



Научная статья

Комплексная утилизация осадков городских сточных вод с получением техногенного почвогрунта

М.В.Быкова¹✉, Д.М.Малюхин², Д.О.Нагорнов¹, А.А.Дука¹¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия² ООО «НПК ЭкоДрайв», Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: 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. EDN IAYJKS

Аннотация. Представлен анализ существующего подхода при обращении с осадками сточных вод и обоснован выбор наиболее перспективной технологии утилизации, позволяющей максимально использовать их ресурсный потенциал. Для получения полезного продукта (биокомпоста), пригодного для использования в составе техногенного почвогрунта, проведены экспериментальные исследования аэробной стабилизации органического вещества обезвоженных осадков городских сточных вод с добавлением прочих отходов путем применения технологии пассивного компостирования, которая входит в перечень научных доступных технологий. Подобрана оптимальная рецептура смеси, исходя из результатов определения содержания С и N, влажности и уровня pH используемых компонентов, что обеспечило компостирование органических отходов. Представлены результаты лабораторных исследований полученного биокомпоста по основным агрохимическим и санитарно-эпидемиологическим показателям, проведено тестирование по токсичности его водной вытяжки, выполнена оценка техногенного почвогрунта с биокомпостом в его составе на соответствие существующим гигиеническим требованиям, предъявляемым к качеству почв в Российской Федерации. По результатам вегетационного опыта определены оптимальные рецептуры техногенного почвогрунта – соотношение биокомпоста и песка, при которых наблюдаются наиболее благоприятные условия произрастания растений при совокупности следующих факторов: количество взошедших семян, максимальная высота растений и величина биомассы. Проведенные исследования позволяют увеличить долю утилизируемых осадков городских сточных вод с получением почвогрунтов, характеризующихся высоким содержанием питательных веществ для растений и потенциально пригодных для использования при озеленении территорий, биологическом этапе рекультивации техногенно нарушенных земель, а также для выращивания травянистых растений в условиях закрытого и открытого грунтов.

Ключевые слова: городские очистные сооружения; осадки сточных вод; пассивное компостирование; совместная утилизация органических отходов; плодородный техногенный почвогрунт

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

Поступила: 22.04.2024

Принята: 13.06.2024

Онлайн: 04.07.2024

Опубликована: 04.07.2024

Введение. Согласно Всероссийской переписи населения 2020 г., продолжается рост населения и урбанизация общества – с 2010 по 2020 годы население выросло на 1,4 % (147,2 млн чел.), а 74,8 % всего населения являются городскими жителями (в 2010 г. соотношение городского и сельского населения составляло 73,5 и 26,5 % соответственно)¹. Рост городского населения, в свою очередь, приводит к увеличению образующихся сточных вод, поступающих на городские очистные сооружения. Например, годовой забор воды из природных водных источников для хозяйственно-бытовых нужд за 2020-2022 гг. увеличился от 54523 до 56531 млн м³.²

¹ Итоги ВПН-2020. Том 1. Численность и размещение населения. URL: https://rosstat.gov.ru/vpn/2020/Tom1_Chislenost_i_razmeshchenie_naseleniya (дата обращения: 22.04.2024).

² Основные показатели охраны окружающей среды. Статистический бюллетень. М., 2023. 105 с. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/oxr_bul_2023.pdf (дата обращения 22.04.2024).



Образующееся в результате хозяйственно-бытовой и производственной деятельности человека сточные воды поступают на очистные сооружения, где организован процесс удаления механических примесей и загрязняющих веществ при помощи различных технологий, а также дальнейший сброс или использование очищенных сточных вод [1-3]. На городские очистные сооружения вместо хозяйственно-бытовых сточных вод в чистом виде зачастую поступают смешанные сточные воды, представляющие собой смесь хозяйственно-бытовых, промышленных и ливневых в различном соотношении, состав этих вод имеет широкий спектр нерастворимых и растворимых поллютантов [4, 5].

Классическая схема очистки сточных вод включает в себя этапы механической, химической, физико-химической и биологической очисток, а также обработку, обезвреживание и утилизацию осадков сточных вод³. Механическая очистка обычно является подготовительным этапом и применяется для удаления нерастворимых примесей в основном при помощи решеток, песколовков, жиroleвок, нефтеловушек и т.д., а также отстойников, где взвешенные вещества оседают под действием гравитационных сил, а легкие вещества всплывают на поверхность [6, 7]. Химическая и физико-химическая очистки обеспечивают удаление большинства загрязняющих веществ и включают разнообразные подходы, такие как добавление реагентов для осаждения поллютантов, коагуляцию, флокуляцию, сорбцию, а также ионный обмен и обратный осмос [8, 9]. Особое внимание в последнее время уделяется технологии очистки с использованием альтернативных сорбентов, которые эффективны с экологической и экономической точек зрения [10, 11]. Заключительным этапом является биологическая очистка, которая основывается на минерализации органических загрязнений сточных вод – тонкодиспергированных нерастворенных и коллоидных веществ, а также в растворенном состоянии – при помощи аэробных биохимических процессов [12-14].

Принятие той или иной схемы очистки зависит от многих факторов и требует проработки в соответствии со спецификой образующихся сточных вод. Так, например, для промышленных сточных вод ключевым этапом зачастую является химическая и физико-химическая очистки, направленные на удаление растворенных химических соединений и тяжелых металлов, а для городских очистных сооружений – биологическая очистка и обеззараживание, что связано с большим количеством органических примесей в поступающих хозяйственных и фекальных стоках.

Независимо от принятой системы очистки, образуются осадки сточных вод, представляющие собой смесь твердых фракций органических и минеральных веществ со значительным количеством патогенных микроорганизмов и тяжелых металлов (образовавшихся при механической очистке), а также избыточного активного ила (комплекса микроорганизмов, участвовавших в процессе биологической очистки сточных вод и выведенных из технологического процесса) [15, 16]. Согласно данным портала о практике водоснабжения, очистки стоков поселений и промышленности, в России ежегодное образование осадков сточных вод (по сухому веществу) составляет около 1,37-1,51 млн т⁴, а ежегодный объем осадков для городских сооружений при средней влажности 96 % составляет более 100 млн м³, при этом отношение органической части к минеральной составляет 80 : 20 [17, 18].

