

УДК 622.882

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕТРАДИЦИОННЫХ МЕЛИОРАНТОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА РЕКУЛЬТИВИРУЕМЫХ ТЕРРИТОРИЯХ



Э. Р. РУДЗИШ,

ассистент кафедры геоэкологии, канд. техн. наук,
Rudzish_E@pers.spmi.ru



Т. А. ПЕТРОВА,

доцент кафедры геоэкологии, канд. техн. наук

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Введение

Разработка месторождений твердых полезных ископаемых сопровождается разрушением почвенного профиля и уничтожением растительного покрова – формированием техногенно нарушенных земель [1]. В совокупности размеры техногенно нарушенных земель в Российской Федерации к 2020 г. составили более 1,1 млн га, из них 445,7 тыс. га образовано вследствие деятельности объектов по добыче полезных ископаемых. В процессе горных работ ежегодно на поверхность Земли перемещают более 100 млрд т горной массы [2], из которых 2 млрд т извлекают на территории России [3, 4]. Объемы накопленных горнопромышленных отходов составляют более 80 млрд т, под складирование которых из хозяйственного оборота выведено 300–500 тыс. га земель [3–5].

Таким образом, нарушение земель и деградация почвенно-растительного слоя наблюдается на объектах разработки месторождений, а также на объектах складирования горнопромышленных отходов. Такие земельные территории характеризуются грубым механическим составом оголенных пород [6], деградированным и (или) полностью снятым почвенно-растительным слоем, дефицитом органического вещества и питательных элементов (в основном фосфора и азота), низкими значениями pH и неблагоприятным воздушным и водным режимом; кроме того, с множественными нарушениями и загрязнениями [7, 8], основными из которых являются эродирование, дегумификация, уплотнение,

Приведены результаты исследования эффективности применения в качестве мелиоранта осадка сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности для формирования растительного покрова на рекультивируемых территориях, нарушенных горными работами. Выполнена оценка состава осадка, потенциального пролонгированного эффекта действия мелиоранта, влияния на ранний рост и развитие растений. Установлено, что применение рациональных доз внесения осадка не оказывает фитотоксичного воздействия на формируемый растительный покров, а внесение небольших доз осадка стимулирует рост и развитие ростков и корней тестируемых растений.

Ключевые слова: осадок сточных вод, органическое вещество, органический углерод, всхожесть семян, нарушенные земли, рекультивация

DOI: 10.17580/gzh.2023.09.11

захламление, подтопление, заболачивание, засоление, а также химическое загрязнение [9, 10].

При низкой техногенной нагрузке и благоприятных природно-климатических условиях скорость нормального восстановления почвенно-растительного слоя составляет 10–20 лет [11–13]. Процесс и скорость восстановления нарушенной среды определяют ее компоненты, их состояние, качество и функционирование [12]. Однако созданные стрессовые условия нарушенных земель горной промышленности препятствуют естественному восстановлению почвенно-растительного слоя. В связи с чем для ускорения восстановления среды необходимы мероприятия по рекультивации [8, 14], способствующие эволюционному развитию устойчивого почвенно-растительного слоя [13] и возобновлению его основных функций [15–17], что обеспечит поддержание и развитие экосистемы и ее естественной структуры.

Эволюционное развитие почвы (техноземов) и растительного покрова происходит синергично [18] и в большей степени определяется биогенной аккумуляцией органического вещества [12, 19]. В естественных условиях функционирования экосистемы биологическая аккумуляция органического вещества происходит от растительных остатков, некромассы фауны, продуктов жизнедеятельности червей, грибов, бактерий и в результате иных процессов [20]. Однако особый вклад в накопление органического вещества вносит растительность. Тип растительности определяет ход почвообразования, особенности гумусообразования и состав почвенной биоты [21, 22].

Таким образом, процессы биогенной аккумуляции и трансформации органического вещества происходят преимущественно за счет отмирания фитомассы с образованием гумуса и питательной среды для растений, обеспечивая самопроизводство биотического компонента [21]. В условиях нарушенных земель для формирования первичной экосистемы необходимы почвенный слой, богатый органическим веществом, и устойчивый растительный покров, которые в комплексе замыкают биологический оборот органического вещества.

В связи с чем недостаток органического вещества на землях, нарушенных деятельностью горной промышленности, рекомендуется восполнять органическими удобрениями, мелиорантами или почвенными добавками. Нормализация баланса минеральной и органической составляющих почвы впоследствии улучшит структуру техноземов [23–25], оптимизирует почвенные режимы [26, 27] и обеспечит биоту (растения и почвенные организмы) питательными веществами [28–30], что в совокупности улучшит экологические условия среды. Кроме того, органические мелиоранты являются одними из наиболее эффективных методов воспроизведения биологической продуктивности [31].

Среди всех органических почвенных добавок одним из актуальных направлений развития исследований является применение нетрадиционных органических мелиорантов, т. е. мелиорантов из отходов производства и потребления. Острая проблема сохранения ресурсов, отчуждения земель под складирование отходов, повышение платы за негативное воздействие обуславливают необходимость поиска новых решений по вторичному применению этих отходов как вторичных материальных ресурсов в энергетике [32, 33], строительстве [34], рекультивации, горной промышленности [35] и др.

