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*

Мелиоранты на основе отходов химической промышленности для рекультивации объектов горного производства

Д.А.Патокин✉, А.С.Данилов
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Патокин Д.А., Данилов А.С. Мелиоранты на основе отходов химической промышленности для рекультивации объектов горного производства // Записки Горного института. 2026. Т. 281. Вып. 2. С. 146-159. EDN XXMOOS

Аннотация
При добыче и обогащении полезных ископаемых происходит образование техногенно-нарушенных земель, требующих проведения рекультивации. В работе рассматривается возможность получения эффективного мелиоранта для рекультивации нарушенных земель объектов горного производства с использованием комплексных органоминеральных мелиорантов на основе отходов химической промышленности, содержащих нитраты целлюлозы. Обоснован подход к реализации получения комплексных органоминеральных мелиорантов. Установлено, что полученные мелиоранты удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 54534-2011 по химическому составу для проведения технического и биологического этапов рекультивации, а также обладают дополнительными положительными агрохимическими характеристиками. В вегетационном опыте с использованием овса посевного (*Avena sativa*) и мятлика лугового (*Poa pratensis*) при внесении комплексных органоминеральных мелиорантов выраженные положительные результаты получены по приросту наземной биомассы растений для фоновых моделей только с песком 58,8-104,9 и 245,5-1721,8 % для овса и мятлика соответственно. Прирост биомассы для овса и мятлика в сравнении с фоновой моделью с отходом животноводства – навозом крупного рогатого скота составил 5,2-11,6 и 290,9-413,8 % соответственно. Отмечен положительный эффект для корневой части растений обоих видов. Доказано, что предлагаемые мелиоранты на основе рассматриваемых отходов пригодны для использования при рекультивации объектов горного производства, технология утилизации характеризуется положительным экономическим эффектом.

Ключевые слова
рекультивация нарушенных земель; утилизация отходов; вторичное использование отходов; нитраты целлюлозы; органоминеральные мелиоранты; химическая деструкция; вегетационный опыт

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

Поступила: 23.06.2026 ***Принята: 29.09.2026*** ***Онлайн: 19.10.2026*** ***Опубликована: 30.10.2026***

Введение

Горно-добывающая промышленность считается одной из ключевых отраслей в структуре хозяйственной деятельности в России, занимает лидирующие позиции и в общемировом хозяйстве. Именно от эффективности развития рассматриваемой отрасли во многом зависит обеспечение национального суверенитета РФ в сложившихся геополитических реалиях.

Эксплуатируемые и ликвидируемые объекты горного производства по всему миру представляют собой источники комплексного негативного воздействия на компоненты окружающей природной среды, которые проявляются в виде химического загрязнения [1, 2], нарушениях структуры и целостности [3], сопровождающихся интенсификацией процессов выветривания, что усугубляет степень нарушенности ландшафтов [4] и ускоряет процесс образования техногенных ландшафтов [5]. Отрицательно влияют на эти процессы географические факторы, например географическое положение основных горно-добывающих районов в бореальной зоне северного полушария и перспективных районах добычи в Арктике, что связано с крайней неустойчивостью северных ландшафтов к антропогенному воздействию [6, 7], а также особенности природного и техногенного рельефа территории [8].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

По официальным данным Минприроды России, опубликованным в Государственном докладе «О состоянии и об охране окружающей среды РФ в 2024 году», именно технологическим процессам, связанным с добычей полезных ископаемых и геологоразведочными работами, отводится главная роль в качественном и количественном ухудшении плодородия почв и образовании техногенных форм рельефа. Так, в период 2017-2024 гг. общая площадь нарушенных земель составила 1148,1 тыс. га, увеличение относительно 2023 г. на 9,7 тыс. га, общая площадь рекультивированных земель к концу 2024 г. 158,1 тыс. га. Наблюдается ежегодный устойчивый рост площади нарушенных земель промышленного назначения с 419,4 тыс. га в 2017 г. до 508,3 тыс. га к концу 2024 г. К настоящему времени качество рекультивационных работ и темп их реализации остается на низком уровне [3, 9] и зачастую это связано с высокими затратами на техногрунты и мелиоранты [7].

В отечественном и мировом хозяйстве остро строит проблема утилизации отходов производства и потребления, связанная с ростом объемов промышленного производства. Только на территории РФ, согласно Государственному докладу «О состоянии и об охране окружающей среды в РФ в 2024 году», с 2014 по 2023 гг. происходило ежегодное увеличение общей массы образующихся отходов с 5168,0 млн т (2014 г.) до 9278,8 млн т (2023 г.), что составило 79,5 %, исключением стал 2020 г., что связано с общим спадом промышленного производства во время пандемии. Положительная динамика была отмечена лишь за 2024 г., когда общая масса образованных отходов сократилась до 8515,0 млн т. Причиной этому служит минимизация объемов образования отходов, использование их как вторичных ресурсов [10] и для нужд рекультивации, главным образом введением статуса «побочный продукт», что позволило перевести часть отходов в новый классификационный статус.

В настоящее время исследователями всесторонне рассматривается широкий спектр отходов и осадков сточных вод, которые потенциально могут быть использованы при рекультивации территорий объектов горного производства [11, 12]. С практической точки зрения эффективно использование золошлаковых отходов теплоэлектростанций [13], некондиционного флюсового известняка [12] и золы бурых углей [11], шламов содового производства [14] и отходов обогащения железных руд, осадков сточных вод на объектах размещения отходов лопаритовых и железных руд [15, 16], а также совместное применение отходов содового производства и осадков биологических очистных сооружений при рекультивации участка сброса шахтных вод ликвидированного угольного бассейна [17].

В качестве таких отходов могут быть рассмотрены и многотоннажные пожароопасные отходы химической промышленности, содержащие нитраты целлюлозы, суммарная масса которых на территории РФ составляет сотни тонн и с ростом производства продолжает увеличиваться. Актуальность проблемы связана с отсутствием целесообразного и экологически эффективного общепринятого подхода к утилизации отходов. К настоящему времени такие отходы либо накапливаются на территории предприятий, являясь источником повышенной техногенной опасности, либо уничтожаются методом сжигания, которое также характеризуется значительным негативным воздействием на окружающую среду [18-20].

Таким образом, на основе предыдущих результатов [18], где был обоснован подход к утилизации отходов, содержащих нитраты целлюлозы, с получением минеральных почвенных добавок, целью исследования стала оценка потенциала пригодности для использования при рекультивации нарушенных земель комплексных органоминеральных мелиорантов (ОММ), получаемых на основе утилизированных отходов химической промышленности.

Материалы и методы

Объект исследования и дальнейшей оценки потенциала пригодности для использования при рекультивации нарушенных земель – комплексные ОММ, полученные на основе утилизированных отходов химической промышленности, содержащих нитраты целлюлозы, а также отходов животноводства в виде навоза крупного рогатого скота. Необходимыми и последовательными этапами получения предлагаемых мелиорантов становятся химическая деструкция основного компонента отходов (нитратов целлюлозы) и смешение утилизированной массы с органической составляющей.

Отходы химической промышленности, содержащие нитраты целлюлозы – нитроцеллюлозосодержащие отходы (НЦСО), представляют собой шламы-осадки, образующиеся после стадии

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

механической очистки сточных вод, часто рассматриваются как отходы, так как фактически относятся к некондиционным технологическим остаткам, направляемым на обезвреживание методом сжигания [21, 22]. НЦСО характеризуются частицами различного дисперсного состава, с качественной точки зрения представляют смесь органической (нитраты целлюлозы, остатки органических высокомолекулярных соединений и растительных остатков) и минеральной частей (карбонаты кальция и магния, оксиды кремния и др.) [21]. Отбор проб НЦСО и их первичная пробоподготовка (сушка, измельчение) осуществлены аналогично [18], где рассматривалась возможность их утилизации.