Обращение с осадками сточных вод происходит в два этапа – обезвоживание и дальнейшая утилизация обезвоженных осадков. Обезвоживание реализуется путем механической обработки (фильтр-прессование, центрифугирование, вакуумирование, фильтрование через геотубы и др.) или в естественных условиях – на иловых площадках (полях) [17, 19]. Несмотря на развитие и внедрение технологий механического обезвоживания в настоящее время все еще широко используются иловые поля за счет простоты их эксплуатации и низкой стоимости, однако данный процесс является долгосрочным и требует отчуждения больших территорий. Кроме того, иловые поля зачастую переполнены из-за недостаточного уровня утилизации обезвоженных осадков, что негативно сказывается на компонентах окружающей природной среды ввиду высокого содержания патогенных вирусов и бактерий, газов и опасных химических соединений, в том числе тяжелых металлов [18, 19]. Известно, что только в городах-миллионниках России насчитывается более

³ Белоконов Е.Н., Попова Т.Е., Пукас Г.Н. Водоотведение и водоснабжение. Ростов-на-Дону: Феникс, 2012. 379 с.

⁴ Осадки сточных вод как побочный продукт производства: новые возможности. URL: <https://vodanews.info/osadki-stochnyh-vod-kak-pobochnyj-produkt-proizvodstva-novye-vozmozhnosti/> (дата обращения 22.04.2024).



50 иловых полей общей площадью более 1,5 тыс. га⁵. Согласно государственному реестру объектов размещения отходов⁶, технология иловых полей применяется повсеместно, независимо от природно-климатических условий, в том числе и на уязвимых к антропогенному воздействию территориях арктических зон Российской Федерации.

Наиболее распространенными способами утилизации обезвоженных осадков сточных вод в настоящее время являются термическая обработка с получением вторичных отходов в виде твердых остатков, которые подвергаются дальнейшей утилизации, а также производство удобрений и почвогрунтов [4, 16, 20].

Способы термической утилизации позволяют обезвредить осадки сточных вод от патогенных вирусов и бактерий, однако приводят к концентрированию нелетучих токсичных веществ, особенно тяжелых металлов, в твердых остатках, что ограничивает сферу их дальнейшего применения. К тому же данные способы характеризуются высокими экономическими затратами [4]. Таким образом, наиболее распространенными направлениями использования твердых остатков в виде золы являются получение композиционных материалов (бетонов, асфальтобетонов, керамзитового гравия, стеновой керамики) [21, 22], а твердых остатков в виде пиролизных продуктов – получение углеродистых материалов (уголь, полукокс, или пирокарбон) [23].

Развитие технологий получения на основе осадков сточных вод удобрений [24, 25] и почвогрунтов [26, 27] обуславливается в первую очередь высоким содержанием органических веществ, что обеспечивает запас питательных компонентов для растений. В отличие от термической утилизации, использование данных технологий характеризуется меньшими экономическими затратами, минимальными экологическими последствиями при внедрении (отсутствует концентрирование токсичных соединений, в том числе тяжелых металлов), а также отсутствием образования вторичных отходов [4, 16]. Также при данном подходе рационально используется ресурсный потенциал осадков (в качестве плодородного субстрата для растений), что отвечает современным требованиям устойчивого развития при восстановлении нарушенных земель [28], однако необходимо уделять особое внимание санитарно-эпидемиологической оценке полученных продуктов из-за наличия патогенных микроорганизмов в городских осадках сточных вод.

Становится очевидной необходимость увеличения вариантов утилизации обезвоженных городских осадков сточных вод и интенсификация процессов их внедрения для исключения переполнения действующих иловых полей и отчуждения новых территорий для вновь образующихся осадков, что способствует минимизации негативных последствий для компонентов природной среды. Целью данного исследования является получение продукта (техногенного почвогрунта), потенциально пригодного для использования при озеленении территорий, рекультивации техногенно-нарушенных земель, а также для выращивания травянистых растений в условиях закрытого и открытого грунта.

Методы. Для получения безопасного в санитарно-эпидемиологическом отношении продукта, в состав которого входят осадки городских сточных вод, была выбрана технология аэробной ферментации органического вещества обезвоженных осадков (пассивное компостирование), которая входит в перечень наилучших доступных технологий⁷. Согласно исследованиям [29, 30] и нормативным документам⁸, для эффективного протекания процесса компостирования органических отходов необходимо соблюдение следующих условий:

- оптимальная влажность компостируемого материала должна составлять 60 %, однако процесс может протекать и в диапазоне 40-70 %; при содержании влаги выше 70 % снижается скорость органического разложения, формируются анаэробные условия и появляется гнилостный запах;

⁵ Рекультивация иловых полей в России. URL: <https://geonovosti.terratech.ru/social/rekultivatsiya-ilovykh-poley-v-rossii/> (дата обращения 22.04.2024).

⁶ Федеральная служба по надзору в сфере природопользования: Государственный реестр объектов размещения отходов. URL: <https://гпн.gov.ru/activity/regulation/kadastr/groro/> (дата обращения 07.03.2024).

⁷ В Поморье осваивают заброшенные земли для выращивания зерна и картошки. URL: <https://rg.ru/2022/03/29/reg-szfo/v-pomorie-osvaivaiut-zabroshennye-zemli-dlia-vyrashchivaniia-zerna-i-kartoshki.html> (дата обращения 22.04.2024).

⁸ Очистка сточных вод при производстве продукции (товаров), выполнении работ и оказании услуг на крупных предприятиях: информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. ИТС НДТ 8-2015. М.: Бюро НДТ, 2015. 129 с.



- соотношение C/N компостируемого материала должно составлять от 25 : 1 до 35 : 1; при более высоком соотношении снижается скорость процесса, а при более низком происходит потеря азота;
- оптимальный уровень pH компостируемого материала составляет 7-8, однако процесс компостирования может протекать и при более широком диапазоне pH (6,5-9).

Результатом компостирования органических отходов является ферментированная смесь, представляющая собой стабилизированный биокомпост с высоким содержанием питательных веществ [31, 32]. Также при органическом разложении происходит саморазогрев компостируемого материала (свыше 60 °С), что приводит к гибели большинства патогенных для человека и растений микроорганизмов, а также семян сорных растений [29, 33].

Оптимальные диапазоны указанных параметров соблюдались путем подбора состава компостируемой смеси. Классический подход при получении ферментированных осадков сточных вод заключается в добавлении при компостировании богатых органическим углеродом компонентов (опилок, соломы, торфа) для компенсации высокого содержания азота в осадках и получения оптимального соотношения C/N [26, 34, 35]. При подборе состава компостируемой смеси в данном исследовании стояли задачи совместной утилизации нескольких видов отходов, а также доступность используемых для этого дополнительных материалов, что наиболее эффективно с экологической и экономической точек зрения.