Применение отходов в качестве нетрадиционных мелиорантов является одним из рациональных экологических методов их утилизации [34, 36]; экономическая эффективность заключается в их низкой стоимости. Кроме того, некоторые из этих мелиорантов по питательным свойствам и эффективности воздействия не уступают традиционным [37–39].

При выборе мелиорационного вещества для рекультивации техногенно нарушенных территорий важную роль играет свойство пролонгированного эффекта. Оно обеспечивает восстанавливаемые земли питательными элементами без необходимости повторного внесения мелиоранта, сохраняя сырьевые и финансовые ресурсы предприятий. Свойством высокого пролонгированного эффекта обладают нетрадиционные мелиоранты на основе осадков сточных вод [40–43], магниевые мелиоранты – отходы горной промышленности и комплексные мелиоранты на основе фосфогипса, глауконитов, кремнеземов или глиноземов [39, 44, 45].

Отдельное актуальное направление развивается в области оценки применимости осадков сточных вод промышленного происхождения, в частности осадков сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБК), что связано

со значительными объемами используемой воды и существенным количеством образующихся осадков. Осадки сточных вод ЦБК обладают рядом преимуществ в сравнении с осадками городских сточных вод: осадок состоит преимущественно из обводненного органического вещества с включениями лигнинового волокна, которое является важным компонентом плодородия почв, а также известен точный состав осадка, что исключает попадание опасных патогенов.

Таким образом, данная работа представляет исследование эффективности применения осадка сточных вод ЦБК как нетрадиционного мелиоранта путем проведения оценки состава осадка, потенциального пролонгированного эффекта действия мелиоранта, влияния на раннее развитие растений методом фитотестирования.

Материалы и методика исследования

Осадок сточных вод целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК), как нетрадиционный мелиорант

На комбинате сульфит-целлюлозного производства был отобран аэробно сброженный обезвоженный осадок, образующийся на этапе биологической очистки сточных вод. Осадок ЦБК представляет собой серую массу, состоящую в основном из избыточного активного ила с различными включениями: лигниновыми веществами, глиноземом, целлюлозным волокном; с влажностью при отборе $73 \pm 0,01$ %.

В исследованиях ранее уже было отмечено, что осадок ЦБК обладает характеристиками почвенного мелиоранта – высоким содержанием органического вещества, фосфора, азота и питательных макро- и микрокомпонентов (кальция, железа, марганца и др.) [46, 47]. Но так как встречаются результаты исследований, противоречащие этому, где описаны осадки ЦБК с низкими показателями питательных веществ [48], то необходимо проводить оценку каждого осадка согласно их составу, происхождению, характеристикам и системе водоочистки.

Химический анализ

С целью снижения фитотоксичности осадка и стабилизации соединения, согласно [49], отобранный осадок после естественной сушки был оставлен на 90-дневный инкубационный период. Далее были проведены анализы основных характеристик осадка: содержания углерода, водорода и азота на анализаторе LECO CHN628 (США); фосфора на спектрофотометре Hach Lange DR 5000 (Германия) и выполнен качественный химический анализ металлов на атомно-эмиссионном спектрометре Shimadzu ICPE 9000 (Япония).

Результаты анализа основных характеристик отобранного осадка ЦБК приведены ниже.

<i>pH</i>	<i>6,00 ± 0,5</i>
<i>Электропроводность, мСм/см</i>	<i>0,56 ± 1,0</i>
<i>Органическое вещество, %</i>	<i>96,00 ± 0,1</i>
<i>Углерод, %</i>	<i>47,21 ± 0,15</i>
<i>Азот, %</i>	<i>0,96 ± 0,05</i>

Фосфор, %	0,16±0,05
Кальций, %	7,87±0,1
Железо, мг/кг	16,45±0,1
Марганец, мг/кг	Ниже предела обнаружения
Цинк, мг/кг	430±50
Медь, мг/кг	210±10
Свинец, мг/кг	Ниже предела обнаружения

Результаты анализа показали, что осадок не ограничен для применения на землях рекультивации в соответствии с требованиями ГОСТов (ГОСТ Р 54534–2011, ГОСТ Р 17.4.3.07–2001) по содержанию тяжелых металлов. Электропроводность осадка отражает низкое содержание солей в субстрате, что свидетельствует об отсутствии риска засоления почв и возможности посева любых культур без ограничения чувствительности к солям. Из положительных свойств осадка также можно отметить высокое содержание органических веществ, что на десятки выше значений показателей, полученных в исследованиях других осадков ЦБП [50, 51], высокое содержание углерода, как уже ранее отмечалось [52, 53], и наличие кальция, благоприятно воздействующего на структуру почв.

Органическое вещество

Органическое вещество имеет ключевое значение при восстановлении нарушенных земель, поскольку оказывает воздействие на основные физические, химические и биологические свойства почвы. Преобразование органического вещества в почве стимулирует активность почвенной биоты, чем улучшает структурность почвы, повышает устойчивость к эрозии, способствует удержанию питательных веществ и содержит значительную часть активаторов роста растений [29, 54].

