ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геотехнология и инженерная геология*

Получение удобрений из отходов различного генезиса для рекультивации нарушенных земель и благоустройства территорий

М.В.Быкова[1]✉, **Д.М.Малюхин**[2]
[1] *Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *ООО «НПК ЭкоДрайв», Гатчина, Россия*

Как цитировать эту статью: Быкова М.В., Малюхин Д.М. Получение удобрений из отходов различного генезиса для рекультивации нарушенных земель и благоустройства территорий // Записки Горного института. 2026. Т. 281. Вып. 1. С. 81-94. EDN MMFXNS

Аннотация
Рассмотрены проблемы отчуждения территорий в результате хозяйственной деятельности и при складировании отходов, обоснована необходимость развития технологий, связанных с получением альтернативных видов удобрений, пригодных на биологическом этапе рекультивации и в процессе дальнейшего благоустройства территорий, изучен ресурсный потенциал промышленных отходов для получения питательных добавок. Установлено, что наиболее перспективные направления переработки связаны с получением удобрений на основе осадков сточных вод при совместном компостировании с прочими промышленными отходами различного генезиса. При разработке вариантов компостируемых смесей использован расчетно-экспериментальный метод, позволяющий получить оптимальные составы не только по соотношению C:N, влажности и уровню pH, но и с учетом визуальной оценки при пробном замешивании в лабораторных условиях. Проведены качественная и количественная оценки полученных удобрений по ветеринарно-санитарным, гигиеническим, токсикологическим и агрохимическим показателям в соответствии с действующей нормативной документацией. В результате вегетационного опыта с использованием искусственной почвы продемонстрирована эффективность применения полученных удобрений по основным показателям продуктивности, таким как всхожесть семян, величина биомассы и максимальная высота растений. Установлено, что в качестве лимитирующих характеристик при внесении разработанных удобрений могут выступать содержание в них токсичных элементов и возможные нарушения баланса между удержанием влаги и воздухообменом по причине снижения плотности почвенных субстратов при высокой массовой доле удобрений в их составе. Проведенные исследования подтверждают возможность вторичного использования отходов различного генезиса для восстановления качества земель и позволяют расширить ассортимент альтернативных видов удобрений.

Ключевые слова
промышленные отходы; утилизация отходов; осадки сточных вод; компостирование; удобрения; рекультивация нарушенных земель; благоустройство территорий

Финансирование
Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSRW-2024-0005).

Поступила: 08.04.2026 ***Принята: 25.06.2026*** ***Онлайн: 09.10.2026*** ***Опубликована: 30.10.2026***

Введение

Интенсивное развитие промышленного сектора, высокие объемы добычи полезных ископаемых, реализация инфраструктурных проектов и урбанизация общества неизбежно сопровождаются трансформацией земной поверхности. В процессе техногенеза происходит формирование особого класса геосистем, которые характеризуются изменениями естественного ландшафта, количественного и качественного состояния компонентов природной среды и представляют собой нарушенные земли, утратившие свою первоначальную хозяйственную или экологическую ценность [1-3].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Нарушенные земли, образовавшиеся в результате добычи полезных ископаемых и складирования отходов различного генезиса, являются основными очагами экологической напряженности во всем мире. Специфика техногенной деградации земель при добыче полезных ископаемых заключается в резком переходе в нарушенное состояние, сопровождающееся частичным или полным уничтожением почвенного покрова, изменением гидрологического режима, а также поступлением загрязняющих веществ, что приводит к стремительной деградации прилегающих территорий [4-6]. Наиболее значимые негативные последствия складирования отходов проявляются в виде отчуждения значительных территорий и долгосрочного влияния на химический состав сопредельных сред из-за переноса загрязняющих веществ в процессе водной и биогенной миграций, атмосферного переноса [7-9].

Несмотря на отрицательные аспекты, наблюдается постоянное развитие, усовершенствование и наращивание темпов производства, повышение потребительского спроса населения и уровня жизни [10, 11], что неизбежно приводит к пропорциональному росту антропогенной нагрузки. При этом прослеживается устойчивый дисбаланс между темпами образования нарушенных земель и рекультивацией (например, с 2019 по 2023 гг. количество нарушенных земель при разработке месторождений полезных ископаемых увеличилось на 504,6 тыс. га, рекультивировано 252,3 тыс. га), а процент утилизированных и обезвреженных отходов производства и потребления за тот же промежуток времени в среднем составлял 46,6 % от количества образовавшихся отходов[1].

Результатом данных тенденций является накопление значительного экологического ущерба, а негативные последствия проявляются в виде необратимой деградации компонентов окружающей среды, что особенно остро можно наблюдать в регионах, характеризующихся низкой способностью к самовосстановлению и самоочищению, например на территории Арктической зоны Российской Федерации [12-14]. Таким образом, в условиях нарастающего антропогенного стресса крайне важно восстанавливать средостабилизирующие и рекреационные функции территорий, повышая их экологическую устойчивость. Рассматривая обозначенные проблемы в совокупности, можно говорить о необходимости разработки и имплементации технологий, позволяющих использовать отходы различного генезиса для реабилитации нарушенных земель и их последующего благоустройства, что обеспечивает переход к модели устойчивого природопользования.

В соответствии с действующими правовыми актами Российской Федерации, максимальная утилизация отходов является одним из приоритетных направлений государственной политики в области обращения с отходами[2], а утилизация отходов с получением материальной продукции относится к приоритетным «зеленым» проектам[3]. В результате развития технологий переработки стало возможным производство широкого перечня товаров, которые применимы в различных сферах народного хозяйства [15-17]. С точки зрения решения проблем восстановления нарушенных земель в первую очередь рассматривается переработка отходов для получения плодородных грунтов [18, 19], мелиорантов (почвоулучшителей) и удобрений, которые могут быть использованы на биологическом этапе рекультивации и в процессе дальнейшего благоустройства территорий [20-22].

На фоне проявляющихся системных проблем, связанных с производством традиционных удобрений, получение альтернативных вариантов в качестве источника питательных компонентов для растений становится особенно актуальным в настоящее время. Ежегодное истощение легкодоступных месторождений и снижение качества добываемых руд требуют применения все более сложных и дорогостоящих технологий обогащения, а добыча и переработка сопряжены с серьезными экологическими издержками, в том числе связанными со складированием попутно образующихся отходов [23, 24].

[1] Охрана окружающей среды: статистический сборник. М.: Росстат, 2024. 118 с.

[2] Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» от 24.06.1998 № 89-ФЗ (с изменениями от 28.12.2025 № 495-ФЗ, последняя редакция).

[3] Постановление Правительства РФ от 21.09.2021 № 1587 «Об утверждении критериев проектов устойчивого (в том числе зеленого) развития в Российской Федерации и требований к системе верификации инструментов финансирования устойчивого развития в Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями от 14.10.2025).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Многие сельскохозяйственные и промышленные отходы содержат необходимые для питания растений соединения азота, фосфора, калия, кальция, магния, серы (макроэлементы) и основные микроэлементы. Например, известны исследования возможности использования металлургических шлаков в качестве кремнийсодержащих удобрений, что позволяет повысить устойчивость растений к стрессам, отходы топливно-энергетического комплекса могут служить дополнительным источником кальция, фосфора, калия и микроэлементов [25, 26], а удобрения на основе отходов химической промышленности (фосфогипс или некондиционный хлористый калий) богаты кальцием и серой или калием соответственно [27, 28].

Основным недостатком удобрений на основе указанных отходов является их ограниченность по качественному составу основных питательных элементов и отсутствие органического вещества, что крайне важно для формирования плодородного слоя почв и устойчивых фитоценозов на малопродуктивных нарушенных землях при их рекультивации и в процессе дальнейшего благоустройства. Для получения более комплексных и сбалансированных удобрений целесообразно рассматривать в качестве вторичного сырья органосодержащие отходы. Существующие исследования посвящены в первую очередь утилизации отходов животноводства (например, навоза и куриного помета) [29, 30], отходов перерабатывающей промышленности (например, жома, соломы, коры, опилок и т.д.) [31, 32], а также осадков сточных вод (ОСВ) [33, 34]. При этом получение удобрений на основе ОСВ является наиболее перспективным направлением, что связано с более разнообразным и широким составом питательных элементов.