Помимо выбранных классических и доступных компонентов (опилки и торф) рассматривалась возможность добавления в компостируемую смесь кормовых отходов (остатки зернового сырья, полученные в процессе очистки технологических линий при производстве комбинированных кормов) и отходов грунта в результате проведения открытых земляных работ (ГОСТ Р 70083-2022. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Руководящие принципы обращения с пищевыми отходами). Доступность кормовых отходов обуславливается наличием 25 крупнейших в России компаний агропромышленного комплекса по производству комбинированных кормов с налаженными линиями логистики по всей стране. При этом в последнее время наблюдается развитие данной отрасли, в том числе и на арктических территориях, что связано с интенсификацией процесса импортозамещения. Так, например, в Архангельской обл. на заброшенных землях выращивают кормовые культуры для дальнейшего развития собственного производства комбикормов⁹. Положительным аспектом является то, что кормовые отходы характеризуются высоким содержанием органического углерода, азота, белка, витаминов и микроэлементов, это делает их пригодными для компостирования с целью получения питательных субстратов для растений. Доступность отходов грунта обуславливается повсеместным проведением открытых земляных работ.

В качестве компонентов смеси для получения биокомпоста были использованы следующие материалы: осадки сточных вод (отходы городских очистных сооружений с иловых полей), опилки чистой древесины (отходы деревообрабатывающей промышленности), кормовые отходы, торф и отходы грунта при проведении открытых земляных работ (рис.1).



Рис.1. Внешний вид компонентов компостируемой смеси: осадки сточных вод (а), опилки чистой древесины (б), кормовые отходы (в), торф (г), отходы грунта (д)

⁹ Комбикорм пока в плюсе. Топ-25 крупнейших игроков за год произвели свыше 19 млн т продукции. URL: <https://www.agroinvestor.ru/analytics/article/37844-kombikorm-poka-v-plyuse-top-25-krupneyshikh-igrokov-za-god-proizveli-svyshe-19-mln-t-produktsii/> (дата обращения 22.04.2024).



Соотношение компонентов в смеси для обеспечения компостирования определялось, исходя из лабораторных исследований по следующим показателям:

- влажность компонентов (при помощи термогравиметрического анализатора LECO TGA701 в соответствии с руководством пользователя);
- содержание углерода и азота в компонентах (при помощи анализатора углерода, водорода, азота LECO CHN-628C в соответствии с руководством пользователя);
- актуальная и обменная кислотности – реакция среды (определение pH водной и солевой вытяжки из компонентов при помощи pH-метра-иономера «Эксперт-001» в соответствии с ГОСТ 26423-85, ГОСТ 26483-85, ГОСТ 27979-88, ГОСТ 11623-89).

Характеристика компонентов по указанным показателям представлена в табл.1. Содержания C и N указаны с учетом влажности компонентов. Установлено, что при массовом соотношении компонентов (осадки сточных вод, опилки чистой древесины, кормовые отходы, торф, отходы грунта) в компостируемой смеси 32,5 : 35 : 6,5 : 13 : 13 соответственно, достигаются оптимальные условия для компостирования: влажность – 61 %, соотношение C/N – 25 : 1, актуальная и обменная кислотность – 7,0 и 6,7 ед. pH. Опытным и расчетным путями установлено, что при увеличении доли опилок чистой древесины и/или торфа происходит снижение как актуальной, так и обменной кислотности (менее 6,5 ед. pH), при этом невозможно компенсировать уровень pH смеси путем добавления осадков сточных вод, кормовых отходов, отходов грунта без снижения соотношения C/N за пределы оптимального диапазона. При уменьшении доли опилок уровень pH находится в допустимом диапазоне, однако возникает необходимость снижения и доли осадков сточных вод из-за высокого содержания в них азота, что нецелесообразно, поскольку данный вид отходов является основным утилизируемым компонентом.

Таблица 1

Характеристика компонентов для компостирования по основным показателям

Компонент	Содержание C, % по массе	Содержание N, % по массе	C/N	pH _{водн}	pH _{KCl}	Влажность, % по массе
Осадки сточных вод	8,1	1,1	7:1	7,5	7,1	80
Опилки чистой древесины	26,1	0,02	1305:1	5,5	4,5	55
Кормовые отходы	41,5	2,3	18:1	8,0	7,5	13
Торф	19,2	1,1	17:1	6,0	5,7	80
Отходы грунта	3,7	0,3	12:1	7,0	6,1	35

Закладывание опытного бурта проводилось на территории Санкт-Петербургского горного университета в летний период. Участок для компостирования представлял собой огороженную территорию, защищенную от прямых солнечных лучей, интенсивной ветровой нагрузки и атмосферных осадков (для исключения чрезмерного испарения влаги и переувлажнения компостируемого материала), который был подготовлен – места закладывания опытного бурта покрылись слоем соломы, что позволило предотвратить преждевременное остывание компостируемого материала из-за относительно небольшого объема (около 100 дм³).

Опыт по компостированию проводился в течение 90 сут для полной стабилизации биокомпоста. Осуществлялось периодическое ворошение компостируемой смеси (один раз в 10 дней) с целью увеличения притока воздуха для исключения развития анаэробных процессов. Также контролировались температура внутри бурта (при помощи портативных логгеров фирмы Thermochron) и влажность компостируемой смеси (путем периодического отбора проб и использования весового анализатора влажности МОС-120Н, при необходимости добавлялась вода для поддержания влажности на оптимальном уровне 60 %). Внешний вид опытного бурта в разные периоды времени представлен на рис.2.

После получения биокомпоста была проведена его многофакторная оценка по основным агрохимическим и санитарно-эпидемиологическим показателям, а также выполнено тестирование по критерию токсичности водной вытяжки. Лабораторные исследования биокомпоста и оценка его качества проводились по соответствующим нормативным документам, предусмотренным в настоящее время для почв, поскольку на основе полученного биокомпоста разрабатывался состав техногенного почвогрунта, качество которого должно отвечать современным требованиям экологической безопасности.



Рис.2. Внешний вид опытного бурта в период компостирования

Из группы агрохимических показателей были проведены следующие лабораторные исследования, определяющие плодородие полученного продукта по степени обеспеченности питательными веществами (макроэлементами) для растений¹⁰:

- содержание органического вещества (при помощи термогравиметрического анализатора LECO TGA701 в соответствии с ГОСТ 26213-2021);
- содержание минерального азота – аммонийного и нитратного (при помощи спектрофотометра DR5000 в соответствии с ГОСТ 26489-85 и ГОСТ 26488-85);
- содержание подвижного фосфора (при помощи спектрофотометра DR5000 в соответствии с ГОСТ 54650-2011);
- содержание обменного калия (при помощи атомно-абсорбционного спектрометра Shimadzu AA-7000 в соответствии с ГОСТ 54650-2011);
- актуальная и обменная кислотность – реакция среды.