С целью проведения химической деструкции отхода для дальнейшего получения комплексных ОММ был определен химический состав отхода (табл.1). В качестве пробоподготовки для полного извлечения металлов из пробы использовался метод мокрой минерализации смесью азотной кислоты и перекиси водорода по ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 с использованием системы микроволнового разложения Multiwave 3000, анализ осуществлен на атомно-эмиссионном спектрометре Shimadzu ICPE-9000 и атомно-абсорбционном спектрометре Shimadzu AA-7000 по М-МВИ 80-2008. Ртуть определена по ПНД Ф 16.2.2:2.3.25-02 с использованием универсального ртутеметрического комплекса УКР-1 МЦ. Погрешности измерений принимались по указанным методикам.

Таблица 1

Валовый химический состав отхода на абсолютно сухое состояние

Элемент	Содержание, мг/кг	Элемент	Содержание, мг/кг
Ca	101317,1±30395,1	Na	251,2±75,7
Al	7398,4±2219,5	Mn	203,5±61,0
Fe	7372,5±2211,7	Zn	148,4±44,5
Mg	3981,5±1194,5	Cr	145,7±43,7
Pb	1590,5±477,2	Ni	58,5±17,6
P	478,1±143,4	As	49,8±14,9
Cu	399,6±119,9	Co	29,7±8,9
K	323,5±97,1	Cd	4,9±1,5
Ti	291,0±87,3	Hg	3,9±0,9

Содержание общего азота в НЦСО составило 7,3±0,2 мас.%, углерода – 21,2±0,6 мас.%, определение производилось на элементном анализаторе LECO CHN 628.

В основе химической деструкции основного компонента предложена гетерогенная система с использованием неорганических соединений – сильных щелочей и кислот [23-25]. С учетом получения дальнейшего сырья для формирования комплексного ОММ приняты гидроксид калия и водный раствор серной кислоты как наиболее целесообразные для деструкции. Деструкция НЦСО растворами гидроксида калия сопровождается образованием основного продукта реакции – нитрата калия, что обеспечивает растения необходимыми элементами минерального питания (азот и калий). В результате такой химической обработки образуется сильнощелочной раствор, нейтрализацию которого до значения водородного показателя pH 6,0-8,0 проводили ортофосфорной кислотой, что дополнительно обеспечивало мелиорант фосфором. При деструкции растворами серной кислоты основным продуктом реакции является азотная кислота, нейтрализация которой гидроксидом калия до значений pH 6,0-8,0 также приводит к образованию нитрата калия.

На этапе химической деструкции НЦСО возможна безопасная и эффективная утилизация с получением комплексных минеральных почвенных добавок в жидкой или твердой формах [18]. Использование добавок возможно при рекультивации только в качестве источников минерального питания формируемого почвенного слоя или при наличии естественных почв (в том числе антропогенно измененных), где имеется органическое вещество гумусового горизонта, в то время как техногенно-нарушенные земли горно-добывающей промышленности (отвалы, производственные площадки и техногенные пустоши) бедны органическим веществом, формирование устойчивого почвенно-растительного покрова в крайней степени осложнено, отличается замедленным темпом или вовсе

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

не будет происходить. Именно органическое вещество ускоряет процесс образования почвенно-растительного комплекса на рекультивируемых территориях за счет положительного влияния на агрохимические свойства (структура, химический состав, водный режим и т.д.) [11, 26, 27] и формирования благоприятной среды для растений и почвенных микроорганизмов [28]. Поэтому важной составляющей предлагаемых мелиорантов становится органическая часть.

В качестве органической составляющей разрабатываемых мелиорантов могут быть использованы торф и сапропели, обеспечивающие субстраты гуминовыми веществами (до 50 мас.% в торфе), фульвокислотами, аминокислотами и сахарами, содержащие полный набор элементов питания и микроэлементов, отличающиеся дешевизной и доступностью благодаря значительным запасам на территории РФ (в том числе в районах расположения основных горно-промышленных районов и предприятий, где образуется НЦСО) особенно при совместном использовании, а также при добавлении минеральных удобрений [29, 30]; осадки сточных вод коммунального хозяйства и отходы выгребных ям, имеющие богатую микрофлору и отличающиеся повышенным содержанием органического углерода, а также основных питательных веществ (азот, фосфор, калий) [7, 27, 31]; отходы животноводства [32, 33] и шлам-лигнин [7, 11].

При разнообразии в выборе органической составляющей каждый из вариантов имеет ряд существенных ограничений по применению. Торф, органическая часть которого за счет кислой реакции среды устойчива к микробному разложению, может замедлять процесс минерализации органического азота и требует введения биопрепаратов, а для исключения подкисления формируемого почвенного субстрата необходима его предварительная нейтрализация. Перевод гуминовых веществ в доступные растениям водорастворимые формы осуществляют дополнительной химической или механической обработкой [29]. Использование указанных компонентов также ограничивается необходимостью предварительной подготовки – обезвоживания, что снижает их эффективность, сильной вариабельностью с точки зрения компонентного состава, а также малыми объемами добычи и дифференцированной географией месторождений [34].

Осадки сточных вод коммунально-бытового хозяйства и отходы выгребных ям требуют предварительной подготовки, характеризуются непостоянством химического состава, а также, как и шлам-лигнины [11], потенциально повышенными концентрациями тяжелых металлов (ТМ), что с учетом повышенных содержаний ТМ в НЦСО после химической деструкции ограничивает их использование для получения органоминерального мелиоранта.

Лимитирующими факторами применения навоза является жесткое требование дозировки внесения общего азота, исключающее пагубное влияние аммонийной формы, и выполнение санитарных требований. Дополнительным фактором также служит неоднородный химический состав, определяемый различиями в рационе и племенном составе [33]. Однако при указанных недостатках главным достоинством применения служат доступность, а также положительный взаимный эффект при совместном использовании с минеральными удобрениями и поддержание устойчивого уровня органического углерода [32].

После оценки положительных и отрицательных характеристик потенциальной органической составляющей комплексного ОММ был выбран отход животноводства. В качестве органического компонента использовался бесподстилочный навоз крупного рогатого скота, отобранный на одном из предприятий сельского хозяйства по ГОСТ 26712-85 и, согласно документации предприятия, соответствующий токсикологическим, ветеринарно-санитарным и гигиеническим требованиям ГОСТ 33830-2016, на основании чего указанные показатели в исследовании не определялись. Для дальнейшего получения ОММ и постановки вегетационного опыта по оценке его эффективности были определены следующие характеристики навоза: влажность – 63,1±0,8 мас.% (по ГОСТ 26713-85 в сушильном шкафу), содержание органического вещества на абсолютно сухое состояние – 34,5±0,5 мас.% (по ГОСТ 27980-88 в муфельной печи) и содержание азота в пересчете на абсолютно сухое состояние – 1,3±0,1 мас.% (на элементном анализаторе LECO CNH-628S, погрешности приняты по технической документации).