Главные негативные аспекты, требующие повышенного внимания при использовании ОСВ, связаны с наличием тяжелых металлов и патогенных микроорганизмов [19, 33]. Комплексное решение данных проблем может быть реализовано посредством компостирования с различными наполнителями, т.е. технологиями аэробной ферментации органического вещества обезвоженных осадков, которые входят в перечень наилучших доступных технологий (НДТ)[4]. Это обеспечивает переход к устойчивому (в том числе «зеленому») развитию Российской Федерации[5]. Данный подход позволяет получить безопасный в токсикологическом и санитарно-эпидемиологическом отношении продукт за счет снижения содержания тяжелых металлов в ОСВ при совместном компостировании с различными наполнителями (эффект разбавления) и обеззараживания ОСВ в процессе биотермического разложения органических веществ. При этом расширение перечня наполнителей за счет использования промышленных отходов является актуальной задачей, способствующей увеличению доли их вовлечения в хозяйственный оборот и обеспечивающей переход к экономике замкнутого цикла. Таким образом, целью исследования является получение удобрений из отходов различного генезиса, пригодных для использования на биологическом этапе рекультивации и в процессе дальнейшего благоустройства территорий, с учетом действующих нормативных норм и стандартов.

Методы

При проведении экспериментальных исследований был использован ОСВ (код ФККО 72222112395, осадок биологических очистных сооружений хозяйственно-бытовых и смешанных сточных вод обезвоженный практически неопасный), представляющий собой отход очистных сооружений хозяйственно-бытовых и смешанных сточных вод V класса опасности, а именно смесь из органических и минеральных компонентов, выделенных в процессе очистки сточных вод методом отстаивания, и комплекса микроорганизмов, участвовавших в процессе биологической очистки сточных вод и выведенных из технологического процесса.

Одной из основных проблем при использовании ОСВ является наличие в их составе тяжелых металлов. По результатам предварительных исследований установлено, что содержание свинца (Pb) составляет 13±6, кадмия (Cd) – 0,48±0,22, цинка (Zn) – 350±90, меди (Cu) – 290±70, никеля

[4] Очистка сточных вод при производстве продукции (товаров), выполнении работ и оказании услуг на крупных предприятиях. ИТС НДТ 8-2022. М.: Бюро НДТ, 2022. 93 с.

[5] Постановление Правительства РФ от 21.09.2021 № 1587 «Об утверждении критериев проектов устойчивого (в том числе зеленого) развития в Российской Федерации и требований к системе верификации инструментов финансирования устойчивого развития в Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями от 14.10.2025).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

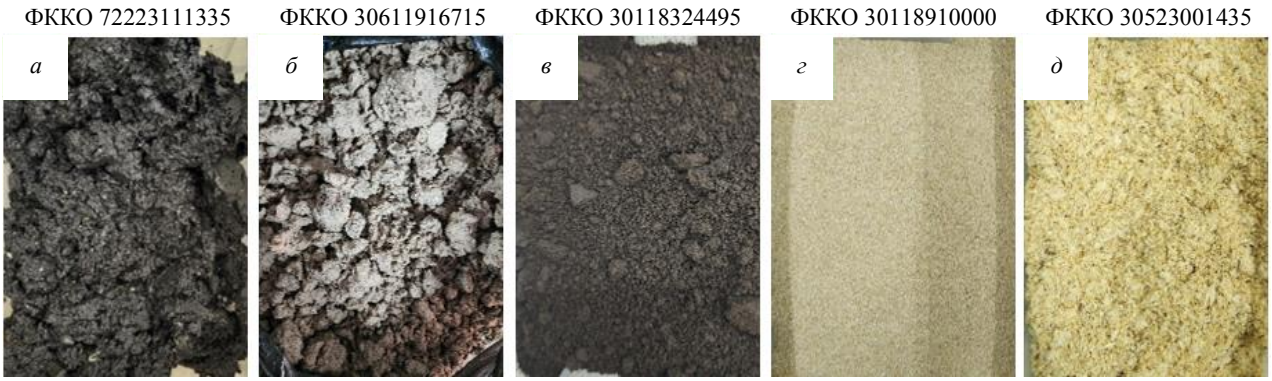


Рис.1. Внешний вид исследуемых отходов: *а* – осадок биологических очистных сооружений хозяйственно-бытовых и смешанных сточных вод, обезвоженный до 80 %; *б* – смесь отходов роспуска, очистки и сортирования макулатуры и целлюлозы при производстве бумажной массы обезвоженная; *в* – дробленые частицы кофейного полуфабриката; *г* – отходы кормов; *д* – опилки чистой древесины

(Ni) – 8,8±2,2, хрома (Cr) – 210±50, ртути (Hg) – 0,27±0,07, мышьяка (As) – менее 0,2 мг/кг. Исследования выполнены при помощи атомно-абсорбционного спектрометра МГА-1000 (Люмэкс) в соответствии с М 09-02-2016 и анализатора ртути РА-915Лаб (Люмэкс) в соответствии с М 03-10-2022. Данные результаты учитывались при определении оптимальных смесей для компостирования.

В качестве потенциальных наполнителей для компостирования ОСВ исследовались промышленные отходы различного генезиса:

• смесь отходов роспуска, очистки и сортирования макулатуры и целлюлозы при производстве бумажной массы обезвоженная, код ФККО 30611916715, представляющая собой отход целлюлозно-бумажной промышленности V класса опасности, образующийся в процессе подготовки макулатурной массы и характеризующийся высоким содержанием волокон целлюлозы, которые являются источником углерода, необходимого для протекания процесса ферментации при компостировании. Волокна целлюлозы легко разлагаются микроорганизмами, обеспечивают разрыхление, аэрацию, удерживают влагу компостируемого материала и предотвращают его загнивание;

• дробленые частицы кофейного полуфабриката, код ФККО 30118324495, представляющие собой отход производства растворимого кофе V класса опасности, образующийся при измельчении и экстракции зерен. Дробленые частицы кофейного полуфабриката характеризуются высоким содержанием клетчатки, которая также является источником углерода, включают питательные вещества (азот, калий, магний, фосфор) и различные микроэлементы;

• отходы кормов, код ФККО 30118910000, представляющие собой остатки зернового сырья IV класса опасности, образующиеся при прочистке технологических линий в производстве комбинированных кормов, характеризуются высоким содержанием белка, витаминов и микроэлементов, являются компонентом с высоким содержанием не только углерода, но и азота;

• опилки натуральной чистой древесины, код ФККО 30523001435, представляют собой отход деревообрабатывающих и деревоперерабатывающих предприятий V класса опасности, образующийся при обработке древесины. Данные отходы богаты органическими соединениями (такими как целлюлоза и лигнин), легкодоступными для микрофлоры, а также содержат калий, фосфор, азот и микроэлементы. В процессе компостирования при минерализации данных элементов питания происходит переход в форму, доступную для растений. Обладая высоким соотношением C:N, опилки традиционно используются в качестве наполнителя при компостировании ОСВ.

Внешний вид исследуемых отходов представлен на рис.1.

На основе эмпирически подтвержденных знаний [19, 35] и нормативных документов[6] установлено, что для эффективного совместного компостирования отходов необходимо соблюдение следующих параметров в смеси: влажность материала от 40 до 70 % (оптимальная – 60 %); C:N

[6] ГОСТ Р 70083-2022. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Руководящие принципы обращения с пищевыми отходами.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

от 25:1 до 35:1; уровень pH (актуальная кислотность) от 6 до 9 (оптимальный – от 7 до 8). Исходя из этого, первым этапом исследований являлась оценка рассматриваемых промышленных отходов по данным показателям на базе Научного центра «Оценка техногенной трансформации экосистем» Санкт-Петербургского горного университета. В табл.1 представлены результаты исследований (содержание C и N с учетом влажности), а также указаны использованные методы и оборудование. Погрешности измерений для всех результатов в работе представлены в соответствии с указанными методиками измерений. В случае определения, в соответствии с руководством пользователя, представлены метрологические характеристики использованного оборудования.