Также были проведены лабораторные исследования по определению основных показателей при оценке санитарно-эпидемиологического состояния в соответствии с СанПиН 2.1.3684-21:

- содержание валовых форм металлов (мезоэлементов и микроэлементов), в том числе тяжелых (при помощи атомно-абсорбционного спектрометра Shimadzu AA-7000 в соответствии с М-МВИ-80-2008);
- содержание нефтепродуктов (при помощи анализатора жидкости «Флюорат-02-3М» в соответствии с ПНД Ф 16.1:2.21-98);

Все указанные лабораторные исследования были выполнены на базе научного центра «Оценка техногенной трансформации экосистем» Санкт-Петербургского горного университета. Исследование следующих санитарно-гигиенических, бактериологических и паразитологических показателей было выполнено в ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в городе Санкт-Петербурге и Ленинградской области»:

- массовая доля летучих фенолов (в соответствии с ПНД Ф 16.1:2.3:3.44-2005);
- содержание цианидов (в соответствии с М 4-2017);
- коли-индекс лактозоположительных кишечных палочек (в соответствии с МУК 4.2.3695-21);
- коли-индекс энтерококков фекальных (в соответствии с МУК 4.2.3695-21);
- наличие патогенных бактерий, в том числе сальмонелл (в соответствии с МУК 4.2.3695-21);
- наличие яиц и жизнеспособных личинок гельминтов (в соответствии с МУК 4.2.2661-10, п. 4.2);
- наличие ооцист и цист кишечных патогенных простейших (в соответствии с ГОСТ Р 57782, п. 12);
- наличие личинок и куколок синантропных мух (в соответствии с МУ 2.1.7.2657-10, п. III).

Дополнительно было выполнено тестирование по критерию токсичности водной вытяжки биокомпоста в соответствии с ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04 с использованием в качестве тест-объекта культуры водоросли *Chlorella vulgaris* при помощи комплекта оборудования для биотестирования – культиватора KB-05, многокуветного культиватора водорослей KBM-05 и фотоэлектроколориметра ИПС-03.

Заключительным этапом лабораторных исследований являлось проведение вегетационного опыта, представляющего собой выращивание растений в сосудах, заполненных тестируемыми и контрольными субстратами. При этом обеспечивались однородные условия (кроме исследуемых

¹⁰ Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2003. 240 с.



факторов), что исключило случайные воздействия на рост и развитие растений¹¹. Ценность вегетационных опытов заключалась в оперативном получении информации о влиянии различных факторов, которые выбирались в зависимости от целей проведения исследования [26, 36, 37].

Основным изучаемым фактором, влияющим на рост и развитие растений, являлся состав техногенного почвогрунта, полученного путем смешивания биокомпоста с кварцевым песком в различных массовых соотношениях. Смешивание биокомпоста с песком при получении техногенного почвогрунта обуславливается необходимостью уравнивания минеральной и органической частей (создание почвенного скелета) для обеспечения оптимальных условий роста и развития растений, при этом песок является химически инертным, не содержит тяжелых металлов, нефтепродуктов, питательных веществ, патогенных для человека и растений микроорганизмов. Биокомпост выполняет функцию структурообразователя при получении готового техногенного почвогрунта: в поровое пространство биокомпоста упаковываются при перемешивании частицы песка.

Перед проведением вегетационного опыта дополнительно были определены актуальная и обменная кислотности используемого песка в соответствии с ГОСТ 29234.6-91 и ГОСТ 26483-85, а также объемная (насыпная) плотность всех подготовленных субстратов в соответствии с ГОСТ 5180-84. Использование стандарта по определению обменной кислотности в почвах обуславливается отсутствием соответствующего стандарта для песков.

При проведении опыта в качестве тест-объекта использовалась газонная трава семейства злаков *Lolium perenne* (райграс пастбищный). Норма высадки определялась согласно рекомендациям производителя используемых семян. Для создания однородных условий произрастания использовался фитостеллаж НЛЮ 79-03-04 LD с возможностью регулировки мощности светодиодных фитосветильников и суточного расписания, а влажность субстратов поддерживалась на уровне 60 % от полной водоемкости. На рис.3 представлены почвенные субстраты, исследуемые при вегетационном опыте. В качестве контрольного образца почвы использовалась дерново-подзолистая почва, которая является подтипом подзолистых почв, распространенных на территории Ленинградской обл.¹²

В результате вегетационного опыта были получены результаты по всхожести семян (в процентном выражении), а также проведена оценка максимальной высоты газонной травы и величины ее биомассы. При этом количество взошедших семян определялось на 10-е сутки проведения опыта, что соответствует рекомендациям по определению нормы всхожести райграса пастбищного согласно ГОСТ 12038-84, а максимальная высота растений и величина биомассы оценивались на 21-е сутки. Срезание биомассы проводилось идентичным образом для всех образцов на уровне двух сантиметров от поверхности.

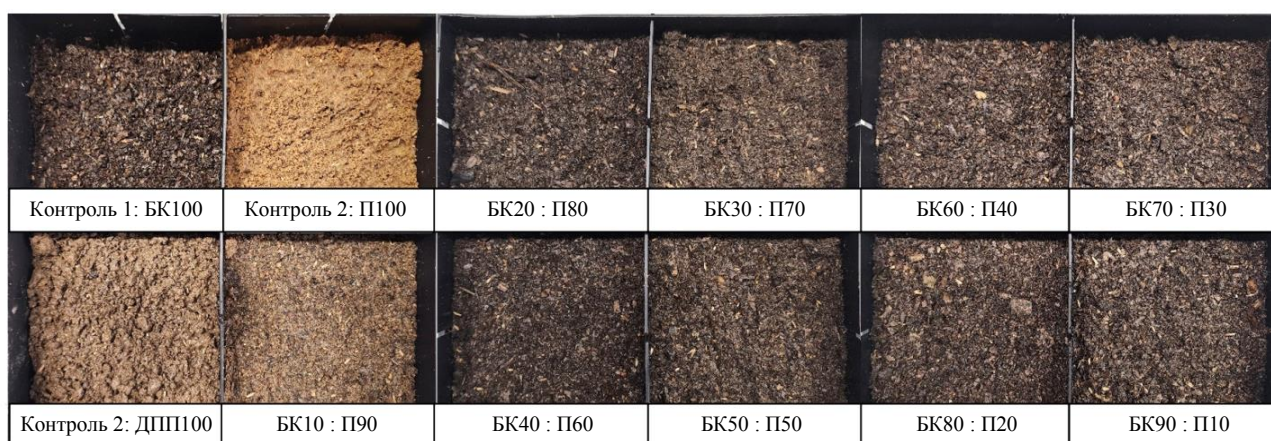


Рис.3. Опытные субстраты при проведении вегетационного опыта.

Цифры соответствуют массовой доле компонента в субстрате

БК – биокомпост, П – песок, ДПП – дерново-подзолистая почва

¹¹ Основы научных исследований в агрономии. URL: http://www.kgau.ru/distance/agro_02/belousov_oni-110201/01_05.html (дата обращения 22.04.2024).

¹² Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. URL: <http://egrpr.soil.msu.ru/egrpr.php?show=RUREG&ValueID=1001> (дата обращения 23.05.2024).