При формировании будущих составов мелиорантов учитывалось соотношение органического углерода к общему азоту (C:N), которое в значительной степени обеспечивает формирование почвенно-растительного комплекса. По разным оценкам такое соотношение варьирует от 11 до 17 для почв естественного сложения [35] при оптимуме для почвенных микроорганизмов 20±4 (при

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0



Рис.1. Схема получения комплексного органоминерального мелиоранта

среднем разбросе от 2 до 24) или не менее 20-25 – при процессах компостирования [36]. Таким образом, по проведенным расчетам минимальный порог 11:1 выполнялся при смешении утилизированных НЦСО и навоза в соотношении 1:1.

Получение комплексного ОММ проводили по схеме (рис.1), названия составов ОММ приняты из применяемого для химической деструкции НЦСО реагента и его концентрации.

Для обоснования возможности использования ГОСТ Р 54534-2011 «Ресурсосбережение. Осадки сточных вод. Требования при использовании для рекультивации нарушенных земель» для каждого из пяти полученных составов мелиорантов первоочередно устанавливался класс опасности методом биотестирования. Возможность применения данного ГОСТа обусловлена тем, что НЦСО представляют собой осадки сточных вод.

Биотестирование проводилось согласно ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04 при культивировании водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer) при кратностях разбавления водных вытяжек, использующихся при биотестировании отходов 1; 10; 100; 1000 и 10000, с использованием культиваторов КВ-05 и КВМ-05, а также фотоэлектроколориметра ИПС-03. Выбор указанных кратностей разбавления обусловлен тем, что основой мелиорантов является отход животноводства и утилизированный НЦСО. При кратности разведения, равной 1, водные вытяжки мелиоранта окрашивались. Для устранения данного мешающего фактора при измерении оптической плотности суспензии после культивирования водоросли вводилась корректировка с предварительным измерением оптической плотности пробы водной вытяжки ОММ, выдержанной в аналогичных условиях, но без внесения культуры водоросли хлорелла.

Далее проводились пробоподготовка и определение агрохимических и токсикологических показателей полученных комплексных ОММ и сравнение их с требованиями ГОСТ Р 54534-2011. Массовые доли сухого вещества и золы определены по ГОСТ 26713-85 и ГОСТ 26714-85 с использованием термогравиметрического анализатора LECO TGA 701 (погрешности приняты по метрологическим характеристикам оборудования). Химическое потребление кислорода (ХПК) определено по ПНД Ф 14.1:2:4.210-2005 на спектрофотометре Hach-Lange DR1900 фотометрическим методом для солевых вытяжек (ГОСТ 26483-85). Биохимическое потребление кислорода за 5 сут ($БПК_5$) рассчитано согласно РД-АПК 1.10.15.02-17 для бесподстилочного навоза, исходя из полученных значений ХПК.

Пробоподготовка, а также определение валовых содержаний элементов (Cr, Pb, Cd, Ni, Cu, Zn), общего фосфора, общего калия и общего азота проводились аналогично методикам, описанным при определении валового химического состава НЦСО. Определение органического вещества в пересчете на углерод осуществлено термогравиметрическим методом по ГОСТ 27980-88 с использованием анализатора LECO TGA 701.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Эффективность предлагаемых мелиорантов оценивалась в вегетационном опыте с почвенными культурами для определения минерального питания растений в строго контролируемых условиях (повторность равна двум) [37], где в качестве субстрата был выбран промытый водопроводной, а затем дистиллированной водой, высушенный при температуре 105 °С строительный песок фракцией 2,2 мм, просеянный через сито размером 2,0 мм.

В качестве растительных культур для проведения оценки эффективности мелиорантов (с учетом необходимости проведения вегетационного опыта с не менее чем двумя растительными культурами) были выбраны овес посевной (*Avena sativa*) и мятлик луговой (*Poa pratensis*). Обоснованием выбора культур служит рекомендация к использованию мятлика лугового при рекультивации нарушенных земель (по ГОСТ Р 57446-2017) в условиях преимущественного расположения горно-добывающих регионов и рассматриваемых предприятий химической промышленности в бореальной зоне. Использование овса посевного обосновано эффективностью и успешным опытом его применения при рекультивации и фиторемедиации почв. Кроме того, овес посевной относят к классическому виду растений при постановке вегетационных опытов из-за выраженного отклика на внесение агрохимикатов, значительного прироста наземной биомассы и короткого вегетационного периода [37, 38].

Потенциальное использование овса посевного на рекультивируемых объектах горного производства может расширить сырьевую базу рассматриваемых предприятий химической отрасли, что связано с развитием направления получения высококачественных промышленных нитратов целлюлозы из альтернативного целлюлозосодержащего сырья, которым выступает овес посевной [38, 39]. Такой подход позволяет получить замкнутый цикл производства нитратов целлюлозы, где утилизированные отходы основного технологического цикла выступают в роли сырья для получения мелиорантов, которые, используясь при рекультивации нарушенных земель горного производства с овсом посевным, будут снижать техногенную нагрузку, способствуя возвращению земель в хозяйственный оборот, и восполнять сырьевую базу химической промышленности.

Растительные культуры выращивались в вегетационных сосудах из непрозрачного пластика с перфорированным дном объемом 6,3 дм^3, высотой 0,2 м с площадью поверхности 0,03 м^2, что обусловлено общепринятыми классическими требованиями к вегетационному опыту [37], связанными с необходимостью нормального развития корневой и наземной части растений.

Дозы внесения мелиорантов с учетом их влажности рассчитывались для составов КОН5 и КОН10, исходя из полученных при химическом анализе данных о содержании свинца, превышающих нормы в 1,1-1,5 раз; для остальных составов – из минимальной дозы внесения относительно содержания общего азота, равного 120 кг/га. Дозы внесения мелиорантов на один вегетационный сосуд: КОН5 – 50,4; КОН10 – 58,0; КОН15 – 99,3; $H_2SO_4$30 – 51,9; $H_2SO_4$35 – 71,0 г.

Фоновые (контрольные) опыты представлены сосудами, где проводилось внесение только песка без мелиорантов – «абсолютный контроль», а также сосудами, где с песком вносился навоз крупного рогатого скота с дозировкой 120 кг/га, рассчитанной относительно содержания общего азота – «относительный контроль».

Количество вносимых семян выбрано, исходя из объемов использованных вегетационных сосудов, опыт проводился с монокультурой, когда в каждый сосуд сеяли растение только одного вида [37]. В каждый сосуд было посеяно по 50 семян *Avena sativa* с последующим сокращением на 14-е сут до 20 шт. и на 28-е сут – до 15. *Poa pratensis* сеяли в количестве 100 шт. и на 14-е сут сокращали до 50 шт. Вегетационный опыт реализован с использованием фитостеллажей NL79-03-04 LD в следующих условиях: световой период 16 ч и освещенность 13000 лк при температуре 20 °С, влажность субстратов в вегетационных сосудах 60 мас.% от полной влагоемкости используемого песка (определена по ГОСТ 12038-84), полив отстоявшейся водопроводной водой. Датой начала опыта приняты сутки, когда был зафиксирован пророст 50 % семян растений в вегетационных сосудах, что связано с общепринятым подходом к вегетационному опыту, когда фиксируется «массовый» всход растений и начинается активная фаза роста, что обеспечивает единые условия опыта для каждого растения. Выбор такой первой контрольной точки при проведении опытов с *Avena sativa* устанавливает стандартизированная методика (ГОСТ Р ИСО 22030-2009).

