J. Potential benefits and risks for soil health derived from the use of organic amendments in agriculture/ J. Urra, I. Alkorta, C. Garbisu // *Agronomy*. – 2019. – T. 9. – №. 9. – C. 542.
25. Vasenev, I. Forest soil quality analysis at the potential reference site for Moscow megalopolis environmental monitoring / I. Vasenev, M. Tikhonova, A. Avilova // 17th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2017: Conference proceedings, Vienna, Austria, 2017. Vol. 17. – P. 545–552. – DOI 10.5593/sgem2017H/33/S14.068.
26. Vasenev I. I. Assessment of Within-Forest Variability in Albeluvisol Quality in an Urban Forest Ecosystem for the Northern Part of the Moscow Megalopolis / I. I. Vasenev, A. A. Avilova, M. V. Tikhonova, S. Yu. Ermakov // *Proceedings of the Smart and Sustainable Cities Conference 2018, Moscow*. – Cham: Springer, 2020. – P. 133-144. – DOI 10.1007/978-3-030-16091-3_16.
27. Vasenev I. I. Development of a methodology for monitoring the environmental impact of waste of the year-round maintenance of highways / I. I. Vasenev, V. V. Chelnokov, A. S. Makarova [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – Moscow Oblast, Bol'shie Vyazemy, 2021. – P. 012053. – DOI 10.1088/1755-1315/663/1/012053.
28. Vasenev, V. I. Urban soil organic carbon and its spatial heterogeneity in comparison with natural and agricultural areas in the Moscow region / V. I. Vasenev, J. J. Stoorvogel, I. I. Vasenev // *Catena*. – 2013. – Vol. 107. – P. 96-102. – DOI 10.1016/j.catena.2013.02.009.
29. Vasenev, V. I. Quantifying spatial-temporal variability of carbon stocks and fluxes in urban soils from local monitoring to regional modelling / V. I. Vasenev, J. J. Stoorvogel, N. D. Ananyeva [et al.] // *The Carbon Footprint Handbook*, 2015. – P. 185-221.
30. Vasenev, V. I. Urban soil respiration and its autotrophic and heterotrophic components compared to adjacent forest and cropland within the moscow megalopolis / V. I. Vasenev, M. M. Vizirskaya, A. S. Shchepeleva [et al.] // *Megacities 2050: Environmental Consequences of Urbanization, Moscow*, 2016. – Cham: Springer International Publishing AG, 2018. – P. 18-35. – DOI 10.1007/978-3-319-70557-6_4.
31. Vetterlein, D. Can applied organic matter fulfil similar functions as soil organic matter? Risk-benefit analysis for organic matter application as a potential strategy for rehabilitation of disturbed ecosystems / D. Vetterlein, R. F. Hüttl // *Plant and Soil*. – 1999. – Vol. 213, No. 1-2. – P. 1-10. – DOI 10.1023/a:1004681506901.
32. Wang, J. Utilization effects and environmental risks of phosphogypsum in agriculture: A review / J. Wang // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 276. – P. 123337. – DOI 10.1016/j.jclepro.2020.123337.
33. Yakovlev, A. S. Ecological evaluation of artificial soils treated with phosphogypsum / A. S. Yakovlev, M. A. Kaniskin, V. A. Terekhova // *Eurasian Soil Science*. – 2013. – Vol. 46, No. 6. – P. 697-703. – DOI 10.1134/S1064229313060124.

Content

LIST OF DEFINITIONS, ABBREVIATIONS AND DESIGNATIONS.....	4
Introduction.....	6
1. Actual tasks of restoring the fertility of erosively degraded soils using industrial and agricultural waste.....	9
2. Objects and methods of research at the Agroecological Station of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy.	14
3. Seasonal dynamics of the properties of the formed turf horizon according to the experience options.....	21
4. Seasonal dynamics of soil CO ₂ emissions by experience options.....	29
5. Seasonal dynamics of the herbage and bioproduction process development by experience options.....	32
6. Assessment of the carbon balance of the studied model agroecosystems using soil- and carbon-saving technologies for industrial and agricultural waste disposal.....	36
Conclusion.....	39
REFERENCES	41

Conclusion

The conducted research has shown high efficiency and low environmental risks of using compost from quail manure at a dose of 2 t/ha, phosphogypsum at a dose of 1.5 t/ha and their combination at a dose of phosphogypsum of no more than 4.5 t/ha per 2 t/ha of compost to restore erosively disturbed sod-podzolic soils in typical landscape areas of the Moscow region conditions with old-arable sod-podzolic soils.