Обсуждение результатов. В процессе компостирования смеси при помощи портативных логгеров был зафиксирован момент начала саморазогревания (через 26-28 ч), максимальная температура (на третьи сутки), которая составила 71 °С. Это свидетельствует о термической деструкции органических веществ и гибели патогенных для человека и растений микроорганизмов, а также семян сорных растений. На рис.4 представлено изменение среднесуточной температуры внутри опытного бурта и на стадии компостирования. Незначительные флуктуации среднесуточной температуры в пассивную стадию компостирования обуславливаются колебаниями температуры атмосферного воздуха.

Готовый биокomпост характеризуется отсутствием гнилостного, аммиачного или сероводородного запаха, что свидетельствует о завершении процесса компостирования, имеет землистый запах. Результаты определения основных агрохимических показателей готового биокomпоста: содержание органического вещества 60 %; содержание минерального азота (аммонийного и нитратного) 145 мг/кг; содержание подвижного фосфора (в пересчете на P_2O_5) 3500 мг/кг; содержание обменного калия (в пересчете на K_2O) 1700 мг/кг; реакция среды (актуальная кислотность) 7.3 ед. pH, реакция среды (обменная кислотность) 6,8 ед. pH Биокomпост имеет очень высокую обеспеченность по запасу питательных веществ, доступных для растений¹³.

Результаты определения основных санитарно-гигиенических показателей готового биокomпоста представлены в табл.2. Установлено, что в биокomпосте, согласно СанПиН 1.2.3685-21, отсутствуют превышения по всем показателям, для которых установлены предельно допустимые (ПДК) или ориентировочно допустимые концентрации (ОДК), кроме цинка (отношение концентрации элемента к ОДК составило 1,2). Данное превышение нейтрализуется путем смешивания биокomпоста с песком при получении конечного продукта (техногенного почвогрунта). Также не выявлены превышения по содержанию нефтепродуктов, допустимый уровень которых составляет 1000 мг/кг¹⁴.

Результаты определения основных бактериологических и паразитологических показателей готового биокomпоста: лактозоположительные кишечные палочки (коли-формы) 10 КОЕ/г; энтерококки (фекальные стрептококки) 10 КОЕ/г; патогенные бактерии, в том числе сальмонеллы, яйца и личинки гельминтов (жизнеспособных), цисты кишечных патогенных простейших, личинки и куколки синантропных мух – не обнаружены. По полученным результатам было установлено, что, согласно МУ 2.1.7.730-99, получаемый путем смешивания биокomпоста и песка техногенный почвогрунт относится к категории чистых почв и может быть использован на территориях зон рекреации (парки, скверы и др.), зон санитарной охраны водоемов, санитарно-защитных зон и др.

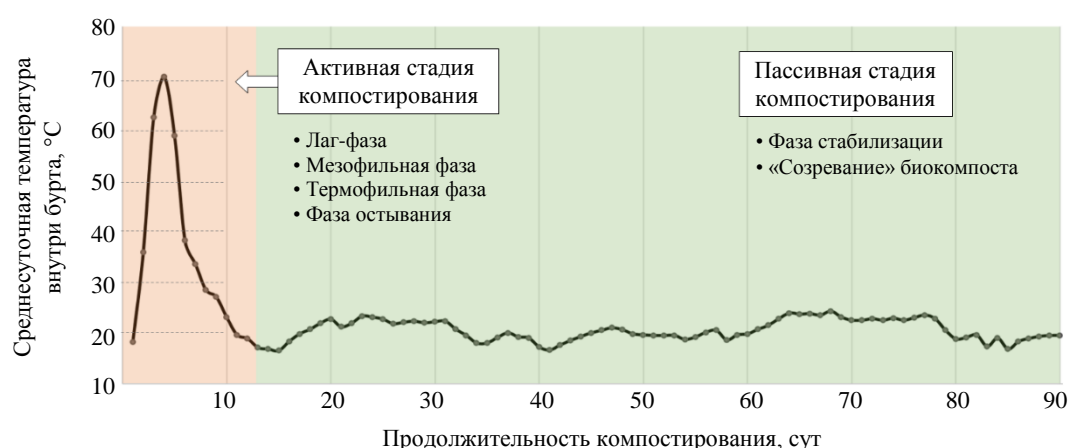


Рис.4. Изменение среднесуточной температуры

¹³ Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: ФГНУ «Росинормагротех», 2003. 241 с.

¹⁴ О порядке определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами: Письмо Минприроды России (Министерства охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ) от 27.12.1993 № 04-25/61-5678.



Таблица 2

Характеристика биокомпоста по основным санитарно-гигиеническим показателям
(в том числе содержание мезоэлементов и микроэлементов), мг/кг

Показатель	C _i	ПДК _i	ОДК _i	C/ПДК(ОДК)
Цинк	265	—	220	1,2
Свинец	35	—	130	0,3
Медь	123	—	132	0,9
Кадмий	0,7	2,0	—	0,4
Ртуть	Менее 0,02	2,1	—	0,2
Марганец	639	1500	—	0,4
Молибден	4,4	—	—	—
Железо	30900	—	—	—
Алюминий	48500	—	—	—
Магний	11200	—	—	—
Кальций	38700	—	—	—
Нефтепродукты	160	—	—	—
Фенолы летучие	1,8	—	—	—
Цианиды	Менее 0,5	—	—	—

При тестировании по критерию токсичности водной вытяжки биокомпоста (биотестирование с использованием культуры водоросли *Chlorella vulgaris*) установлено отсутствие проявления токсичности, т.е. не обнаружено снижение средней величины оптической плотности по сравнению с контрольным вариантом на 20 % и более в случае подавления роста тест-культуры или ее повышение на 30 % и более – при стимуляции ростовых процессов. Результаты биотестирования представлены в табл.3.

Таблица 3

Результаты биотестирования водной вытяжки биокомпоста

Номер пробы	Кратность разбавления	Номер повторности	D	D _{ср}	I %	Оказывает/не оказывает острое токсическое действие
Контроль	0	1	0,138	0,151	0	—
		2	0,152			
		3	0,156			
		4	0,158			
1	1	1	0,195	0,188	–24,50	Не оказывает
		2	0,182			
		3	0,191			
		4	0,184			
2	3	1	0,178	0,171	–13,25	Не оказывает
		2	0,169			
		3	0,170			
		4	0,167			
3	9	1	0,171	0,162	–7,28	Не оказывает
		2	0,158			
		3	0,160			
		4	0,159			
4	27	1	0,160	0,158	–4,64	Не оказывает
		2	0,147			
		3	0,166			
		4	0,159			
5	81	1	0,149	0,153	–1,32	Не оказывает
		2	0,158			
		3	0,145			
		4	0,160			

Вегетационный опыт позволил оценить в лабораторных условиях пригодность полученного биокомпоста как источника питательных веществ для растений и определить оптимальные соотношения биокомпоста и песка в техногенном почвогрунте. Первые ростки тест-культуры появились уже на третьи сутки проведения вегетационного опыта. На рис.5 представлены этапы формирования биомассы на опытных субстратах в течение вегетационного опыта.