Продолжительность опыта для овса посевного составила 61 день, оценка прироста наземной части биомассы проведена на 14-е, 28-е и на итоговые 61-е сут (рис.2), выбор контрольных точек

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

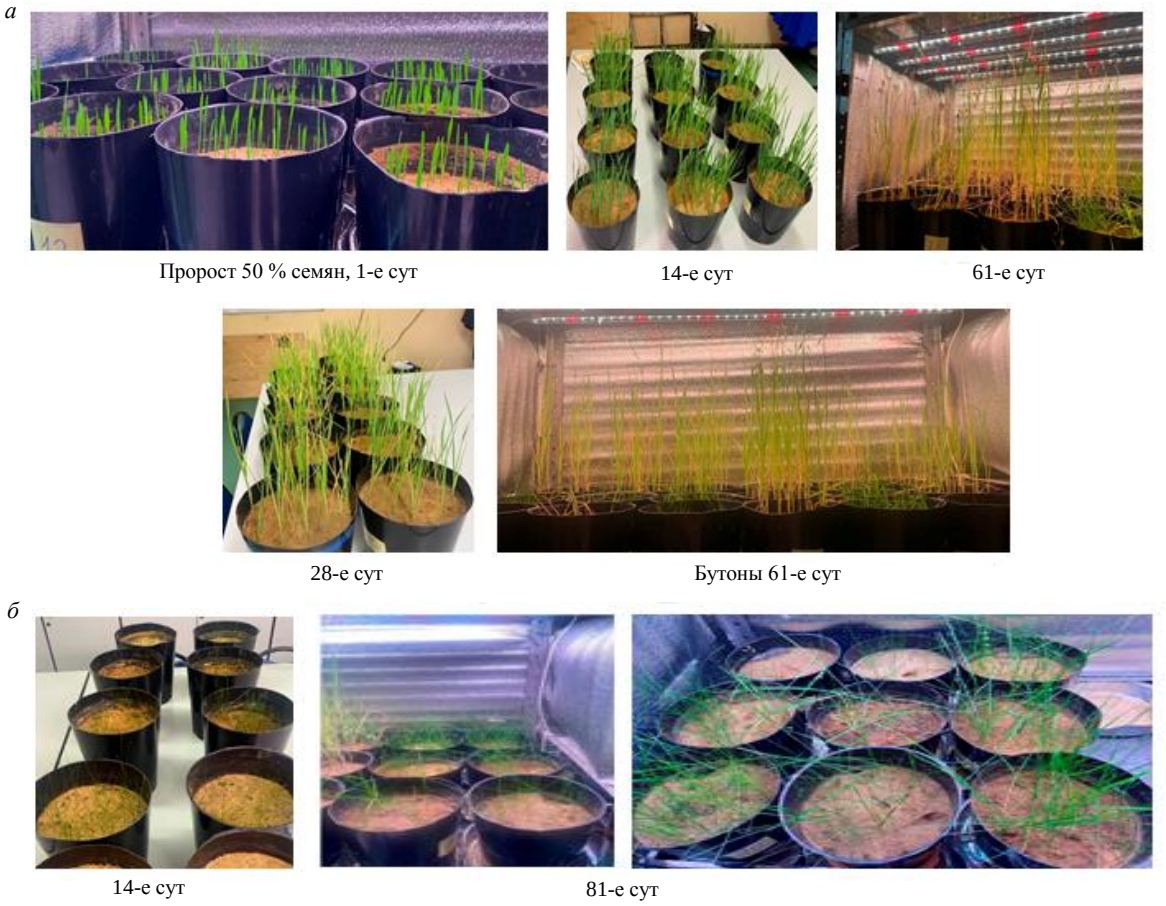


Рис.2. Этапы вегетационного опыта с овсом посевным (*Avena sativa*) (*а*) и мятликом луговым (*Poa pratensis*) (*б*)

принят по аналогии с ГОСТ Р ИСО 22030-2009. Для мятлика лугового продолжительность опыта составила 81 день, ввиду малой массы прироста наземной части оценка производилась только на 14-е и итоговые 81-е сут (рис.2), выбранные по фазам вегетации растения.

Прирост наземной части оценивался путем среза растений на уровне 2 см от верхнего бокового корня с последующей сушкой при температуре 60-70 °С до воздушно-сухого состояния и далее при температуре 105 °С до абсолютно сухого состояния, после чего определялась масса наземной части, дополнительно определялась всхожесть семян аналогично ГОСТ 12038-84.

По завершении вегетационного опыта после отмывки корней вегетационных сосудов классическим методом Саввинова проведена оценка прироста корневой части растений путем определения массы и объема корней, расчета насыщенности корнями (отношение объема корней сосуда к его общему объему) каждого из вегетационных сосудов классическими методами [40-42].

Дополнительно проведена оценка содержания питательных элементов (общего калия, общего фосфора, магния и кальция) и возможного биоконцентрирования тяжелых металлов и мышьяка для валовых форм (As, Co, Cr, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) в наземной части биомассы. Растительность вегетационных сосудов предварительно высушивалась при температуре 60-70 °С в сушильном шкафу LOIP LF-60/350-VS-2, а затем измельчалась в шаровой мельнице с мелющими телами из карбида вольфрама. Далее определена влажность высушенных образцов для последующего пересчета концентраций на абсолютно сухое состояние. Минерализация пробы проводилась с использованием системы микроволнового разложения Multiwave 3000 по программе разложения растительных образцов, анализ – с использованием атомно-эмиссионного спектрометра Shimadzu ICPE-9000 и атомно-абсорбционного спектрометра Shimadzu AA-7000 по М-МВИ 80-2008.

Обсуждение результатов

На основании полученных токсичных кратностей разбавления (ТКР) водных вытяжек мелиорантов (КОН5 – 3, КОН10 – 3, КОН15 – 4, $H_2SO_4$30 – 3, $H_2SO_4$35 – 3), согласно приказу Минприроды России от 31.03.2025 г., № 158 для каждого из полученных составов установлен IV класс опасности для окружающей среды, что полностью удовлетворяет требованиям ГОСТ Р 54534-2011.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Агрохимические и токсикологические показатели полученных комплексных ОММ, определенные в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54534-2011, представлены в табл.2, дополнительные положительные агрохимические характеристики – в табл.3, бактериологические показатели не определялись в соответствии с документами на навоз.