Высокое содержание органического вещества в осадке сточных вод ЦБП, а также наличие лигнинового волокна повышают водоудерживающую способность почвы [54], улучшают агрегацию почвенных частиц [55, 56] и обеспечивают почву повышенной устойчивостью к процессам эрозии [55]. Это объясняется тем, что внесенные органические вещества заселяются почвенными микроорганизмами и адсорбируются минеральными частицами, становясь центром водоустойчивых агрегатов.

Изменения почвенной микробной активности происходят при внесении органических веществ, в частности из-за поступления углерода в почву [28]. Скорость разложения органических субстратов и содержание углерода в почве после внесения мелиорантов определяются составом и характеристиками мелиорационных субстратов.

Эффективность органического мелиоранта и плодородие почвы определяется также показателем соотношения C:N – взаимосвязью между почвенным органическим углеродом и общим азотом. Круговороты азота и углерода в восстанавливаемых земельных участках являются основополагающими, участвующими в процессах фотосинтеза, разложения

органических остатков и стабилизации почвенного органического вещества [57].

Соотношение C:N применяется как показатель готовности компоста к использованию, так как является ориентиром в прогнозировании высвобождения питательных веществ из органического мелиоранта. Более высокие показатели соотношения C:N характерны для отходов переработки древесины: опилок, стружки, коры, а также соломы, сухой листвы и др., низкие – компосты на основе отходов жизнедеятельности животных и некромассы. Питательная среда для растений формируется при более низких значениях соотношения C:N, однако эффект от внесения таких мелиорантов краткосрочен и вследствие разового повышения урожайности более применим для сельскохозяйственных целей. Для восстановления нарушенных земель (рекультивации) рациональнее вносить мелиоранты с повышенными значениями соотношения C:N, так как происходит иммобилизация доступного азота с постепенным высвобождением его для растений [57, 58]. Иммобилизованный азот является питательной средой для почвенной микробиоты, которая в процессе своей жизнедеятельности переводит его в доступные формы для растений. Такой подход внесения мелиорантов с пролонгированным эффектом воздействия формирует стабильный питательный режим и снижает риски гибели растительного покрова.

Всхожесть семян

Эффективность мелиорантов и их фитотоксичность можно определить на ранних стадиях развития растений. Метод определения заключается в биотестировании – фитотестировании, анализе всхожести и роста корней и ростков растений, выращенных на исследуемых субстратах. Фитотестирование, как косвенный метод, выявляет неподходящие почвенные условия, такие как засоленность почвы, наличие токсичных соединений или дефицита питательных веществ для растений [1, 7].

Фитотестирование проводили в соответствии с методикой ГОСТ Р ИСО 18763–2019 «Определение токсического воздействия загрязняющих веществ на всхожесть и рост на ранних стадиях высших растений». В тестировании использовали семена следующих растений: однодольного – ржи посевной *Secale cereale* L., овса посевного *Avena sativa* L. и двудольных – кресс-салата *Lepidium sativum* L. и горчицы белой *Sinapis alba* L.

Фитотестирование проводили в планшетах с почвой и осадком общим объемом 90 см³. Посев семян растений осуществляли на черную фильтрационную бумагу (удельный вес 85 г/м², толщина 0,17 мм, скорость фильтрации 45 с/10 мл), покрывающую увлажненный почвенный слой.

Подготовленные планшеты закрывали прозрачными крышками и помещали под углом 45° в темное место для инкубации в течение 72 ч. Угол наклона обусловлен повышением точности измерений за счет прямолинейного роста корней вследствие гравитропизма (рис. 1).

По завершении инкубационного периода фиксировали следующие параметры: число проросших семян, длину корней

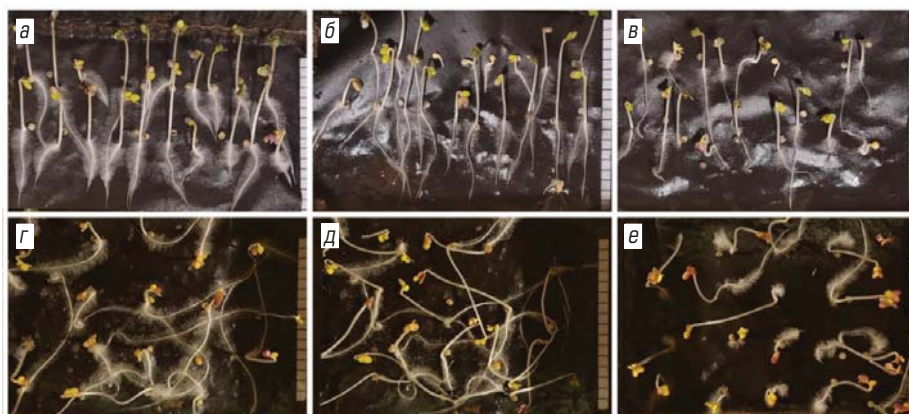


Рис. 1. Примеры моделей по завершении инкубационного периода:
 а–в – всхожесть и рост семян горчицы белой на моделях с контрольной почвой, почвами с осадком ЦБК (20 и 100 %);
 г–е – результаты после периода инкубации моделей без угла наклона

и проростков. Замеры выполняли путем обработки и анализа цифровых изображений с помощью программного обеспечения ImageJ 1,40g.