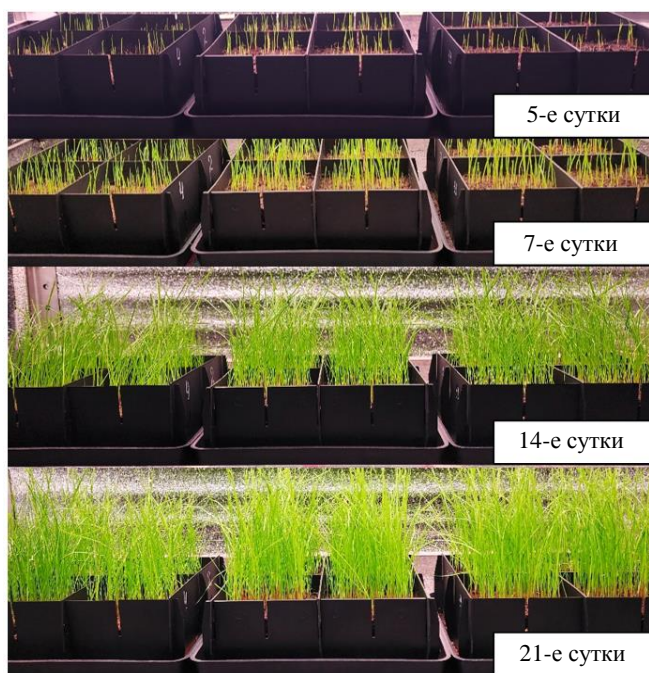


Рис.5. Этапы формирования биомассы на опытных образцах субстратов за весь период проведения вегетационного опыта

По результатам вегетационного опыта выявлены оптимальные рецептуры техногенного почвогрунта, т.е. соотношения биокомпоста и песка, при котором наблюдаются наиболее благоприятные условия произрастания тест-культуры по совокупности всех факторов (табл.4, рис.6). Актуальная и обменная кислотности используемого песка установлена 7,0 и 6,6 ед. рН соответственно, следовательно готовый техногенный почвогрунт относится к нейтральным (pH_{KCl} более 6,0) независимо от соотношения биокомпоста и песка.

При массовом соотношении биокомпост : песок, равном (20-60):(80-40), наблюдаются следующие положительные тенденции: увеличение всхожести семян (свыше 95 %), максимальные высота газонной травы и величина ее биомассы по сравнению с контрольными образцами и образцами с большим или меньшим содержанием биокомпоста. Эти тенденции могут быть обусловлены влиянием содержания питательных веществ и плотности субстратов

как в индивидуальном порядке, так и в сочетании друг с другом. Например, при увеличении содержания биокомпоста более 60 % по массе, несмотря на увеличение количества питательных веществ, наблюдается ухудшение по исследуемым показателям, что может быть связано со снижением плотности субстратов.

Таблица 4

Результаты вегетационного опыта

Опытный субстрат	Количество взошедших семян, %	Максимальная высота растений, см	Величина биомассы, г	Объемная (насыпная) плотность, см ³ /г
Контроль 1: БК100	89,1	25,3	4,31	0,46
Контроль 2: П100	74,6	22,5	2,74	1,26
Контроль 3: ДПП100	83,8	25,0	5,09	0,82
БК10 : П90	83,0	24,5	3,94	1,18
БК20 : П80	95,1	25,8	5,07	1,10
БК30 : П70	95,5	25,9	5,56	1,02
БК40 : П60	97,3	26,5	5,97	0,94
БК50 : П50	97,4	27,8	6,19	0,86
БК60 : П40	95,8	28,8	6,26	0,78
БК70 : П30	89,3	28,1	5,36	0,70
БК80 : П20	89,4	26,5	5,15	0,62
БК90 : П10	89,8	25,1	5,01	0,54

Недостаточное количество минерального компонента (песка), который служит основой почвенного скелета, критически влияет на водно-воздушный режим, приводит к нарушению капиллярных связей, вымыванию макро- и микроэлементов, чрезмерному испарению влаги, а также проявлению неустойчивости при формировании корневых систем.

При содержании биокомпоста менее 20 % по массе, помимо снижения количества питательных веществ, может играть важную роль в уплотнении субстрата, что затрудняет формирование корневых систем, ухудшает режим питания из-за уменьшения количества пор и капиллярных связей, затрудняет циркуляцию почвенного воздуха [38].

Опытным путем установлено, что получаемый техногенный почвогрунт может храниться в воздушно-сухом виде, что значительно упрощает его транспортировку при необходимости, а также исключает потребность использования инсектицидов, фунгицидов и/или консервантов.

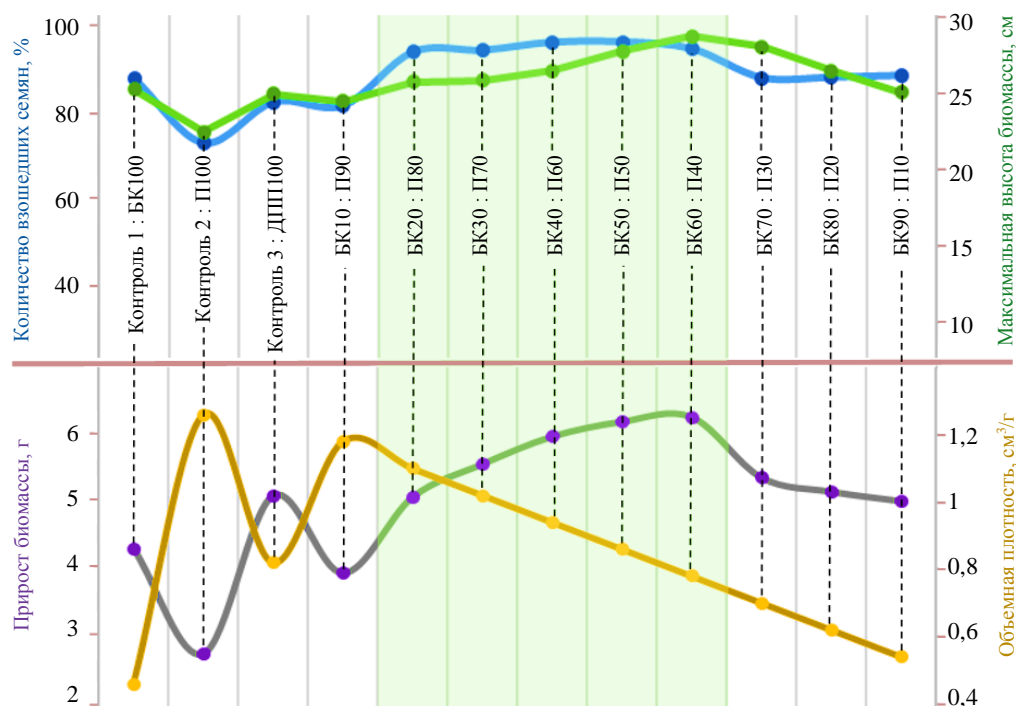


Рис. 6. Результаты вегетационного опыта

Также возможно отдельное хранение и/или транспортировка биокомпоста с дальнейшим получением техногенного почвогрунта необходимого состава на месте его предполагаемого использования, при этом в качестве минеральной части могут быть использованы доступные песчаные грунты [38].