Таблица 1

Характеристика промышленных отходов для компостирования по основным показателям

Компонент	Содержание C, % по массе*	Содержание N, % по массе*	C:N*	$pH_{вод}$**	Влажность, % по массе***
ОСВ	7,2	1,00	~ 7:1	7,5±0,1	80
Отходы производства бумажной массы	17,3	0,05	~ 345:1	7,2±0,1	59
Дробленые частицы кофейного полуфабриката	21,5	0,56	~ 38:1	6,0±0,1	65
Отходы кормов	41,5	2,30	~ 18:1	8,1±0,1	13
Опилки натуральной чистой древесины	26,1	0,02	~ 1300:1	5,5±0,1	55

* Анализатор углерода, водорода, азота LECO CHN-628C, в соответствии с руководством пользователя (пределы допускаемой приведенной погрешности анализатора в режиме определения C и N ±3 %).

** pH-метр-иономер «Эксперт-001», в соответствии с ПНД Ф 16.2.2:2.3:3.33-02.

*** Анализатор влажности Shimadzu MOC-120H, в соответствии с руководством пользователя (пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений при массе навески 1,0 г составляет ± 0,05 %).

На основе полученных результатов расчетным путем при варьировании массовых долей того или иного вида отхода были получены теоретические варианты смесей для компостирования, которые соответствуют допустимым диапазонам по всем трем показателям. Следует отметить, что одной из поставленных задач являлась утилизация ОСВ как основного компонента. Исходя из опыта ранее проведенных исследований [19] и предварительных расчетов теоретических вариантов, установлено, что при массовой доле ОСВ в смеси не менее 30 % их потенциальный вклад как источника питательных веществ достаточен, а основные ограничивающие факторы компостирования, такие как высокая влажность и низкое соотношение C:N, могут быть нивелированы в сочетании с рассматриваемыми наполнителями. Внесение опилок натуральной чистой древесины рассматривалось только при невозможности достичь требуемого значения по соотношению C:N при добавлении остальных рассматриваемых отходов, так как опилки являются ценным вторичным сырьем в различных сферах народного хозяйства.

Далее в лабораторных условиях было проведено пробное замешивание для визуальной оценки теоретических вариантов. Необходимость данного этапа обуславливается спецификой используемых отходов, таких как отходы производства бумажной массы и дробленые частицы кофейного полуфабриката.

Отходы производства бумажной массы характеризуются как неоднородный волокнистый материал с остатками клея и полимерных пленок, что может привести к комкованию смеси, низкой проницаемости воздуха в бурт при компостировании, и, как следствие, к развитию анаэробных процессов. Опытным путем установлено, что при содержании в смеси данного отхода менее 30 % по массе не достигаются оптимальные значения по соотношению C:N и влажности компостируемого материала, а при содержании более 55 % по массе развиваются процессы комкования и происходит уменьшение порового пространства по истечении 5 сут после замешивания смесей в лабораторных условиях.

Дробленые частицы кофейного полуфабриката характеризуются интенсивным развитием плесневелых процессов на открытом воздухе из-за высокой влажности и наличия органических веществ, оптимальных для питания колоний плесневых грибов. Опытным путем установлено, что при содержании в смеси данного отхода более 35 % по массе наблюдается интенсивное развитие плесневелых процессов по истечении 5 сут после замешивания смесей в лабораторных условиях.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Данный расчетно-экспериментальный метод в совокупности с показателями содержания тяжелых металлов в ОСВ позволили выделить пять наиболее оптимальных вариантов компостируемых смесей (табл.2) [36].

Таблица 2

Характеристика компостируемых смесей для получения удобрений

Вариант	Соотношения составляющих, % по массе	C:N	$pH_{вод}$	Влажность, % по массе
1	ОСВ : отходы производства бумажной массы : дробленые частицы кофейного полуфабриката:отходы кормов – 35:45:15:5	~ 27:1	7,2±0,1	65
2	ОСВ : отходы производства бумажной массы : дробленые частицы кофейного полуфабриката:отходы кормов – 30:30:35:5	~ 27:1	7,0±0,1	65
3	ОСВ : отходы производства бумажной массы : отходы кормов – 35:55:10	~ 27:1	7,4±0,1	62
4	ОСВ : отходы производства бумажной массы : дробленые частицы кофейного полуфабриката – 35:45:20	~ 30:1	7,1±0,1	67
5	ОСВ : дробленые частицы кофейного полуфабриката : опилки натуральной чистой древесины – 30:35:35	~ 35:1	6,5±0,1	66

Формирование буртов проводилось в летний период на открытой площадке с грунтовым покрытием. На рис.2 представлен внешний вид компостируемых смесей.

После формирования буртов смеси подвергались компостированию с периодическим перемешиванием каждые 10 сут для интенсификации или поддержания тепло- и массообменных процессов, процессов биохимического окисления и сокращения срока компостирования за счет аэрации буртов. Продолжительность и окончание активной стадии компостирования определены, исходя из момента, при котором после очередного ворошения наблюдается стабильное снижение температуры внутри бурта, которая приближается впоследствии к температуре окружающей среды, что свидетельствует об окончании биотермического разложения и начале процессов созревания и гумификации (пассивная стадия). Для фиксации запуска процесса саморазогревания смесей и непрерывного контроля температуры внутри буртов были использованы портативные логгеры фирмы Thermochron (iButton).

По истечении периода активного компостирования бурты были оставлены на открытой площадке с грунтовым покрытием для созревания и гумификации естественным путем на 30 сут без перемешивания.

Для качественной и количественной оценки полученных удобрений использовался ГОСТ Р 54651-2011 «Удобрения органические на основе осадков сточных вод. Технические условия». Был проведен отбор проб для контроля ветеринарно-санитарных и гигиенических показателей (индекса санитарно-показательных микроорганизмов, наличия патогенных и болезнетворных микроорганизмов, жизнеспособных яиц и личинок гельминтов, цист кишечных патогенных простейших, личинок и куколок синантропных мух), а также для лабораторных исследований по токсикологическим и агрохимическим показателям. Учитывая предполагаемую область применения, при сравнении полученных значений использовались нормы для II группы удобрений, т.е. используемые под посадки лесохозяйственных культур вдоль дорог, в питомниках лесных и декоративных культур, цветоводстве, для окультуривания истощенных почв, рекультивации нарушенных земель и откосов автомобильных дорог, рекультивации свалок.



Рис.2. Компостируемые смеси

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Исследования ветеринарно-санитарных и гигиенических показателей выполнены силами Центра гигиены и эпидемиологии в городе Санкт-Петербурге и Ленинградской обл., проверка токсикологических и агрохимических показателей выполнена на базе Научного центра «Оценка техногенной трансформации экосистем» Санкт-Петербургского горного университета.

Из токсикологических показателей, в соответствии с ГОСТ Р 54651-2011, контролируется валовое содержание тяжелых металлов, таких как свинец (Pb), кадмий (Cd), цинк (Zn), медь (Cu), никель (Ni), хром (Cr), мышьяк (As) и ртуть (Hg). Исследования выполнены при помощи атомно-абсорбционного спектрометра МГА-1000 (Люмэкс) согласно ГОСТ Р 53218-2008 и М 09-02-2016, анализатора ртути РА-915Лаб (Люмэкс) согласно М 03-10-2022.