Таблица 2

Характеристики полученных комплексных ОММ в сравнении с ГОСТ Р 54534-2011

ГОСТ Р 54534-2011			KOH5	KOH10	KOH15	$H_2SO_4$30	$H_2SO_4$35
Показатель	Технический этап	Биологический этап					
Сухое вещество, %	45,0	< 35,0	28,8±0,7	27,9±0,7	25,8±0,7	34,4±0,7	29,3±0,7
Доля золы, %	65,0	< 65,0-85,0	40,1±0,7	46,1±0,7	55,3±0,7	58,3±0,7	59,3±0,7
Общий азот, %	–	< 0,5	2,6±0,1	2,3±0,1	1,5±0,1	2,9±0,1	2,8±0,1
Общий фосфор, %	–	< 1,5	1,3±0,4	2,2±0,6	5,5±1,6	1,5±0,5	1,5±0,5
pH солевой вытяжки	5,0-8,5		7,5±0,1	7,7±0,1	8,3±0,1	7,4±0,1	7,1±0,1
Ртуть, мг/кг	> 30,0	> 15,0	<0,02				
Хром, мг/кг	> 2000,0	> 1000,0	45,3±13,6	43,9±13,2	35,4±10,6	20,8±6,2	17,4±5,2
Свинец, мг/кг	> 1000,0	> 500,0	698,6±209,6	579,1±173,7	466,4±139,9	231,8±69,5	185,8±55,7
Кадмий, мг/кг	> 60,0	> 30,0	0,4±0,1	0,3±0,1	0,2±0,1	2,9±0,9	2,8±0,9
Никель, мг/кг	> 800,0	> 400,0	22,1±6,6	18,7±5,6	15,7±4,7	9,9±2,9	9,1±2,7
Медь, мг/кг	> 1500,0	> 750,0	213,8±64,2	175,7±52,7	141,8±42,5	75,6±22,8	69,6±20,9
Цинк, мг/кг	> 7000,0	> 3500,0	181,4±54,4	151,3±45,4	132,4±39,7	100,7±30,2	102,9±30,9
Мышьяк, мг/кг	> 40,0	> 20,0	1,3±0,4	1,3±0,4	1,4±0,4	6,9±2,1	5,00±1,5
ХПК, мг/дм^3	> 700,0	> 700,0	429±86	387±77	323±65	295±59	302±60
БПК$_5$, мг O_2/дм^3	> 500,0	> 500,0	51±10	46±9	39±8	35±7	36±7

Примечание. Зеленый цвет – соответствие требованиям, желтый – в пределах погрешности измерений, розовый – несоответствие требованиям.

Таблица 3

Агрохимические характеристики полученных комплексных ОММ

Агрохимические показатели	KOH5	KOH10	KOH15	$H_2SO_4$30	$H_2SO_4$35
Содержание K, %	7,4±2,2	12,1±3,6	15,9±4,8	14,3±4,3	13,7±4,1
Содержание органического углерода, %	29,9±0,7	26,9±0,7	22,4±0,7	20,4±0,7	20,8±0,7
Соотношение C:N	11,5	11,7	14,9	13,9	13,6
Содержание Ca, %	4,2±1,3	3,4±1,0	3,1±0,9	2,7±0,8	2,6±0,8

Сравнивая химический состав комплексных ОММ с требованиями ГОСТ Р 54534-2011 для рекультивации, можно сделать вывод (см. табл.2), что полученные составы полностью удовлетворяют требованиям ГОСТа, за исключением массовой доли сухого вещества и золы, что может быть скорректировано внесением инертного материала. Повышенное содержание свинца для составов KOH5 и KOH10 также может быть снижено за счет внесения инертного материала. Необходимо дополнительное определение бактериологических показателей вне зависимости от документации на использованный для получения ООМ навоз.

Определенные агрохимические показатели (табл.3), требования к которым не предъявляются ГОСТ Р 54534-2011, имеют положительные характеристики составов комплексных ОММ, так как содержат дополнительно важные элементы питания растений – калий и кальций.

Рассчитанные из анализа химического состава мелиорантов соотношения органического углерода к общему азоту (C:N) находятся выше оптимального диапазона (не менее 11:1), а среднее оптимальное для почвенных микроорганизмов значение 20±4 может быть достигнуто после первого сезона вегетации за счет формирования опада травянистых растений и дополнительного поступления органического углерода, что подтверждается исследованием [35].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

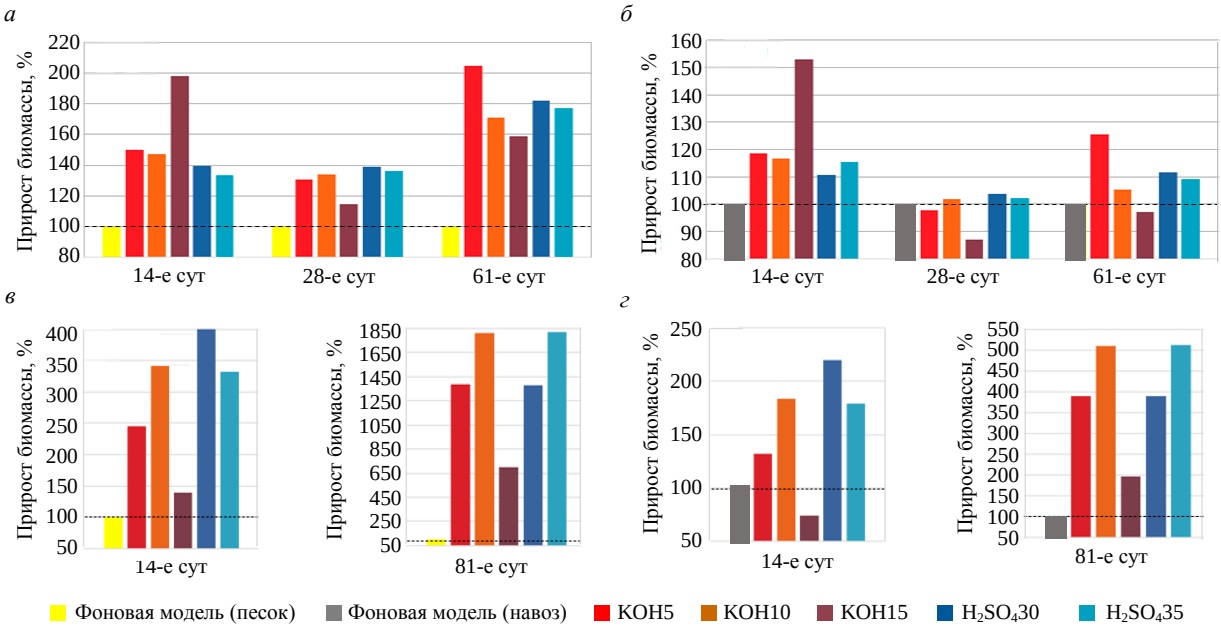


Рис.3. Прирост наземной биомассы овса посевного (*Avena sativa*) и мятлика лугового (*Poa pratensis*) над фоновой моделью с песком (*а*, *в*), с навозом (*б*, *г*)

Результаты проведенного вегетационного опыта по оценке прироста наземной части растений на абсолютно сухое состояние в сравнении с фоновыми моделями почвенно-растительных комплексов показаны на рис.3.

Таким образом, можно сделать вывод о выраженном положительном эффекте по отношению к «абсолютному контролю» на конец опыта: итоговый относительный прирост биомассы овса посевного составил 58,8-104,9 %, мятлика лугового – 245,5-1721,8 %. Для «относительного контроля» положительным эффектом характеризуются все рассматриваемые составы, за исключением KOH15. Прирост биомассы составил 5,2-11,6 % для овса и 290,9-413,8 % для мятлика.

На 14-е сутки от начала эксперимента ОММ KOH15 показывал наиболее высокие результаты, что связано с избытком поступления калия в начальный период вегетации, однако в дальнейшем калий начал оказывать токсическое воздействие на растения. Это подтверждается проведенным анализом наземной биомассы обеих растительных культур на содержание калия, фосфора, кальция и магния, по данным которого в биомассе растений после внесения состава KOH15 наблюдалась избыточная аккумуляция калия при резком падении содержания кальция и магния, что указывает на токсический эффект. Такой результат говорит о необходимости повторения эксперимента состава KOH15 с условием корректировки дозы внесения по указанному показателю, а не по общему азоту. Наибольшим положительным эффектом прироста наземной биомассы характеризуется мятлик луговой, что обуславливает его предпочтительное использование при рекультивации нарушенных земель с использованием полученных ОММ как в составе монокультуры, так и травосмесей.