Заключение. Проведенные исследования и представленные результаты позволяют говорить о возможности совместной утилизации осадков городских сточных вод с опилками чистой древесины, кормовыми отходами, торфом и отходами грунта. При этом получаемый полезный продукт в виде биокомпоста характеризуется высоким содержанием органического вещества, азота, фосфора, калия в доступных для растений формах. При смешивании биокомпоста с песком выявлены оптимальные соотношения, при которых наблюдаются наиболее благоприятные условия произрастания травянистых растений на примере райграса пастбищного.

Увеличение вариантов утилизации осадков городских сточных вод позволит сократить количество иловых полей, что в свою очередь будет способствовать снижению негативного воздействия на компоненты окружающей среды. Однако важно учитывать, что при реализации данного способа утилизации обязателен контроль каждой партии получаемого биокомпоста или готового состава техногенного почвогрунта по санитарно-гигиеническим, бактериологическим и паразитологическим показателям для подтверждения безопасности их использования в тех или иных целях согласно действующим нормативным документам.

Для установления пригодности использования получаемого техногенного почвогрунта в течение длительного времени при озеленении территорий, на биологическом этапе рекультивации техногенно-нарушенных земель и для выращивания травянистых растений в условиях закрытого или открытого грунтов целесообразно проведение долгосрочных вегетационных опытов в лабораторных условиях и опытно-промышленных испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rui Du, Cong Li, Qingtao Liu et al. A review of enhanced municipal wastewater treatment through energy savings and carbon recovery to reduce discharge and CO₂ footprint // *Bioresource Technology*. 2022. Vol. 364. № 128135. DOI: [10.1016/j.biortech.2022.128135](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128135)
2. Matveeva V.A., Alekseenko V.A., Karthe D., Puzanov A.V. Manganese Pollution in Mining-Influenced Rivers and Lakes: Current State and Forecast under Climate Change in the Russian Arctic // *Water*. 2022. Vol. 14. Iss. 7. № 1091. DOI: [10.3390/w14071091](https://doi.org/10.3390/w14071091)



3. Mysin A.V., Kovalevskiy V.N., Kirkin A.P. Ensuring environmental safety of massive explosions in the combined development of coal deposits in Kuzbass // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 848. № 012139. DOI: [10.1088/1755-1315/848/1/012139](https://doi.org/10.1088/1755-1315/848/1/012139)
4. Kizgin A., Schmidt D., Joss A. et al. Application of biological early warning systems in wastewater treatment plants: Introducing a promising approach to monitor changing wastewater composition // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 347. № 119001. DOI: [10.1016/j.jenvman.2023.119001](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119001)
5. Матюшенко Е.Н. Удаление фосфора из возвратных потоков площадки очистных сооружений канализации // Вода и экология: проблемы и решения. 2019. № 2 (78). С. 40-49. DOI: [10.23968/2305-3488.2019.24.2.40-49](https://doi.org/10.23968/2305-3488.2019.24.2.40-49)
6. Bilgin M., Yurtsever M., Karadagli F. Microplastic removal by aerated grit chambers versus settling tanks of a municipal wastewater treatment plant // Journal of Water Process Engineering. 2020. Vol. 38. № 101604. DOI: [10.1016/j.jwpe.2020.101604](https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101604)
7. Калачев Д.А., Браннер В. Механическая очистка стоков // Водоснабжение и санитарная техника. 2021. № 12. С. 46-49. DOI: [10.35776/VST.2021.12.06](https://doi.org/10.35776/VST.2021.12.06)
8. Junaidi, Sudarno, Santoso R. Physical and Chemical Treatability Study in Wastewater Treatment Plant Design (Case Study: Leather Tanning Industry) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023. Vol. 1268, № 012025. DOI: [10.1088/1755-1315/1268/1/012025](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1268/1/012025)
9. Lasaki B.A., Sugio R., Maurer P., Schönberger H. Sustainable transformation: Unlocking energy positivity in municipal wastewater treatment through innovative advanced primary treatment configurations for maximum solids separation // Separation and Purification Technology. 2024. Vol. 342. № 127081. DOI: [10.1016/j.seppur.2024.127081](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127081)
10. Чукаева М.А., Поваров В.Г., Сверчков И.П. Железосодержащие отходы металлообработки как хемосорбент для очистки сточных вод от ионов молибдена // Вестник Московского университета. Серия 2. Химия. 2020. Т. 61. № 1. С. 43-51.
11. Cheremisina O., Litvinova T., Sergeev V. et al. Application of the Organic Waste-Based Sorbent for the Purification of Aqueous Solutions // Water. 2021. Vol. 13. Iss. 21. № 3101. DOI: [10.3390/w13213101](https://doi.org/10.3390/w13213101)
12. Shihao Jia. Biological Treatment of Industrial Wastewater // Highlights in Science, Engineering and Technology. 2023. Vol. 69. P. 523-531. DOI: [10.54097/hset.v69i.12530](https://doi.org/10.54097/hset.v69i.12530)
13. Матвеева В.А., Бек Дж., Данилов А.С. Перспективы использования метода альголизации в очистке карьерных вод северных горнопромышленных агломераций от азотного загрязнения // Устойчивое развитие горных территорий. 2023. Т. 15. № 1. С. 134-142. DOI: [10.21177/1998-4502-2023-15-1-134-142](https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-1-134-142)
14. Xiaojun Meng, Zhigui Huang, Guanghuan Ge. Upgrade and reconstruction of biological processes in municipal wastewater treatment plants // Desalination and Water Treatment. 2024. Vol. 317. № 100299. DOI: [10.1016/j.dwt.2024.100299](https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100299)
15. Дубовец Д.Л. Обращение с отходами осадков сточных вод: основные направления // Экология на предприятии. 2023. № 5 (143). С. 27-35.
16. Abdelfattah A., Ramadan H., Elsamahy T. et al. Multifaced features and sustainability of using pure oxygen in biological wastewater treatment: A review // Journal of Water Process Engineering. 2023. Vol. 53. № 103883. DOI: [10.1016/j.jwpe.2023.103883](https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103883)
17. Валиев В.С., Иванов Д.В., Шагидуллин Р.Р. Способы утилизации осадков городских сточных вод (обзор) // Российский журнал прикладной экологии. 2020. № 4. С. 52-63. DOI: [10.24411/2411-7374-2020-10034](https://doi.org/10.24411/2411-7374-2020-10034)
18. Насыров И.А., Маврин Г.В., Шайхиев И.Г. Проблемы утилизации иловых осадков очистных сооружений // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 19. С. 257-259.
19. Шашкин Р.Ю. Современные методы обезвоживания осадка сточных вод // Форум молодых ученых. 2018. № 5-3 (21). С. 919-922.
20. Пашкевич М.А., Патокин Д.А. Направления использования нитроцеллюлозосодержащих отходов химической промышленности на объектах минерально-сырьевого комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 9-1. С. 215-230. DOI: [10.25018/0236_1493_2023_91_0_215](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_215)
21. Чулкова И.Л., Смирнова О.Е., Красова А.В. Применение осадков сточных вод в производстве бетона // Вестник СибАДИ. 2021. Т. 18. № 5. С. 566-575. DOI: [10.26518/2071-7296-2021-18-5-566-575](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-566-575)
22. Литвинова Т.Е., Сучков Д.В. Получение легкого золотобетона как перспективное направление утилизации техногенных продуктов (на примере отходов водоотведения) // Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 906-918.
23. Кузьмина Р.И., Кубашева Р.Н., Кунашева З.Х. Исследование свойств твердого остатка пиролиза осадков сточных вод // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2023. Т. 23. Вып. 3. С. 280-288. DOI: [10.18500/1816-9775-2023-23-3-280-288](https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-3-280-288)
24. Kominko H., Gorazda K., Wzorek Z. Effect of sewage sludge-based fertilizers on biomass growth and heavy metal accumulation in plants // Journal of Environmental Management. 2022. Vol. 305. № 114417. DOI: [10.1016/j.jenvman.2021.114417](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114417)
25. Рудзис Э.Р., Петрова Т.А. Перспективы использования нетрадиционных мелиорантов для формирования растительного покрова на рекультивируемых территориях // Горный журнал. 2023. № 9. С. 75-82. DOI: [10.17580/gzh.2023.09.11](https://doi.org/10.17580/gzh.2023.09.11)
26. Касатиков В.А., Шабардина Н.П. Влияние почвогрунта на основе осадка городских сточных вод на агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы и урожайность райграса однолетнего // Владимирский земледелец. 2021. № 3 (97). С. 35-38. DOI: [10.24412/2225-2584-2021-3-35-38](https://doi.org/10.24412/2225-2584-2021-3-35-38)
27. Smirnov Yu.D., Suchkov D.V., Danilov A.S., Goryunova T.V. Artificial soils for restoration of disturbed land productivity // Eurasian Mining. 2021. № 2. P. 92-96. DOI: [10.17580/em.2021.02.19](https://doi.org/10.17580/em.2021.02.19)
28. Юрак В.В., Усманов А.И. Восстановление нарушенных земель в горных экосистемах // Устойчивое развитие горных территорий. 2023. Т. 15. № 4. С. 901-911. DOI: [10.21177/1998-4502-2023-15-4-901-911](https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-4-901-911)
29. Миронов В.В., Седых А.А., Миронов А.В., Палюткина К.В. Биотермокомпостирование органических отходов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2019. № 4 (36). С. 37-45.
30. Седых А.А., Миронов В.В. К вопросу соотношения углерода к азоту в компостной смеси при планировании экспериментов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2016. № 4 (24). С. 147-150.