Всхожесть семян на искусственной почве

С целью использования осадка сточных вод ЦБК в качестве нетрадиционного мелиоранта проводили оценку экологической безопасности субстрата путем анализа фитотоксичности почвенных моделей с выявлением процентного замедления прорастания семян. В качестве экспериментальной почвы и контрольной модели была использована искусственная почва, сформированная согласно ИСО 11269-1,2. Внесение нетрадиционного мелиоранта осуществляли в диапазоне от 0 до 100 % с шагом 20 %. Кроме того, были сформированы экспериментальные модели с отношением осадка к почве 1:1, 1:2 и 1:3 для сопоставления результатов с количеством органического вещества.

Всхожесть семян оценивали путем расчета индекса всхожести семян. Индекс всхожести (*GI*) рассчитывали по формуле $GI = (Всхожесть\ семян\ (\%) \cdot Длина\ корня\ (мм) \cdot 100) / (Всхожесть\ контрольной\ модели\ (\%) \cdot Длина\ корня\ контрольной\ модели\ (мм))$.

Для расчета всхожести принимали появление корня длиной не менее 1 мм, что свидетельствовало о прорастании семян.

Всхожесть семян на почвах с нарушенных земель

В связи с тем, что осадок ЦБК планировали применять в качестве мелиоранта на рекультивируемых техногенно нарушенных землях, необходимо было проведение оценки экологической безопасности и мелиорационного потенциала на почвах этих территорий (с низким плодородием и пониженным содержанием органического вещества).

Для экспериментальных моделей второй серии фитотестирования был использован почвенный слой из антропогенно измененной супесчаной почвы, отобранной в Ленинградской области (60°16'52" с. ш., 30°14'3" в. д.) и в качестве альтернативного контроля – искусственная почва, сформированная согласно ИСО 11269-1,2. Внесение субстратов в почвы осуществляли в диапазоне от 0 до 100 % с шагом 10 %.

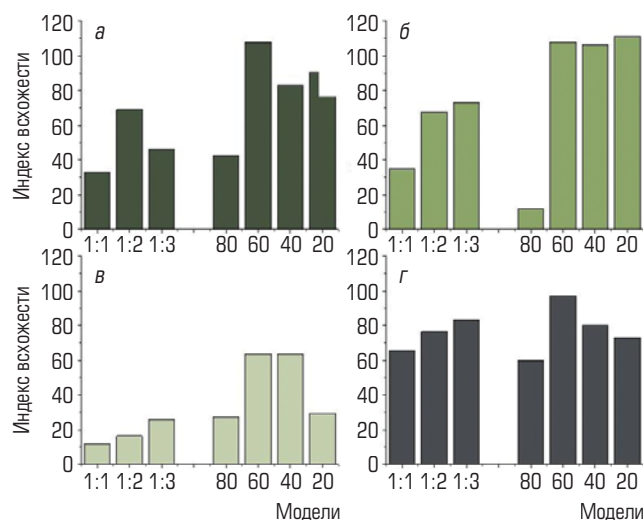


Рис. 2. Результаты расчета индекса всхожести семян кресс-салата (а), горчицы белой (б), ржи посевной (в) и овса посевного (г)

В этой серии фитотестирования проводили расчеты и замеры всхожести и длины проростков, корней.

Для расчета свидетельства прорастания семян принимали появление корня длиной не менее 1 мм. Статистическая обработка данных заключалась в расчете средних значений стандартных отклонений, с применением программного обеспечения MS Excel и OriginLab.

Для оценки достоверности анализа измерений длины корней и проростков (ростков) был применен однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA), где за нулевую гипотезу было принято, что почва с нарушенных земель имеет равную всхожесть и рост корней, ростков, как и почва, обработанная осадком ЦБК (с уровнем достоверности 95 %).

Результаты и их обсуждение

Всхожесть семян на искусственной почве

Результаты фитотестирования с расчетом индекса всхожести представлены на рис. 2. Как видно, внесение осадка

ЦБК в количестве 40–60 % не оказывает негативного воздействия на всхожесть семян кресс-салата, горчицы белой, ржи посевной и овса. Применение осадка в количестве более 80 % оказывает ингибирующий эффект на всхожесть семян, что может являться следствием фитотоксичности мелиоранта или результатом неподходящих почвенных условий: засоленностью почвы, наличием токсичных соединений или дефицитом питательных веществ для растений [54, 59, 60].

Результаты, полученные по замерам и расчету индекса всхожести ржи посевной, показали низкий процент всхожести в экспериментальных моделях и контрольных, поэтому был сделан вывод, что семена имеют низкий процент всхожести вне зависимости от почвенных условий, в связи с чем результаты всхожести семян ржи посевной не оценивали, как достоверные.

Экспериментальные почвенные модели с соотношением внесенного осадка к почве 1:1, 1:2, 1:3 были проанализированы на содержание органического вещества и количество органического углерода (табл. 1). Для сравнительного анализа были сформированы экспериментальные модели при таких же соотношениях внесенной торфосмеси в почву. Применение торфосмеси обосновывается тем, что как органическая почвенная добавка торфосмесь является одной из наиболее распространенных. Анализируемая торфяная смесь представляла собой товарный продукт – просеянный и раскисленный торф средней степени разложения с добавлением извести, 100–180 мг/л азота ($\text{NO}_3 + \text{NH}_4$), 135–255 мг/л фосфора (P_2O_5), 115–215 мг/л калия (K_2O), pH ~5–6.