Из агрохимических показателей, в соответствии с ГОСТ Р 54651-2011, проведены следующие лабораторные исследования: массовая доля влаги (при помощи анализатора влажности Shimadzu MOC-120H, в соответствии с руководством пользователя); массовая доля органического вещества (при помощи термогравиметрического анализатора LECO TGA701, в соответствии с ГОСТ 27980-88); активность водородных ионов солевой суспензии – обменная кислотность (при помощи pH-метр-иономер «Эксперт-001», в соответствии с ГОСТ 27979-88); массовая доля питательных элементов – азот общий (N) и фосфор общий (в пересчете на P_2O_5) при помощи спектрофотометра HACH DR5000, в соответствии с ГОСТ 26715-85 и ГОСТ 26717-85, калий общий (в пересчете на K_2O) при помощи атомно-абсорбционного спектрометра Shimadzu AA-7000, в соответствии с ГОСТ 26718-85.

Для оценки полученных удобрений с точки зрения удобства при хранении и транспортировании проведены исследования возможности их пеллетирования. Получение пеллет осуществлялось из предварительно увлажненных до состояния комкования удобрений при помощи опытной установки – мясорубки МС2-150 с диаметром отверстий решетки 5 мм. Для получения готового продукта пеллеты подсушивались с использованием шкафа сушильного LOIP LF-60/350-VS-2 при температуре 105±5 °С.

Эффективность полученных удобрений анализировалась посредством проведения вегетационного опыта, заключающегося в оценке показателей всхожести семян, величины биомассы и максимальной высоты растений при добавлении к стандартизированной почве в различных массовых соотношениях. В качестве стандартизированной почвы, к которой осуществлялось добавление удобрений, и контрольной почвы (без добавления удобрений) использовалась искусственная почва по ГОСТ Р ИСО 18763-2019, представляющая собой смесь мелкоизмельченного сфагнового торфа – 5, каолинитовой глины – 10, кварцевого песка – 85 % по массе. В качестве тест-объекта использовалась газонная трава райграс пастбищный (*Lolium perenne*).

Добавление удобрений к стандартизированной почве осуществлялось в количестве 25, 50 и 75 % по массе (в пересчете на абсолютно сухое состояние). Каждый вариант субстрата (в том числе контрольной почвы) подготавливался в трехкратной повторности для получения усредненных результатов. Идентичность условий произрастания обеспечивалась использованием фитостеллажа НЛО 79-03-04 LD, позволяющего регулировать мощность и продолжительность суточного фотопериода (16 ч – световой день, 8 ч – тень), а влажность субстратов в течение всего вегетационного опыта поддерживалась на уровне 60 % от полной влагоемкости.

Норма высадки семян райграса пастбищного в соответствии с рекомендациями производителя составляет 30-50 г/м^2, при проведении эксперимента было принято медиальное значение данного диапазона – 40 г/м^2. В процессе визуальных наблюдений вегетационного опыта зафиксированы ключевые фазы начального роста, всхожесть семян определялась на 10-е сут (в соответствии с рекомендациями по ГОСТ 12038-84), по истечении 14 сут отмечено отсутствие новых ростков, обнаружены признаки начала фазы кущения (появление боковых побегов), что свидетельствует об адаптации растений к условиям произрастания. Было принято решение об окончании проведения вегетационного опыта для предотвращения возможного негативного влияния на рост растений ограниченного объема субстратов в сосудах. Таким образом, продолжительность проведения вегетационного опыта составила 14 сут, что является достаточным для достижения показательных точек эксперимента в рамках данного исследования.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Показатели величины биомассы и максимальной высоты определялись по завершению вегетационного опыта путем срезания растений на уровне 1 см от поверхности с последующей фиксацией массы растений при помощи лабораторных весов Sartorius CP153 (абсолютная погрешность измерения ±5 мг) и высоты самого длинного растения (зеленой части) в каждом сосуде при помощи масштабно-координатной бумаги (абсолютная погрешность измерения ±0,5 мм).

Для каждого варианта субстрата были рассчитаны стандартные отклонения в повторности (СКО) по исследуемым показателям всхожести семян, величине биомассы и максимальной высоте растений. В рамках анализа результатов по данным показателям для подтверждения достоверности наблюдаемых тенденций при добавлении различных доз полученных удобрений к стандартизированной почве применялась оценка по *t*-критерию Стьюдента (проверка гипотезы о равенстве средних значений в двух группах). Было проведено попарное сравнение результатов, полученных на стандартизированной почве без добавления удобрений с вариантами доз 25, 50 и 75 % по массе соответственно, а также попарное сравнение вариантов с добавлением 25 и 50, 50 и 75 % по массе.

Дополнительно были проведены исследования объемной (насыпной) плотности удобрений и стандартизированной почвы методом мерного сосуда в связи с возможным влиянием данного показателя на рост и развитие растений при увеличении доли биокомпостов на основе отходов в почвенном субстрате по причине нарушения баланса между удержанием влаги и воздухообменом [19].

Обсуждение результатов

По результатам значений температур установлено, что начало процесса саморазогревания смесей наступает в среднем через 18-20 ч с момента формирования буртов. Максимальные температуры достигаются на 4-е сут для вариантов 1-3, а для вариантов 4 и 5 – на 3-и сут, что предположительно обусловливается более высоким соотношением C:N в данных вариантах, влияя на скорость запуска процесса ферментации. При этом максимумы температур превышают значение 60 °C, что позволяет говорить о гибели большинства патогенных микроорганизмов и семян сорных растений.

Наиболее яркая зависимость интенсификации процесса биотермического разложения после ворошения через каждые 10 сут выявлена для вариантов 1-3, при этом для варианта 2 с 30-е по 50-е сут отмечен стабильный рост среднесуточных температур без видимого спада. Варианты 4 и 5 характеризуются относительно устойчивым уровнем среднесуточных температур после 20 сут компостирования, что может свидетельствовать о достаточном воздухообмене в буртах и без ворошения. В качестве общей тенденции для всех вариантов установлено, что после достижения максимальных температур и последующего спада, уровень среднесуточных значений варьировался в диапазоне 35-65 °C.

При снятии данных с логгеров спустя 60 сут с момента формирования буртов зафиксирован момент стремительного снижения среднесуточных температур. Для подтверждения окончания активной стадии компостирования было проведено очередное ворошение, после которого на 70-е сут определено, что среднесуточные температуры внутри буртов имеют приближенные значения к значениям температуры воздуха.

При последующих снятиях данных с логгеров установлено, что компостируемый материал на стадии созревания и гумификации характеризовался незначительными колебаниями, связанными с изменением температуры окружающей среды. Суммарное время компостирования (активная и пассивная стадии) составило 100 сут. На рис.3 представлены термические кривые для каждого варианта (за исключением периодов ворошения буртов).

В соответствии с полученными протоколами исследований ветеринарно-санитарных и гигиенических показателей во всех вариантах потенциальных удобрений не обнаружено патогенных и болезнетворных микроорганизмов, жизнеспособных яиц и личинок гельминтов, цист кишечных патогенных простейших, личинок и куколок синантропных мух, а индекс санитарно-показательных микроорганизмов (колиформ и энтеробактерий) составляет менее 1 клетки/г, что соответствует нормам для групп удобрений II по ГОСТ Р 54651-2011 и свидетельствует о безопасности полученных продуктов переработки отходов в санитарно-эпидемиологическом отношении.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