Moreover, the use of verified doses and combinations of these ameliorants as an improver of the traditionally used in landscaping projects peat-sandy soil parent materials can significantly improve their functional and environmental features, including regulation of the water regime and environmental reactions, the content of macro- and meso-nutrients, stabilization of the soil absorption capacity and the saturation degree of the soil absorbing complex, carbon accumulation and maintenance of a positive carbon balance in case of intensively used agricultural land and urban lawns.

The use of compost from quail droppings already at a dose of 2 t/ha, and phosphogypsum already at a dose of 1.5 t/ha contributed to the rapid and significant accumulation of organic carbon in the sod topsoil horizon of the studied disturbed and regenerated sod-podzolic soils.

In the predominantly humid summer of 2023, an increased intensity of soil CO₂ emissions was observed in variants using phosphogypsum, but with a significantly (many times) more active increase in the growth of grass biomass and accelerated accumulation of organic matter in the upper part of the restored turf horizon, we can talk about the sequestering carbon of the atmosphere of the technologies we verified for the restoration of anthropogenic disturbed sod-podzolic soils with the formation of a stable herbage during the disposal of phosphogypsum and quail droppings.

This allows us to consider the use of compost from quail droppings at a dose of 2 t/ha, phosphogypsum at a dose of 1.5 t/ha and their combinations at a dose of phosphogypsum of no more than 4.5 t/ha per 2 t/ha of compost for the restoration (regeneration) of erosively degraded sod-podzolic soils as prototypes of the best available technologies of agrobiotechnical reclamation of the anthropogenic disturbed sod-podzolic soils with a positive agroecological aftereffect on the formation and stabilization of a positive carbon balance of soils and local agroecosystems, formation of a large amount of herbaceous biomass – with environmentally safe and economically cost-effective disposal of widespread industrial and livestock waste.

Vasenev I.I., Stepanov A.V., Vasenev P.I. Soil- and carbon-saving technologies for increasing the productivity of herbage using industrial and agricultural waste: Methodological recommendations based on the results of approbation. – M.: Russian State Agrarian University-Moscow Timiryazev Agricultural Academy. - 2023. – 48 p.

The methodological recommendations present the results of successful approbation and agroecological assessment of the effectiveness of several soil- and carbon-saving technologies for increasing the productivity of herbage using industrial and agricultural waste at the site of restoring the fertility of agrogenically erosively degraded sod-podzolic soils. Based on the results of agroecological monitoring of biological productivity of herbage, seasonal dynamics of organic carbon reserves in the upper organo-mineral horizons of the reconstructed sod-podzolic soil, direct measurements of soil CO₂ fluxes, a comparative analysis of the carbon balance and the potential of accelerated nature-like sequestration of atmospheric carbon using proven technologies for the restoration of erosively degraded podzolic soils was carried out.

They are intended for researchers, experts in agriculture and landscaping departments, graduate students, undergraduate, specialist and graduate students, as well as students of advanced training courses specializing in agroecological or environmental monitoring and/or interested in scientifically based agroecological optimization of land use/agriculture with the development, adaptation and/or experimental verification of the best available soil- and carbon-saving technologies using industrial and agricultural waste.

Recommended for publication by the Educational and Methodological Commission of the Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction named after A.N. Kostyakov. Prepared within the framework of research on the Russian-Italian project "Integration of IoT sensors and artificial intelligence algorithms for accurate climate-balanced agriculture and decision support systems" (grant of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 075-15-2021-1030).

Reviewers: Doctor of Biological Sciences, Professor, Professor of the Department of Agriculture and Experimental Methods of the Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy M.A. Mazirov, Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Erosion and Soil Protection of Lomonosov Moscow State University O.A. Makarov

© Vasenev I.I., Stepanov A.V., Vasenev P.I., authors, 2023
© F S B E I of the Russian State Agrarian University - Moscow
Timiryazev Agricultural Academy, 2023
© Publishing House