Анализируя данные табл. 2, можно отметить, что осадок ЦБК обладает не меньшим количеством органического вещества и органического углерода, в сравнении с одной из наиболее распространенных органических почвенных добавок – торфосмесью. Однако в сопоставлении с результатами всхожести семян (см. рис. 2) видно, что прямая зависимость эффективности всхожести и содержания органического вещества/количества органического углерода не наблюдается.

Всхожесть семян на почвах, отобранных с нарушенных земель

Результаты второй серии фитотестирования (рис. 3) показали, что внесение предлагаемого нетрадиционного мелиоранта – осадка сточных вод целлюлозно-бумажного комбината в дозировке 20–60 % – не имело негативного воздействия на всхожесть тестируемых растений: всхожесть семян была 100%-ная или выше значений контрольных моделей эксперимента (на опытных почвах всхожесть ржи составляла 60–80 % при 53–57 % на контрольных моделях).

При внесении осадка более 60–70 % относительно обрабатываемой почвы в рассматриваемых моделях отмечали признаки проявления фитотоксичности – падения процента всхожести семян до 80 %, кроме семян ржи, где минимальная всхожесть составила 50 % в модельных образцах, 10 % и 100 % осадка при 53–57 % всхожести у контрольных моделей.

Таблица 1. Результаты анализа органического вещества и углерода в почве, исследуемом осадке ЦБК и торфосмеси

Содержание, %	В почве	В осадке	В торфе
Органическое вещество	6,85	69,50	58,25
Органический углерод	4,50	43,62	43,23
<i>Содержание в осадке ЦБК, %</i>			
Доля осадка	1:1	1:2	1:3
Органическое вещество	19,96	16,40	13,10
Органический углерод	15,20	13,17	10,53
<i>Содержание в торфосмеси, %</i>			
Доля торфа	1:1	1:2	1:3
Органическое вещество	15,65	11,92	9,92
Органический углерод	11,03	8,59	7,07

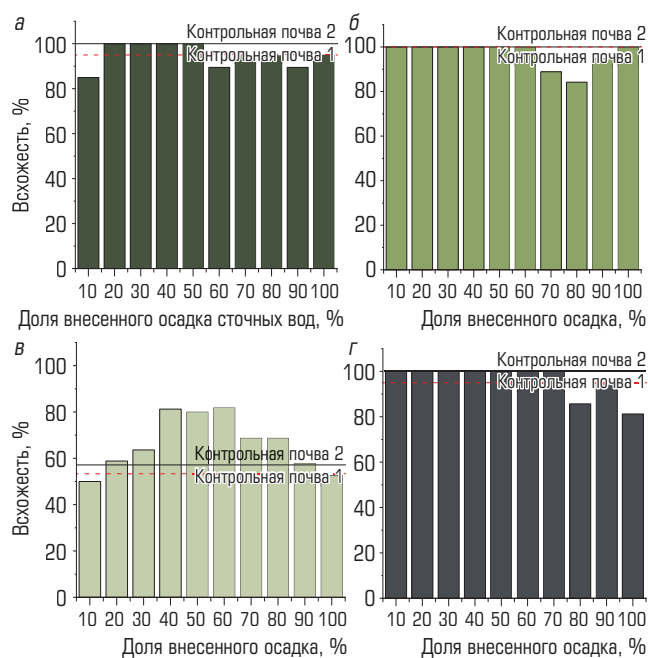


Рис. 3. Всхожесть семян кресс-салата (а), горчицы белой (б), ржи посевной (в) и овса посевного (г) в экспериментальных моделях с почвами с нарушенных земель

Согласно критериям валидности методики результаты фитотестирования, а именно: результаты всхожести ржи посевной, не могут быть использованы как достоверные, так как всхожесть семян ржи на контрольных моделях составила менее 70 %, что противоречит критериям используемой методики.

Результаты фитотестирования подтвердили, что рациональное применение предлагаемого нетрадиционного мелиоранта – осадка сточных вод ЦБК, не оказывает фитотоксичного воздействия на всхожесть семян. Внесение мелиоранта в дозировке 20–60 % к обрабатываемой почве не оказывает

Таблица 2. Результаты статистической обработки измерений длины ростков и корней фитотестируемых объектов

Осадок ЦБК, %	Кресс-салат (<i>Lepidium sativum</i>)	Горчица белая (<i>Sinapis alba</i>)	Овес посевной (<i>Avena sativa</i>)	Кресс-салат (<i>Lepidium sativum</i>)	Горчица белая (<i>Sinapis alba</i>)	Овес посевной (<i>Avena sativa</i>)
	Ростки			Корни		
10	1,72·10 ⁻⁹	0,9642	0,9708	1,86·10 ⁻⁵	0,083	0,2254
20	9,85·10 ⁻⁷	4,22·10 ⁻⁵	0,1037	1,01·10 ⁻⁵	0,008	0,1180
30	0,00124	0,0087	0,5893	0,0021	1,88·10 ⁻⁷	0,7157
40	0,000236	0,9492	0,7897	0,0036	4,23·10 ⁻⁹	0,6435
50	0,4335	0,000285	0,0114	0,0074	0,00066	0,5116
60	0,03422	2,62·10 ⁻⁶	0,9021	0,0076	0,00014	0,3357
70	0,87848	0,0001	0,3225	0,5793	0,00097	0,1094
80	0,2397	4,33·10 ⁻¹⁰	0,4935	0,2681	0,0175	0,0023
90	0,07676	3,31·10 ⁻⁶	0,1137	0,0011	0,1266	0,0046
100	0,01107	0,0017	0,0110	0,0331	0,0191	8,34·10 ⁻⁵

Зеленый цвет – стимуляция роста, красный – ингибирование (торможение) роста.