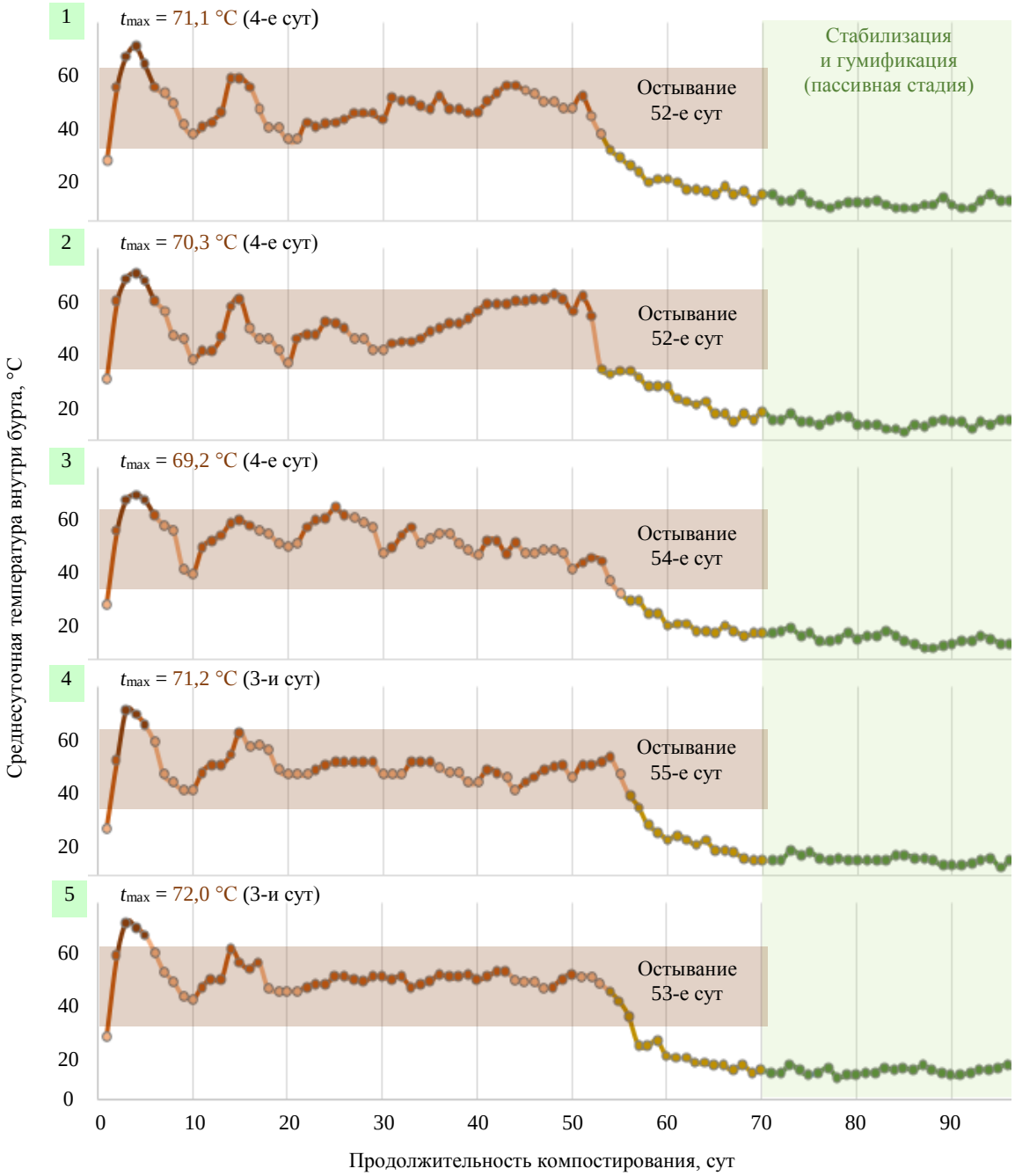


Рис.3. Температурные кривые компостирования вариантов удобрений

По результатам определения токсикологических показателей установлено, что валовое содержание токсичных элементов в потенциальных удобрениях значительно ниже верхних границ допустимых значений по ГОСТ Р 54651-2011 (табл.3). При внесении данных удобрений в почву теоретически отсутствуют риски деградации почвенного микробиома, снижения ферментативной активности, а также проявления фитотоксичности и морфофункциональных нарушений растений.

При оценке агрохимических показателей не выявлено отклонений от установленных норм, при этом отмечается повышенное содержание таких питательных элементов, как общий азот и общий калий (в пересчете на K_2O). Таким образом, полученные удобрения характеризуются высокой ценностью по потенциальному ресурсу питательных веществ, которые могут быть переработаны в доступную для растений форму в процессе биотических трансформаций.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2026. Т. 281. Вып. 1. С. 81-94
© М.В.Быкова, Д.М.Малюхин, 2026

Таблица 3

Характеристика удобрений по токсикологическим и агрохимическим показателям

Показатели	Вариант удобрений					Норма для II группы удобрений по ГОСТ Р 54651-2011
	1	2	3	4	5	
Токсикологические показатели (валовое содержание токсичных элементов, мг/кг сухого вещества)						
Свинец (Pb)	4,5±1,6	4,1±1,4	4,7±1,6	4,3±1,5	3,4±1,2	Не более 250
Кадмий (Cd)	0,31±0,11	0,14±0,05	0,21 ±0,07	0,18±0,06	0,17±0,06	Не более 15
Цинк (Zn)	205±50	190±40	220±60	210±50	140±29	Не более 1750
Медь (Cu)	140±29	130±27	150±30	165±30	100±21	Не более 750
Никель (Ni)	0,77±0,27	0,9±0,3	0,82±0,29	0,9±0,3	0,9±0,3	Не более 200
Хром (Cr)	76±19	86±22	65±16	88±22	87±22	Не более 500
Ртуть (Hg)	0,12±0,03	0,11±0,03	0,089±0,024	0,090±0,024	0,081±0,022	Не более 7,5
Мышьяк (As)	Менее 2,0	Менее 2,0	Менее 2,0	Менее 2,0	Менее 2,0	Не более 10
Агрохимические показатели						
Массовая доля влаги, %	3,3	3,4	2,8	3,4	3,8	Не более 70
Массовая доля органического вещества на сухое вещество, %	31,6±1,2	30,8±1,2	30,3±1,2	32,0±1,2	36,7±1,2	Не менее 30
Активность водородных ионов солевой суспензии, ед. pH	7,0±0,3	6,8±0,3	7,3±0,3	6,7±0,3	6,5±0,3	6,0-8,0
Массовая доля азота общего на сухое вещество, %	1,1±0,2	1,3±0,2	0,9±0,1	1,2±0,2	1,2±0,2	Не менее 0,6
Массовая доля фосфора общего на сухое вещество (в пересчете на P_2O_5), %	1,00±0,05	1,00±0,05	0,90±0,05	0,80±0,05	0,80±0,05	Не менее 0,7
Массовая доля калия общего на сухое вещество (в пересчете на K_2O), %	1,8±0,1	2,0±0,1	1,8±0,1	1,6±0,1	2,2±0,1	Не менее 0,1

По результатам оценки возможности пеллетирования установлено, что все варианты удобрений характеризуются способностью образовывать агломераты, обеспечивающие удобство при их хранении и транспортировке до предполагаемого места использования (рис.4).

При проведении вегетационного опыта (рис.5) было установлено, что добавление полученных удобрений к стандартизированной почве приводит к повышению всхожести семян и продуктивности растений. В случае добавления 25 и 50 % по массе полученных удобрений всхожесть семян в среднем увеличивается на 12 и 15 %, величина биомассы на 34 и 42 %, максимальная высота растений на 28 и 30 % соответственно (наблюдается незначительная положительная динамика с увеличением доли удобрений), а в случае добавления 75 % среднее увеличение всхожести семян, составляет 6 %, величины биомассы – 15 % и максимальной высоты растений – 14 % (т.е. наблюдается спад по отношению к субстратам с меньшим содержанием удобрений) (рис.6). В рамках повторности каждого из вариантов исследуемых субстратов значение СКО по показателю всхожести семян не превышает 3,5 отн.%, по показателю величины биомассы – 4,9 отн.%, по показателю максимальной высоты растений – 3,0 отн.%.