Оценка числа всходов и общей всхожести (табл.4) показывает отсутствие острой фитотоксичности, а показатель средней всхожести для каждого варианта опыта с обеими растительными культурами может говорить о незначительном, но положительном эффекте, превышающем всхожесть растений в фоновых моделях.

Результаты оценки прироста корневой части растений (рис.4, табл.5) показывают выраженный позитивный эффект от внесения мелиорантов в каждый из вегетационных сосудов, за исключением варианта KOH15 (рис.4) для мятлика лугового, что аналогично связано с избыточным содержанием общего калия в ОММ и необходимостью корректировки дозы внесения для KOH15, исходя из содержания элемента питания. Прирост корневой части овса для фоновой модели с песком составил 96,1-207,9 %, а для мятлика лугового 42,3-599,5 %. Прирост относительно фоновой модели с навозом составил 1-58,6 и 32,9-444,6 % для овса и мятлика соответственно. Для обоих видов растений внесение ОММ KOH5 и KOH10 показывает более низкую эффективность в сравнении с использованием $H_2SO_4$30 и $H_2SO_4$35. При этом можно выявить более выраженный положительный

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

эффект прироста корневой части от применения ОММ для мятлика лугового. В совокупности прироста наземной и корневой частей растений предпочтение должно быть отдано ОММ КОН5 либо $H_2SO_4$30 и $H_2SO_4$35.

Таблица 4

Результаты оценки всхожести семян в вегетационном опыте

Вегетационный сосуд	*Avena sativa*			*Poa pratensis*		
	Число всходов	Всхожесть, %	Средняя всхожесть, %	Число всходов	Всхожесть, %	Средняя всхожесть, %
Фоновая модель (песок)	40 45	80 90	85±10	59 48	59 48	54±14*
Фоновая модель (навоз)	43 45	86 90	88±9	61 53	61 53	57±14
КОН5	46 46	92 92	92±8	56 62	56 62	59±14
КОН10	48 46	96 92	94±7	58 64	58 64	61±14
КОН15	40 45	80 90	85±10	63 51	63 51	57±14
$H_2SO_4$30	47 46	94 92	93±7	60 57	60 57	59±14
$H_2SO_4$35	46 45	92 90	91±8	59 55	59 55	57±14

* Принята по ГОСТ 12038-84, вегетационные сосуды делились на две равные части и выборка составила 4×50 семян при посадке 100 шт. на сосуд.

Определение объема и насыщенности корневой части вегетационных сосудов в дополнение к определению прироста массы корневой части позволяет оценить уровни доступности к корням питательных веществ и их развития в формируемом почвенно-растительном комплексе. Результаты вегетационного опыта (табл.5) позволили сделать вывод о положительной динамике обоих контрольных вариантов. Отрицательные результаты для мятлика лугового при применении КОН15 закономерны, но также требуют повторного опыта.

Оценка биоконцентрирования тяжелых металлов и мышьяка в наземной фитомассе при сравнении установленных валовых содержаний с ПДК(ОДК) почв, принятых для песчаных субстратов, и региональных фоновых содержаний, принятых аналогично [18], показала отсутствие аккумуляции токсичных элементов для всех вариантов опыта. Положительный результат был получен и для вариантов опыта с ОММ КОН5 и КОН10, где были выявлены повышенные содержания свинца. При внесении доз ОММ по содержаниям общего азота можно сделать вывод об их экологической безопасности.

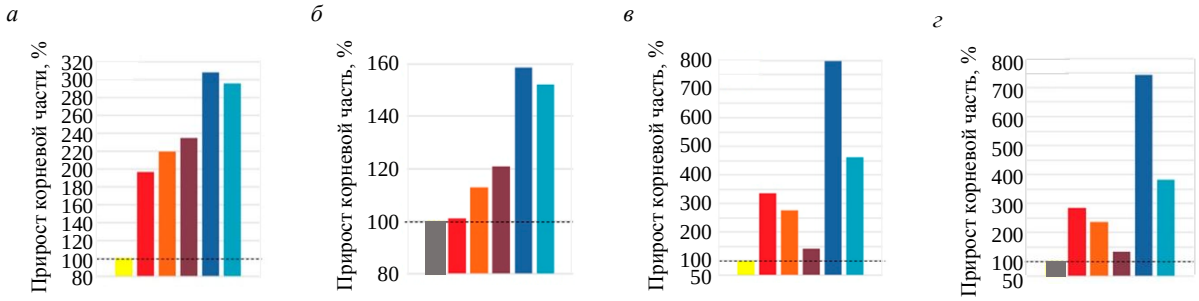


Рис.4. Прирост корневой части овса посевного (*Avena sativa*) и мятлика лугового (*Poa pratensis*) над фоновой моделью с песком (*а*, *в*), с навозом (*б*, *г*)
Условные обозначения см. на рис.3

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 5

Оцениваемые параметры корневой части растений для каждого варианта

Вариант опыта	*Avena sativa*		*Poa pratensis*	
	Объем корней, $см^3$	Насыщенность корнями, %	Объем корней, $см^3$	Насыщенность корнями, %
Абсолютный контроль	12,0	0,21	6,0	0,11
Относительный контроль	17,5	0,31	7,0	0,12
KOH5	18,5	0,33	11,5	0,21
KOH10	21,5	0,38	9,5	0,17
KOH15	22,0	0,38	3,5	0,06
$H_2SO_4$30	26,0	0,46	17,0	0,30
$H_2SO_4$35	24,0	0,43	13,0	0,23

С учетом положительных результатов экспериментов произведены эколого-экономическая оценка предлагаемого способ утилизации НЦСО с получением комплексных ОММ в пересчете на 1 т утилизируемых отходов, а также расчет по данным предприятия химической промышленности, где аккумулированы 3300 т НЦСО. Экономические расчеты для состава ОММ KOH15 не проводились.

Расчет основывался на затратах при утилизации НЦСО, снижении плат за негативное воздействие от сжигания с последующим захоронением золы на объектах размещения отходов при использовании в собственных нуждах предприятия и при реализации готового товарного продукта.

Общая технологическая схема утилизации представляет собой последовательность следующих операций:

• приготовление раствора-деструктора в вертикальном смесителе объемом 2,5 $м^3$;

• подача усредненных партий НЦСО при помощи шнекового наклонного питателя в вертикальный смеситель объемом 3,0 $м^3$;

• подача раствора-деструктора в вертикальный смеситель с загруженным НЦСО и его деструкция на протяжении 30-60 мин (в зависимости от выбранного реагента);

• нейтрализация реакционной массы в вертикальном смесителе (деструкция и нейтрализация проводятся в одном аппарате);

• подача нейтрализованной реакционной массы в смеситель почвогрунтов;

• загрузка в смеситель почвогрунтов навоза для гомогенизации в соотношении 1:1 (в пересчете на абсолютно сухое состояние) относительно массы подаваемых на утилизацию НЦСО;

• разгрузка комплексного ОММ на площадку хранения для сушки в естественных условиях.

Выход товарного продукта с учетом естественной влажности готового субстрата составляет 10 т при утилизации 1 т НЦСО. Размер партии НЦСО, подаваемых на утилизацию, равен 500 кг, что связано с максимальными размерами готовых смесителей почвогрунтов, представленных на отечественном рынке, без дополнительных затрат на проектирование и изготовление. Ориентировочная стоимость капитальных вложений на оборудование, составила 2,5 млн руб. Эксплуатационные расходы, связанные с материальными затратами (электроэнергия, затраты на реагенты и навоз), оплату труда, страховые взносы, амортизационные и прочие составили 230,0-265,8 тыс. руб. на 1 т НЦСО в зависимости от выбранного реагента. Таким образом, с учетом получения 10 т ОММ при утилизации 1 т НЦСО и наценкой 10 % предполагаемая цена комплексного ОММ составила 25300-29200 руб. в зависимости от выбранного реагента.