токсичного воздействия на овес посевной, кресс-салат и горчицу белую.

Результаты анализа роста ростков и корней у семян кресс-салата, горчицы белой и овса посевного подтвердили, что внесение мелиоранта в почву не оказывало фитотоксичного воздействия или слабо его проявляло на ранней стадии роста и развития рассматриваемых растений, исключая опытные модели с внесением осадка более 70–80 % (рис. 4). Существенное торможение роста отмечалось у семян горчицы белой, остальные виды тестируемых растений не проявили чувствительности к внесенному осадку, что может быть еще объяснено низкой чувствительностью.

Согласно результатам измерений корней и ростков экологически безопасные дозы внесения осадка в почвы, отобранные с нарушенных земель, определяются в диапазоне 10–70 %. Последующее увеличение доз внесения приводит к угнетению роста корней. При сравнении результатов роста корней и ростков на опытных моделях с результатами контрольной «эталонной» почвы – искусственной почвой, сформированной согласно ИСО 11269-1,2, отмечалось улучшение роста на почвах с нарушенных земель, обработанных осадком в диапазоне доз внесения 10–40 %.

С целью подтверждения полученных результатов и доказательства вышеописанных утверждений результаты были обработаны с применением однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA). Результаты статистической обработки результатов роста ростков и корней представлены в табл. 2.

Результаты статистической обработки измерений корней и ростков для анализа реакции на внесение осадков сточных вод доказали, что оптимальные дозы внесения предлагаемого нетрадиционного мелиоранта (осадка сточных вод ЦБК), стимулирующие рост корней и ростков, находятся в диапазоне 10–40 % к обрабатываемой почве, а ингибирование роста ростков и корней при внесении в почву доз свыше 80 %.

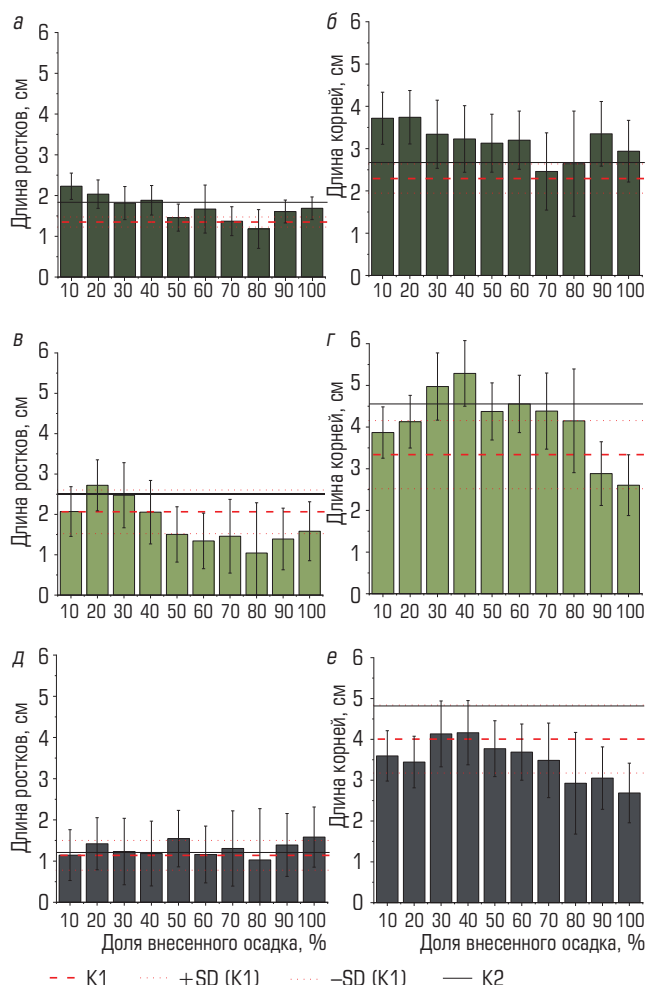


Рис. 4. Результаты замеров ростков и корней семян кресс-салата (а, б), горчицы белой (в, г) и овса посевного (д, е) при различных дозах внесения осадка

Однако стоит отметить, что фитотестирование с определением токсичности на ранних стадиях развития растений отражает исключительно острую реакцию растений и идентифицирует высокую токсичность почвенных субстратов или критические нарушения почвенных режимов (соляного, кислотного, водно-воздушного или питательного). Для подтверждения отсутствия фитотоксичности и наличия мелиорационного потенциала необходимо выполнять оценку воздействия внесения нетрадиционного мелиоранта на растения в течение всего вегетационного периода.