31. Малюхин Д.М., Бакина Л.Г., Маячкина Н.В. и др. Почвогрунт из отсева грохочения ТКО: эколого-химическая и токсикологическая характеристика по результатам двухлетнего полевого опыта // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27. № 12. С. 62-68. DOI: [10.18412/1816-0395-2023-12-62-68](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-12-62-68)
32. Ковишов С.В. Влияние биогумуса на основе отходов птицеводства на физико-химические свойства дерново-подзолистых почв и выращиваемых растений // Устойчивое развитие горных территорий. 2023. Т. 15. № 2. С. 326-337. DOI: [10.21177/1998-4502-2023-15-2-326-337](https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-2-326-337)
33. Миронов С.Ю., Протасова М.В., Проценко Е.П. и др. Технологические направления по переработке органических отходов // Auditorium. 2017. № 1 (13). С. 30-42.
34. Яшкина А.А., Федорова О.А., Кирдишова Е.А. Агрохимические показатели компостов на основе осадков сточных вод, полученных при добавлении различных наполнителей // Проблемы региональной экологии. 2018. № 1. С. 45-49. DOI: [10.24411/1728-323X-2018-11045](https://doi.org/10.24411/1728-323X-2018-11045)
35. Singh A., Sawant M., Herlekar M. et al. Assessing feasibility of sewage sludge composting in rotary drum reactor // Bio-resource Technology. 2024. Vol. 394. № 130219. DOI: [10.1016/j.biortech.2023.130219](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130219)
36. Чукаева М.А., Пухальский Я.В., Лоскутов С.И. и др. Оценка изменения фитоэкстракции тяжелых металлов бархатцами прямостоячими (*Tagetes erecta*) из загрязненных почв Норильска при использовании гуминовых добавок // Арктика: экология и экономика. 2024. Т. 14. № 1. С. 90-102. DOI: [10.25283/2223-4594-2024-1-90-102](https://doi.org/10.25283/2223-4594-2024-1-90-102)
37. Хабарова Т.В., Виноградов Д.В., Кочуров Б.И. и др. Агроэкологическая эффективность использования осадка сточных вод и вермикомпостов в агроценозе овса посевного // Юг России: экология, развитие. 2018. Т. 13. № 2. С. 132-143. DOI: [10.18470/19921098-2018-2-132-143](https://doi.org/10.18470/19921098-2018-2-132-143)
38. Заявка на изобретение № 2024108705 РФ. Техногенный почвогрунт / И.П.Сверчков, М.В.Быкова, Ю.Д.Смирнов, Д.М.Малюхин. Заявл. 02.04.2024.

Авторы: М.В.Быкова, канд. техн. наук, научный сотрудник, Bykova_MV@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9150-4201> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), Д.М.Малюхин, канд. геогр. наук, генеральный директор, <https://orcid.org/0009-0006-2534-9999> (ООО «НПК ЭкоДрайв», Санкт-Петербург, Россия), Д.О.Нагорнов, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-9932-8836> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия), А.А.Дука, научный сотрудник, <https://orcid.org/0009-0009-6656-7660> (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.