Расчет платы произведен на основании законодательного запрещения сжигания на открытых площадках с повышающим коэффициентом 100 (в настоящее время рассматриваемые предприятия, где образуются НЦСО, отнесены к I категории НВОС), исходя из количественного состава выбросов, образующихся при сжигании НЦСО. При сжигании 1 т НЦСО плата составит 6238 руб., для одного из предприятий отрасли, где накоплено 3300 т НЦСО, – 20,6 млн руб. С учетом образования 93,2 кг золы при сжигании 1 т НЦСО плата за размещение в пределах лимитов согласно постановлению Правительства РФ от 31.05.2023 «Об утверждении Правил исчисления и взимания

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

платы за негативное воздействие на окружающую среду» составит 2654 руб. и 816626 руб. соответственно. Размер вреда атмосферному воздуху, рассчитанный на основании Приказа Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 28 января 2021 г. № 59 «Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного атмосферному воздуху как компоненту природной среды», составил 21813 руб. при сжигании 1 т НЦСО и 72 млн руб. за 3300 т.

Расчет инвестиционной привлекательности на примере предприятия отрасли (с массой 3300 т на утилизацию) показал окупаемость предлагаемой технологии в течение первого года даже без учета реализации товарного продукта. Для окупаемости капиталовложений требуется утилизировать не менее 59 т НЦСО. Исходя из мощности выбранного оборудования, равной 9 т НЦСО к утилизации в сутки, 3300 т возможно утилизировать за один календарный год с учетом существующего режима работы предприятия.

Заключение

Результаты проведенного исследования показали высокий потенциал использования комплексных органоминеральных мелиорантов, полученных после химической деструкции отходов, содержащих нитраты целлюлозы, и смешения их с навозом в массовом соотношении 1:1. Полученные комплексные ОММ полностью соответствуют агрохимическим и токсикологическим требованиям ГОСТ Р 54534-2011, за исключением показателей содержания сухого вещества и золы, это может быть скорректировано внесением инертного материала. Кроме того, ОММ дополнительно содержат калий и кальций.

По результатам вегетационного опыта на овсе посевном (*Avena sativa*) и мятлике луговом (*Poa pratensis*) можно сделать вывод, что разработанные ОММ обладают высоким потенциалом использования в ходе проведения биологического этапа рекультивационных работ. Это подтверждает и использование в опыте наиболее востребованных при рекультивации и оценке потенциала агрохимикатов растительных культур. Все рассмотренные составы, кроме КОН15, имели выраженный эффект прироста наземной и подземной части биомассы в сравнении с двумя фоновыми моделями (с песком и навозом). Отдельно можно отметить, что лучшие результаты показаны комплексными ОММ: КОН5, $H_2SO_4$30 и $H_2SO_4$35. Выявлено отсутствие фитотоксичности на протяжении вегетационного опыта для всех составов (кроме ОММ КОН15), что требует проведения тестов на фитотоксичность.

Эколого-экономическая оценка позволяет говорить об экологической и экономической целесообразности предлагаемого способа утилизации, что подкрепляется положительным экологическим эффектом, который исключает воздействие на атмосферный воздух и снижает техногенную опасность от НЦСО. Подтверждена рассматриваемая в предыдущих работах возможность взаимодействия химической и горно-добывающей отраслей экономики, где отходы химического производства служат сырьем для получения мелиорантов, используемых при рекультивации объектов горного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Xinyu Chang, Yibo Wang, Zhongyang Zhang et al.* Integrated remediation and ecological rehabilitation of mine tailings, mining-impacted soils and acid mine drainage: technology and decision frameworks // Minerals Engineering. 2026. Vol. 244. № 110275. DOI: 10.1016/j.mineng.2026.110275

2. *Чукаева М.А., Петров Д.С., Малыгин Н.А.* Использование белокрыльника болотного в условиях Севера для фиторемедиации промышленных сточных вод от металлов на примере АО «Карельский окатыш» // Арктика: экология и экономика. 2025. Т. 15. № 3. С. 116-126. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-3-116-126

3. *Чмыхалова С.В., Гришин В.Ю., Пыталев И.А.* Проблемы угледобывающей отрасли, жизненный цикл предприятий по добыче угля и последующая рекультивация нарушенных земель // Уголь. 2023. № 1. С. 70-75. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-1-70-75

4. *Быкова М.В., Малюхин Д.М.* Оценка потенциала техногенных почвогрунтов на основе осадка сточных вод для рекультивации нарушенных земель горнодобывающей промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 9. С. 36-52. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_9_0_36

5. *Nainiva S.P., Jajarm S.S., Mohammadrezaei M., Parichehreh M.* Soil erosion risk prediction: an assessment of qualitative and quantitative modeling approaches // Journal of Sedimentary Environments. 2025. Vol. 10. Iss. 2. P. 261-280. DOI: 10.1007/s43217-025-00228-7

6. *Meyfroidt P.* Emerging agricultural expansion in northern regions: Insights from land-use research // One Earth. 2021. Vol. 4. Iss. 12. P. 1661-1664. DOI: 10.1016/j.oneear.2021.11.019

7. *Иванова Л.А., Слуковская М.В., Красавцева Е.А.* Оценка эффективности использования осадка сточных вод для рекультивации нарушенных территорий в Кольской субарктике (на примере песчаного карьера) // Записки Горного института. 2024. Т. 267. С. 444-452.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

8. *Осинцева М.А., Дюкова Е.А., Бурова Н.В., Осинцев А.М.* Влияние особенностей рельефа и эрозионных процессов на эффективность биологической рекультивации техногенно нарушенных земель угледобывающих предприятий // Уголь. 2024. № 7. С. 100-105. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-7-100-105

9. *Семячков А.И., Почечун В.А., Семячков К.А.* Гидрогеоэкологические условия техногенных подземных вод в объектах размещения отходов // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 168-179. DOI: 10.31897/PMI.2023.24

10. *Пашкевич М.А., Матвеева В.А., Евдокимова М.Е.* Использование титанового шлама для получения коагулянта // Обогащение руд. 2026. № 1. С. 50-56. DOI: 10.17580/or.2026.01.08

11. *Рудзиш 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

12. *Матвеева В.А., Лукьянова А.В.* Оценка эффективности использования флюсового известняка Сокольско-Ситовского месторождения в качестве мелиоранта для нейтрализации кислых почв // Геология и геофизика Юга России. 2023. Т. 13. № 3. С. 153-166. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.57.012

13. *Осокин Н.А., Золотова И.Ю., Никитушкина Ю.В.* Рекультивация нарушенных земель с применением промышленных отходов: оценка потенциала для российских регионов на примере золошлаков ТЭС // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26. № 6. С. 46-52. DOI: 10.18412/1816-0395-2022-6-46-52

14. *Калинина Е.В., Рудакова Л.В.* Снижение токсичных свойств шламов содового производства с последующей их утилизацией // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 6. С. 85-96.

15. *Водолеев А.С., Андреева О.С., Захарова М.А., Таргаева Е.Е.* Реабилитация техногенно-нарушенных территорий агломерационного производства // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 8 (1424). С. 92-99.