Выводы

Результаты проведенных исследований показали, что осадок ЦБК в рациональных дозах применим в качестве нетрадиционного мелиоранта. На основе результатов анализа химического состава осадка сточных вод был сделан вывод о высоком содержании органического вещества и органического

углерода по содержащемуся количеству, не уступающему торфосмеси. Также подтвержден эффект пролонгированного действия на основе полученных данных о повышенном соотношении C:N.

Применение осадка сточных вод ЦБК в качестве мелиоранта в количестве 40–60 % не оказывает фитотоксичного воздействия при внесении в искусственные почвы. Внесение осадка ЦБК в почвы территорий техногенно нарушенных земель допустимо в количестве 20–60 % без фитотоксичного воздействия на ранней стадии роста растений, а в количестве 10–40 % наблюдалась стимуляция роста ростков и корневой овса посевного (*Avena sativa* L.), кресс-салата (*Lepidium sativum* L.) и горчицы белой (*Sinapis alba* L.).

Библиографический список

См. англ. блок. 

«GORNYI ZHURNAL», 2023, № 9, pp. 75–82
DOI: 10.17580/gzh.2023.09.11

Application prospects for nonconventional improvers for vegetation cover in reclamation areas

Information about authors

E. R. Rudzish¹, Assistant at Geoecology Department, Candidate of Engineering Sciences, Rudzish_E@pers.spmi.ru

T. A. Petrova¹, Associate Professor at Geoecology Department, Candidate of Engineering Sciences

¹Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

The main problem in disturbed land reclamation in solid mineral mining is the large-scale transformation of soils and plants. Due to the intense deformation, the landscape restoration is complicated by a low thickness of layers of poor soils (or manmade soils) with a low content of organic matter. For effective reclamation, it is necessary to create conditions for the self-replenishing biogenic accumulation of organic substances—sustainable soil and vegetation cover. As a solution, it is proposed to use a non-conventional organic soil improver—sewage sludge from the pulp and paper industry. The purpose of the study is to ascertain applicability of the proposed non-conventional improver for the formation of vegetation cover in reclamation areas disturbed as a result of mining activities. In the course of the study, the following characteristics of the proposed organic soil improver were evaluated: the composition, the potential prolonged effect, and the effect on the early growth and development of plants. The results of the composition analysis show a high content of organic matter, organic carbon, and an increased C:N ratio, from which it is concluded that the improver has the prolonged effect. The results of early plant growth were obtained in phytotesting of monocots—rye *Secale cereale* L. and oats *Avena sativa* L., and dicots—watercress *Lepidium sativum* L. and white mustard *Sinapis alba* L. It is found that sewage sludge introduced in soil in rational doses has no phytotoxic effect on the vegetation cover being formed, while shots of sludge stimulate the growth and development of sprouts and roots of the tested plants.

Keywords: sewage sludge, industrial sludge, waste recycling, disturbed lands, seed germination.

References

1. Kutepov Yu. I., Kutepova N. A., Ponomarenko M. R., Kutepov Yu. Yu. Geomechanical monitoring of slope stability in pitwall and dumps in coal mining. *Gornyi Zhurnal*. 2023. No. 5. pp. 69–74.

- Moseykin V. V., Galperin A. M., Ermolov V. A., Krupoderov V. S. The analysis of the situation with mining and industrial wastes (geo-ecological aspects). *GIAB*. 2013. Special issue 1. Proceedings of International Scientific Symposium—Miner's Week-2013. pp. 7–23.
- Galperin A. M., Kirichenko Yu. V., Kutepov Yu. I. Integrated solutions for environmentally safe development of technogenic mineral formations. *Gornaya promyshlennost*. 2011. No. 5. pp. 22–23.
- Mesyats S. P., Volkova E. Yu. Modern remediation concept for mining-industrial rock dumps. *GIAB*. 2015. Special issue 56. Deep Open Pit Mines. pp. 467–478.
- Tagaeva T. O., Gilmundinov V. M., Kazantseva L. K. The problem of accumulating industrial mining waste in the Russian Federation. *EKO*. 2019. Vol. 49, No. 9. pp. 117–131.
- Kutepov Yu. I., Kutepova N. A., Vasileva A. D., Mukhina A. S. Engineering-geological and ecological concerns in operation and reclamation of high slope dumps at open-pit mines in Kuzbass. *GIAB*. 2021. No. 8. pp. 164–178.
- Kachor O. L., Sarapulova G. I., Bogdanov A. V. Investigation of the possibility of immobilization of mobile forms of arsenic in technogenic soils. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 239. pp. 596–602.
- Misebo A. M., Pietrzykowski M., Woś B. Soil carbon sequestration in novel ecosystems at post-mine sites—A new insight into the determination of key factors in the restoration of terrestrial ecosystems. *Forests*. 2022. Vol. 13, Iss. 1. 63. DOI: 10.3390/f13010063
- Sarapulova G. I. Geochemical approach in assessing the technogenic impact on soils. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 243. pp. 388–392.
- Pashkevich M. A., Bykova M. V. Methodology for thermal desorption treatment of local soil pollution by oil products at the facilities of the mineral resource industry. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 253. pp. 49–60.
- Polokhin O. V. Humus state of the young soils in the man-affected landscapes. *Vestnik KrasGAU*. 2010. No. 10(49). pp. 40–44.
- Androkhanov V. A. Concept of efficient use and preservation of georesources in mineral mining. *GIAB*. 2007. Special issue 15. Far East-2. pp. 223–229.
- Kostenkov N. M., Purtova L. N. Posttechnogenic soil formation on dump grounds as the factor of natural landscapes restoration. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2010. Vol. 12, No. 1(4). pp. 1032–1038.
- Kutepov Yu. I., Kutepova N. A., Mukhina A. S., Moseykin V. V. Geological, geotechnical and geoecological problems of reclamation of land disturbed by dumping in open pit coal mining in Kuzbass. *GIAB*. 2022. No. 5. pp. 5–24.
- Mesyats S. P., Rummyantseva N. S., Volkova E. Yu. Environment-creating role of biota and rocks in remediating mining-induced landscapes. *GIAB*. 2015. Special issue 56. Deep Open Pit Mines. pp. 479–490.
- Kalybekov T., Tursbekov S. V., Zhakypbek Y., Akhtaeva N. Z., Mukanova G. A. Studying the intensification of soil-forming processes in reclamation of the surface dumps. *Vestnik KRSU*. 2019. Vol. 19, No. 4. pp. 93–98.