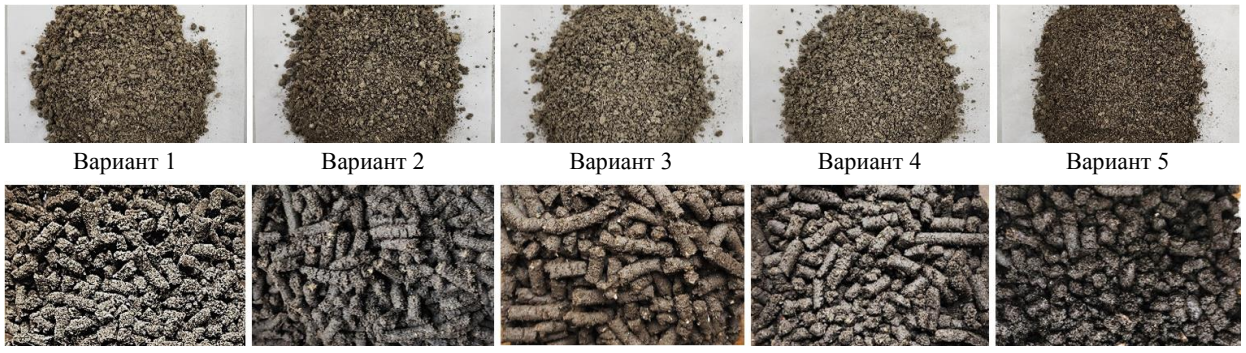


Рис.4. Внешний вид удобрений до (*а*) и после (*б*) пеллетирования

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

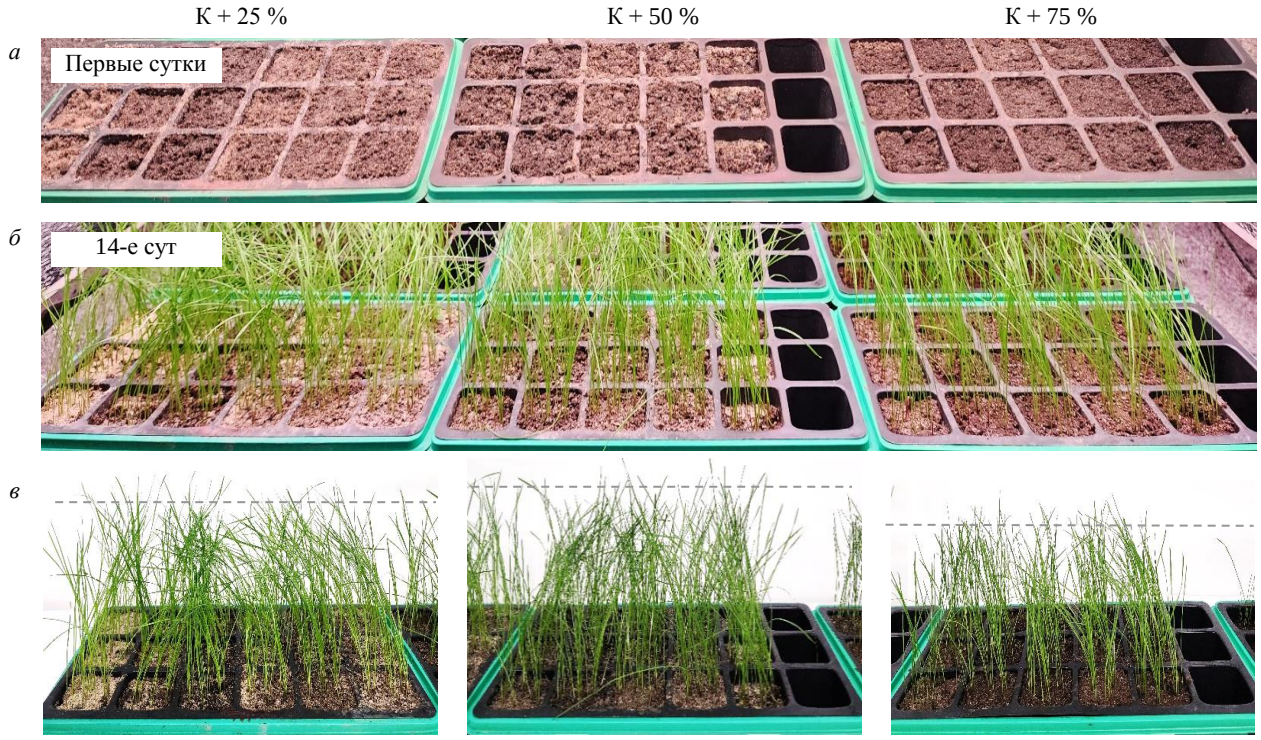


Рис.5. Внешний вид опытных субстратов на первые (*а*) и 14-е (*б*) сут вегетационного опыта и демонстрация визуальной разницы по высоте зеленой части биомассы на 14-е сут (*в*). К – контрольная почва

Проведенная оценка по *t*-критерию Стьюдента позволила проверить достоверность предполагаемых тенденций при внесении различных доз удобрений. При попарном сравнении результатов, полученных на стандартизированной почве без добавления удобрений (контрольной почве), с вариантами доз 25, 50 и 75 % по массе подтверждена статистическая значимость различий между выборками на основе средних значений (p-значение < 0,05) по всем исследуемым показателям. Исключение составило добавление дозы 75 % по массе полученных удобрений варианта 3, где отмечен незначительный рост количества взошедших семян (около 5 % по отношению к контрольной почве) и величине биомассы (около 7 % по отношению к контрольной почве), а p-значение составило 0,113 и 0,165 соответственно.

При попарном сравнении субстратов с добавлением 25 и 50 % по массе полученных удобрений выявлена общая характеристика для всех вариантов удобрений – отсутствие статистически значимых различий по всем исследуемым показателям (p-значение ≥ 0,05). Исключение составили варианты удобрений 2 и 3 по показателю величины биомассы, p-значение которых ~ 0,03, что меньше установленного уровня 0,05 (увеличение в среднем на 9 отн.%).

В случае добавления 75 % по массе подтверждена отрицательная динамика по всем исследуемым показателям, так как при попарном сравнении с субстратами, содержащими 50 % по массе, p-значение составляет < 0,05 для всех вариантов полученных удобрений.

Характер полученных результатов может объясняться несколькими явлениями. При увеличении доли удобрений в опытных субстратах, с одной стороны, увеличивается содержание питательных веществ, с другой – повышается и содержание токсичных элементов. Несмотря на соответствие полученных удобрений существующему стандарту при их внесении в почву больше определенного количества существует риск превышения предельно допустимых (ПДК) и ориентировочно допустимых (ОДК) концентраций, значения которых в несколько раз меньше верхних границ допустимого содержания в удобрениях группы II на основе осадков сточных вод в соответствии с ГОСТ Р 54651-2011. Так, например, в полученных удобрениях содержания цинка (Zn) и меди (Cu) варьируются в диапазонах 140-220 и 100-165 мг/кг соответственно при ОДК данных элементов по СанПиН 1.2.3685-21 цинка от 55 до 220 и меди от 33 до 132 мг/кг соответственно

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

(в зависимости от типа почв). Таким образом, можно предположить, что при содержании в опытных субстратах удобрений 50 % по массе проявляются начальные признаки фитотоксичности, которые нивелируются высоким содержанием основных питательных веществ, а при содержании 75 % по массе наблюдается более устойчивое токсическое действие на растения.

Помимо изменения химического состава, при увеличении доли удобрений происходит пропорциональное снижение плотности опытных субстратов, так как насыпная плотность удобрений (от 0,3 до 0,4 г/см^3) значительно отличается от насыпной плотности стандартизированной почвы (~1,0 г/см^3), что приводит к нарушению баланса между удержанием влаги и воздухообменом.

Доказано соответствие полученных удобрений на основе осадков сточных вод с добавлением различного генезиса методом аэробной ферментации при компостировании существующим требованиям и подтверждена эффективность их внесения по ключевым показателям продуктивности при проведении вегетационного опыта. Однако, учитывая, что вегетационный опыт проводился на искусственной почве (не подверженной антропогенному воздействию), при использовании данных удобрений на реальных территориях необходимо проводить предварительную комплексную оценку почв (в первую очередь по содержанию токсичных элементов) и подбирать оптимальное количество удобрений для исключения риска проявления фитотоксичности при формировании устойчивого фитоценоза.