16. *Красавцева Е.А., Горбачева Т.Т., Иванова Л.А., Максимова В.В.* Коммунальные стоки в опытах по рекультивации отходов обогащения лопаритовых руд // Вода и экология: проблемы и решения. 2021. № 3 (87). С. 44-55. DOI: 10.23968/2305-3488.2021.26.3.44-55

17. *Митракова Н.В., Хайрулина Е.А., Блинов С.М., Перевощикова А.А.* Эффективность рекультивации кислых сульфатных почв в районах угледобычи // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 266-278. DOI: 10.31897/PMI.2023.31

18. *Пашкевич М.А., Патокин Д.А., Данилов А.С.* Утилизация нитроцеллюлозосодержащих отходов химической промышленности с получением минеральных почвенных добавок // Экология и промышленность России. 2024. Т. 28. № 6. С. 10-17. DOI: 10.18412/1816-0395-2024-6-10-17

19. *Романова С.М., Мадякина А.М.* Утилизация промышленных отходов предприятий по производству энергонасыщенных материалов химическим методом // Экологическая химия. 2022. Т. 31. № 3. С. 158-166.

20. *Juan Huang, Alei Zhang, Huihui Xue et al. Chaetomium elatum* treatment of nitrocellulose: investigation on structural and thermal properties // Cellulose. 2024. Vol. 31. Iss. 2. P. 1159-1173. DOI: 10.1007/s10570-023-05700-z

21. *Gaydamaka S., Gladchenko M., Maslova O. et al.* Application of the Hybrid Chemical-Biocatalytic Approach for Conversion of Nitrocellulose-Containing Sewage Sludge // Processes. 2023. Vol. 11. Iss. 7. № 2017. DOI: 10.3390/pr11072017

22. *Bhanot P., Celin S.M., Sreekrishnan T.R. et al.* Application of integrated treatment strategies for explosive industry wastewater – A critical review // Journal of Water Process Engineering. 2020. Vol. 35. № 101232. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101232

23. *Jin Li, Xiaohu Yin, Zongkuan Liu et al.* Reaction yield model of nitrocellulose alkaline hydrolysis // Journal of Hazardous Materials. 2019. Vol. 371. P. 603-608. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.03.044

24. *Jiping Liu.* Nitrocellulose // Nitrate Esters Chemistry and Technology. Springer, 2019. P. 469-580. DOI: 10.1007/978-981-13-6647-5_10

25. *Alinat E., Delaunay N., Archer X. et al.* A new method for the determination of the nitrogen content of nitrocellulose based on the molar ratio of nitrite-to-nitrate ions released after alkaline hydrolysis // Journal of Hazardous Materials. 2015. Vol. 286. P. 92-99. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.12.032

26. *Петрова Т.А., Епишина А.Д.* Оценка негативного воздействия рассолов калийных производств на почвенный покров путем моделирования процесса их разлива в естественных условиях // Устойчивое развитие горных территорий. 2025. Т. 17. № 2. С. 616-626. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-2-616-626

27. *Carabassa V., Ortiz O., Alcañiz J.M.* Sewage sludge as an organic amendment for quarry restoration: Effects on soil and vegetation // Land Degradation & Development. 2018. Vol. 29. Iss. 8. P. 2568-2574. DOI: 10.1002/ldr.3071

28. *Пендюрин Е.А., Святченко А.В., Кирюшина Н.Ю.* Способ восстановления нарушенных территорий // Вектор ГеоНаук. 2022. Т. 5. № 1. С. 83-89. DOI: 10.24412/2619-0761-2022-1-83-89

29. *Котова З.П., Данилова Т.А., Парфенова Н.В.* Фитодиагностика нового биоорганического удобрения на основе торфа // Агрохимический вестник. 2023. № 3. С. 74-79. DOI: 10.24412/1029-2551-2023-3-016

30. *Малышев П.А.* Применение смесей из торфа и сапропеля в животноводстве и растениеводстве // Аграрный научный журнал. 2024. № 5. С. 105-111. DOI: 10.28983/asj.y2024i5pp105-111

31. *Брындина Л.В., Момот Р.В., Корчагин А.Ю., Живитченко Д.И.* Использование осадков сточных вод в качестве компонента органического удобрения // Проблемы региональной экологии. 2025. № 1. С. 5-10. DOI: 10.24412/1728-323X-2025-1-5-10

32. *Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Зинякова Н.Б., Соколов Д.А.* Размеры и соотношения пулов органического углерода в серой лесной почве при многолетнем применении минеральных и органических удобрений // Почвоведение. 2023. № 4. С. 482-501. DOI: 10.31857/S0032180X22601426

33. *Сычев В.Г., Мерзлая Г.Е., Афанасьев Р.А. и др.* Эффективность внутрипочвенного внесения органических удобрений // Плодородие. 2021. № 4 (121). С. 33-36. DOI: 10.25680/S19948603.2021.121.10

34. *Дашко Р.Э., Власов Д.Ю., Пушина З.В. и др.* Многокомпонентный состав сапропелей как основа для совершенствования техники и технологии их дегидратации // Russian Journal of Earth Sciences. 2023. Т. 23. № 2. № ES2002. DOI: 10.2205/2023ES000840

35. *Квиткина А.К., Ларионова А.А., Дударева Д.М., Быховец С.С.* Влияние соотношения C:N на разложение фитомассы кукурузы при изменении содержания эндогенного и экзогенного азота // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 2. С. 78-83.

36. *Семенов В.М.* Функции углерода в минерализационно-иммобилизационном обороте азота в почве // Агрохимия. 2020. № 6. С. 78-96. DOI: 10.31857/S0002188120060101

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

37. *Журбицкий З.И.* Теория и практика вегетационного метода. М.: Наука, 1968. 260 с.
38. *Бортникова С.Б., Артамонова В.С., Абросимова Н.А. и др.* Результаты экспериментов по фиторемедиации сульфидных отходов хвостохранилищ овсом посевным (*Avena sativa*) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 11. С. 7-23. DOI: 10.18799/24131830/2022/11/3762
39. *Сакович Г.В., Будаева В.В., Корчагина А.А. Гисматулина Ю.А.* Перспективы нитратов целлюлозы из нетрадиционного сырья для взрывчатых составов // Химия растительного сырья. 2019. № 1. С. 259-268. DOI: 10.14258/jcprm.2019014336
40. *Капустянчик С.Ю., Будаева В.В., Гисматулина Ю.А.* Биологические особенности культуры *Miscanthus sacchariflorus* (Poaceae) в условиях Новосибирской области // Растительные ресурсы. 2021. Т. 57. Вып. 1. С. 49-57. DOI: 10.31857/S0033994621010064
41. *Qihong Yang, Chaobo Zhang, Shiming Yao, Jiang J.* Root Distribution and Root Cohesion of Two Herbaceous Plants in the Loess Plateau of China // Sustainability. 2022. Vol. 14. Iss. 13. № 8053. DOI: 10.3390/su14138053
42. *Endalamaw B., Dawud S.M., Gobezie T.* Planting density regulates root biomass and soil organic carbon stocks in Acacia mearnsii plantations // Soil Advances. 2026. Vol. 5. № 100125. DOI: 10.1016/j.soilad.2026.100125

***Авторы*: Дмитрий Александрович Патокин,** *канд. техн. наук, ассистент* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *Patokin_DA@pers.spmi.ru, https://orcid.org/0009-0003-8098-4344*, **Александр Сергеевич Данилов,** *канд. техн. наук, доцент* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0003-2108-2781*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0