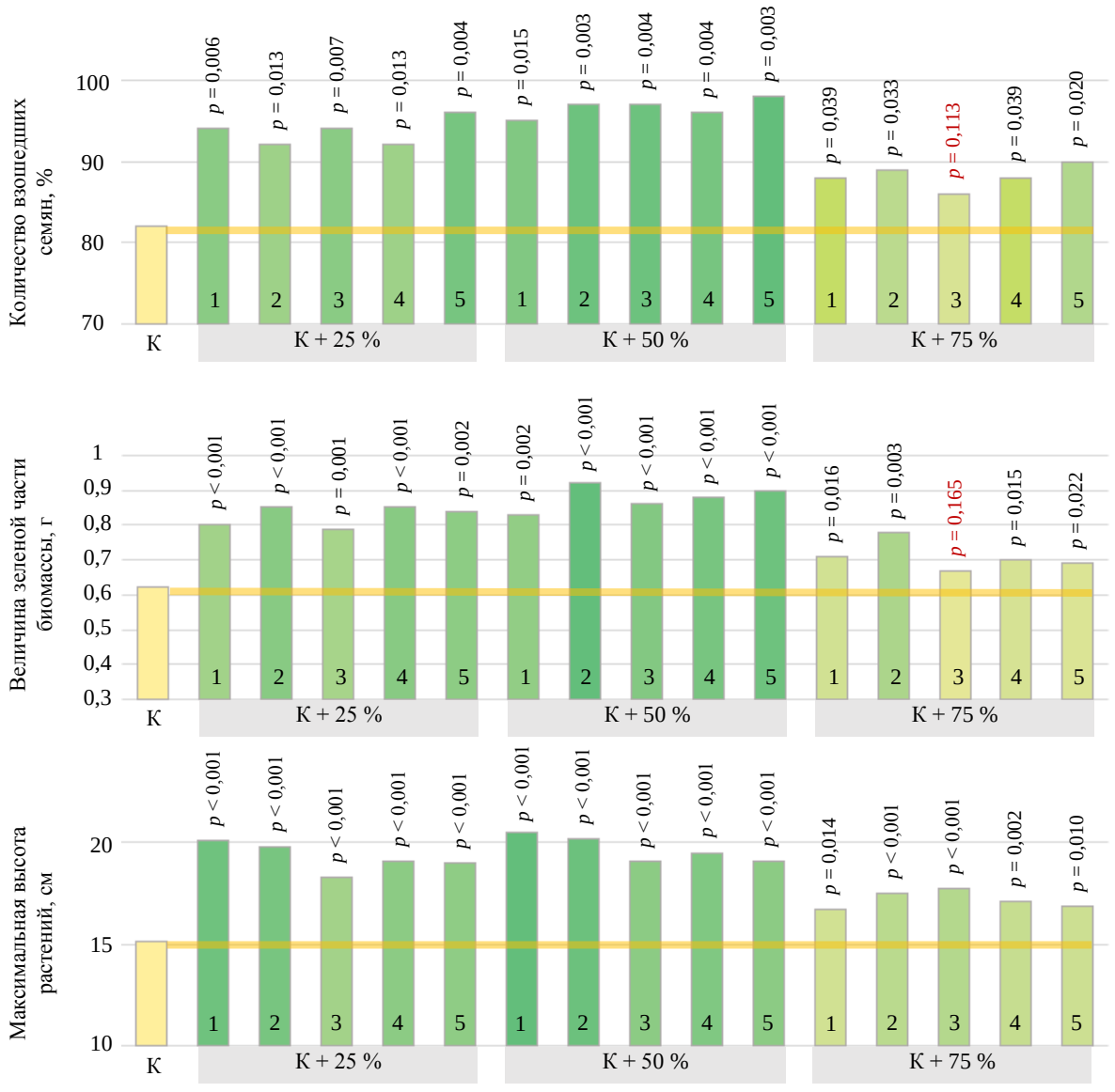


Рис.6. Результаты вегетационного опыта с указанием *p*-значений попарного сравнения каждого варианта с контрольной почвой

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Заключение

Промышленные отходы, являясь серьезным фактором негативного воздействия на все компоненты природной среды, представляют собой огромный резерв питательных веществ и микроэлементов, который может быть реализован. Полученные пять вариантов удобрений при помощи технологии компостирования ОСВ совместно с наполнителями, такими как отходы производства бумажной массы, дробленые частицы кофейного полуфабриката, отходы кормов и опилки чистой древесины, полностью отвечают требованиям, предъявляемым к удобрениям II группы в соответствии с ГОСТ Р 54651-2011, по ветеринарно-санитарным, гигиеническим, токсикологическим и агрохимическим показателям и могут быть использованы на этапе биологической рекультивации и в процессе дальнейшего благоустройства территорий.

Переход от модели накопления и захоронения отходов с потерей их ресурсного потенциала к модели их переработки с получением товарной продукции, такой как удобрения, является одним из путей обеспечения устойчивого развития и природопользования. Развитие данных технологий позволяет не только наладить производство альтернативных видов комплексных питательных добавок, но и решать проблемы накопленного экологического ущерба, а также интенсифицировать процессы восстановления территорий, утративших свои плодородные свойства.

Однако при работе с вторичным сырьем в виде отходов особое внимание требуется уделять обеспечению безопасности их применения, а также установлению баланса между положительными эффектами и потенциальными рисками, что было подтверждено вегетационным опытом. Таким образом, целесообразно проведение дальнейших исследований, направленных на изучение особенностей применения полученных удобрений на землях антропогенных ландшафтов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гаврилов В.Л., Немова Н.А., Резник А.В. и др.* О необходимости комплексной геоэкологической оценки техногенно нарушенных горными работами земель // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 10. С. 76-87. DOI: 10.18799/24131830/2023/10/4212

2. *Зеньков И.В., Перейра Э.Г., Конде А.С. и др.* Исследование экологического ущерба природным ландшафтам после закрытия угольных шахт в Тульской области // Экология и промышленность России. 2025. Т. 29. № 1. С. 16-21. DOI: 10.18412/1816-0395-2025-1-16-21

3. *Дзюба Е.А.* Современные представления о влиянии техногенеза на геохимические особенности почв: обзор // Антропогенная трансформация природной среды. 2024. Т. 10. № 2. С. 20-41. DOI: 10.17072/2410-8553-2024-2-20-41

4. *Quansheng Li, Junting Guo, Fei Wang, Ziheng Song.* Monitoring the Characteristics of Ecological Cumulative Effect Due to Mining Disturbance Utilizing Remote Sensing // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. Iss. 24. № 5034. DOI: 10.3390/rs13245034

5. *Симонова Ю.В., Жунусова О.Р., Чарыкова М.В., Касаткина Г.А.* Почвенно-геохимическая оценка засоления территории, прилегающей к Кучукскому месторождению солей (Алтайский край) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2024. Т. 69. Вып. 1. С. 185-212. DOI: 10.21638/spbu07.2024.110

6. *Paramonov G.P., Kovalevskyi V.N., Mysin A.V.* Determination of the Conditions of an Effective Functioning of Elongated Cumulative Charges in Processing the Marble Stone // Key Engineering Materials. 2020. Vol. 836. P. 19-24. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.836.19

7. *Евсеева И.С., Ушакова О.В., Русаков Н.В., Алексеев М.М.* Санитарно-химическая оценка влияния полигонов захоронения твёрдых коммунальных и промышленных отходов на качество почв // Гигиена и санитария. 2024. Т. 103. № 10. С. 1105-1110. DOI: 10.47470/0016-9900-2024-103-10-1105-1110

8. *Кутепова Н.А., Кутепов Ю.И., Васильева А.Д., Кутепов Ю.Ю.* Влияние на устойчивость отвалов гидроизоляции основания с применением геосинтетических материалов (геомембран) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 1. С. 47-65. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_1_0_47

9. *Плохов А.С., Харько П.А., Пашкевич М.А.* Исследование влияния хвостового хозяйства медно-колчеданного месторождения на поверхностные воды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 4. С. 57-68. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_57

10. *Беляева Л.А., Ракова К.В.* Российское общество в 1990-2023 гг.: опыт эмпирической оценки социальной структуры, качества жизни и социально-психологического климата // Мониторинг общественного мнения: экономические и социальные перемены. 2025. № 1. С. 29-56. DOI: 10.14515/monitoring.2025.1.2658

11. *Murphy R.H.* The clear expectation of cultural betterment in the face of rising living standards // Rationality and Society. 2023. Vol. 35. Iss. 3. P. 338-365. DOI: 10.1177/10434631231177810

12. *Данилов А.С., Кремчеев Э.А., Лозовая А.С., Гайдак В.О.* Мониторинг загрязнения почв Мончегорска: причины и последствия // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 9. С. 53-66. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_9_0_53

13. *Юркевич Н.В., Ельцов И.Н., Гуреев В.Н. и др.* Техногенное воздействие на окружающую среду в российской Арктике на примере Норильского промышленного района // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 12. С. 230-249. DOI: 10.18799/24131830/2021/12/3207

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

14. *Дмитриева Д.М., Чанышева А.Ф.* Вклад добывающих компаний в устойчивое развитие минерально-сырьевой базы арктического региона: новый подход к оценке и взаимодействию ключевых факторов // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2024. № 2. С. 71-87. DOI: 10.37614/2220-802X.2.2024.84.006

15. *Jun Sheng, Hong Chen, Xin Yu et al.* A critical review of textile waste recycling: focusing on global policies, recycling approaches, and recovery products application // Environmental Science and Pollution Research. 2026. Vol. 33. Iss. 2. P. 366-383. DOI: 10.1007/s11356-025-37335-x

16. *Дука А.А., Пашкевич М.А., Сверчков И.П.* Влияние совместной термической утилизации углесодержащих и сельскохозяйственных отходов на плавкость золы // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 9. С. 67-85. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_9_0_67

17. *Матвеева В.А., Чукаева М.А., Семенова А.И.* Получение смешанного коагулянта из отходов обогащения железной руды // Записки Горного института. 2024. Т. 267. С. 433-443.

18. *Шатрова А.С., Богданов А.В., Шкрабо А.И., Алексеева О.В.* Технология переработки отходов целлюлозно-бумажной промышленности в почвогрунты с использованием естественных природных процессов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 8. С. 153-162. DOI: 10.18799/24131830/2022/8/3658

19. *Быкова М.В., Малюхин Д.М., Нагорнов Д.О., Дука А.А.* Комплексная утилизация осадков городских сточных вод с получением техногенного почвогрунта // Записки Горного института. 2024. Т. 267. С. 453-465.

20. *Albuquerque A.R., Gama M.A.P., Lima V.M.N et al.* Recycling Nutrients Contained in Biomass Bottom Ash from Industrial Waste to Enhance the Fertility of an Amazonian Acidic Soil // Agriculture. 2022. Vol. 12. Iss. 12. № 2093. DOI: 10.3390/agriculture12122093

21. *Chiurciu I.A., Dana D., Krogstad T. et al.* Waste-based organic fertilizers for improved plant nutrition and yield responses // Annals of the University of Craiova – Agriculture Montanology Cadastre Series. 2025. Vol. 55. № 1. P. 238-244. DOI: 10.52846/aamc.v55i1.1684

22. *Михайлов А.В., Пиирайнен В.Ю., Боброва Е.М., Смирнов А.И.* Анализ перспектив использования торфяных почвоулучшителей для рекультивации нарушенных земель // Горная промышленность. 2025. № 2. С. 124-130. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-2-124-130

23. *Choudhary R.C., Singh P.K., Parmar Y.C.J., Lakshmanan A.* Novel Developments in Nano Fertilizer for Sustainable Crop Production to Promote Global Food Security // Sustainability. 2026. Vol. 18. Iss. 7. № 3198. DOI: 10.3390/su18073198

24. *Попов И.О., Пагалешкин Д.А., Федотов П.С., Колпаков В.М.* Обзорный анализ доступных технологий водорастворимых фосфорсодержащих удобрений // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2025. Т. 68. Вып. 5. С. 6-19. DOI: 10.6060/ivkkt.20256805.8f

25. *Etesami H., Byoung Ryong Jeong.* Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2018. Vol. 147. P. 881-896. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2017.09.063

26. *Usman M., Anastopoulos I., Hamid Y., Wakeel A.* Recent trends in the use of fly ash for the adsorption of pollutants in contaminated wastewater and soils: Effects on soil quality and plant growth // Environmental Science and Pollution Research. 2023. Vol. 30. Iss. 60. P. 124427-124446. DOI: 10.1007/s11356-022-19192-0

27. *Matveeva V.A., Smirnov Y.D., Suchkov D.V.* Industrial processing of phosphogypsum into organomineral fertilizer // Environmental Geochemistry and Health. 2022. Vol. 44. Iss. 5. P. 1605-1618. DOI: 10.1007/s10653-021-00988-x

28. *Черепанова М.В., Лановецкий С.В.* Оценка параметров гранулирования пылевидной фракции хлорида калия в присутствии добавки лигносульфоната // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2022. Т. 65. Вып. 6. С. 88-96. DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6591

29. *Qingshan Li, Dapeng Zhang, Suzhen Yin et al.* Feasibility of Using Animal Manure and Manure-Based Fertilizer as Soil Amendments: Veterinary Drugs Occurrence and Ecological Risk // Toxics. 2026. Vol. 14. Iss. 1. № 32. DOI: 10.3390/toxics14010032

30. *Barmao V., Wangari G., Orinda B. et al.* Comparative Effects of Chicken Manure, Manure Tea, And NPK Fertilizer on The Growth and Yield of Cabbage // International Journal of Life Science and Agriculture Research. 2025. Vol. 4. № 10. P. 583-591. DOI: 10.55677/ijlsar/V04I10Y2025-02

31. *Romero-Bautista K.J., Palma-López D.J., Vázquez-Navarrete C.J. et al.* Assessment of regional substrates and fertilizers for oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) seedlings production // Tropical and Subtropical Agroecosystems. 2025. Vol. 28. № 3. № 158. DOI: 10.56369/tsaes.6367

32. *Türk F.N., Arslanoğlu H.* Releases of metal bound modified sugar beet pulp (Me^{2+}MSBP) using various aqueous solutions: its use as slow release fertilizer // Biomass Conversion and Biorefinery. 2024. Vol. 14. Iss. 9. P. 10671-10685. DOI: 10.1007/s13399-023-04649-0

33. *Коровин А.А., Голембовский В.В., Бабенко А.С., Куровский А.В.* Использование технологий вермикомпостирования для утилизации органических отходов // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2024. № 68. С. 27-48. DOI: 10.17223/19988591/68/2

34. *Манжина С.А., Русин Л.И.* Влияние удобрений из осадков сточных вод на агроэкологические показатели почв // Мелиорация и гидротехника. 2025. Т. 15. № 2. С. 128-148. DOI: 10.31774/2712-9357-2025-15-2-128-148

35. *Mmonwuba N.C., Agunwamba J.C., Chisom U. et al.* Composting of Cow Dung and Food Waste under Aerobic Conditions for the Improvement of Soil // Asian Journal of Advanced Research and Reports. 2024. Vol. 18. Iss. 12. P. 483-492. DOI: 10.9734/ajarr/2024/v18i12845

36. *Быкова М.В., Матвеева В.А., Малюхин Д.М.* Заявка на изобретение № 2026106270 РФ. Способ получения органоминеральных удобрений. Заявл. 10.03.2026.

***Авторы*: Марина Валерьевна Быкова,** *канд. техн. наук, научный сотрудник* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), Bykova_MV@pers.spmi.ru, *https://orcid.org/0000-0001-9150-4201*, **Дмитрий Михайлович Малюхин,** *канд. геогр. наук, генеральный директор* (*ООО «НПК ЭкоДрайв», Гатчина, Россия*), *https://orcid.org/0009-0003-7057-910X*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0