17. Pashkevich M. A., Bech J., Matveeva V. A., Alekseenko A. V. Biogeochemical assessment of soils and plants in industrial, residential and recreational areas of Saint Petersburg. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 241. pp. 125–130.
18. Polokhin O. V. The specifics of formation of soil and vegetation cover of technogenic landscapes in the south of Amur oblast (on the example of the North-Eastern surface coal mine). *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2022. No. 12(126). DOI: 10.23670/IRJ.2022.126.62
19. Seredina V. P., Androkanov V. A., Alekseeva T. P., Sysoeva L. N., Burmistrova T. I. et al. Ecological aspects of biological reclamation soil of Kuzbass technogenic ecosystem. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*. 2008. No. 2(3). pp. 61–72.
20. Guhra T., Stolze K., Totsche K. U. Pathways of biogenically excreted organic matter into soil aggregates. *Soil Biology and Biochemistry*. 2022. Vol. 164. 108483. DOI: 10.1016/j.soilbio.2021.108483
21. Archegova I. B., Panyukov A. N., Kuznetsova E. G., Kovaleva V. A. On the role of biological factor in soil formation of the taiga zone. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ser.: Biologiya*. 2016. No. 2. pp. 127–139.
22. Frouz J., Keplin B., Pižl V., Tajovský K., Stary J. et al. Soil biota and upper soil layer development in two contrasting post-mining chronosequences. *Ecological Engineering*. 2001. Vol. 17, Iss. 2-3. pp. 275–284.
23. Khordan M. M., Bek D., Garsiya-Sanches E., Garsiya-Orenes F. Bulk density and aggregate stability assays in percolation columns. *Journal of Mining Institute*. 2016. Vol. 222. pp. 877–881.
24. Jordán M. M., García-Sánchez E., Almendro-Candel M. B., Pardo F., Vicente A. B. et al. Technosols designed for rehabilitation of mining activities using mine spoils and biosolids. Ion mobility and correlations using percolation columns. *Catena*. 2017. Vol. 148. pp. 74–80.
25. Jeżowski S., Mos M., Buckley S., Cerazy-Waliszewska J., Owczarzak W. et al. Establishment, growth, and yield potential of the perennial grass *Miscanthus* × *Giganteus* on degraded coal mine soils. *Frontiers in Plant Science*. 2017. Vol. 8. 726. DOI: 10.3389/fpls.2017.00726
26. Soria R., Ortega R., Bastida F., Miralles I. Role of organic amendment application on soil quality, functionality and greenhouse emission in a limestone quarry from semiarid ecosystems. *Applied Soil Ecology*. 2021. Vol. 164. 103925. DOI: 10.1016/j.apsoil.2021.103925
27. Strizhenok A. V., Korelskiy D. S., Choi Y. Assessment of the efficiency of using organic waste from the brewing industry for bioremediation of oil-contaminated soils. *Journal of Ecological Engineering*. 2021. Vol. 22, Iss. 4. pp. 66–77.
28. Larney F. J., Angers D. A. The role of organic amendments in soil reclamation: A review. *Canadian Journal of Soil Science*. 2012. Vol. 92, No. 1. pp. 19–38.
29. Wengang Zuo, Chuanhui Gu, Wenjie Zhang, Kaida Xu, Yao Wang et al. Sewage sludge amendment improved soil properties and sweet sorghum yield and quality in a newly reclaimed mudflat land. *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 654. pp. 541–549.
30. Antonelli P. M., Fraser L. H., Gardner W. C., Broersma K., Karakatsoulis J. et al. Long term carbon sequestration potential of biosolids-amended copper and molybdenum mine tailings following mine site reclamation. *Ecological Engineering*. 2018. Vol. 117. pp. 38–49.
31. Navarro-Ramos S. E., Sparacino J., Rodríguez J. M., Filippini E., Marsal-Castillo B. E. et al. Active revegetation after mining: what is the contribution of peer-reviewed studies? *Heliyon*. 2022. Vol. 8, Iss. 3. e09179. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09179
32. Eremeeva A. M., Ilyashenko I. S., Korshunov G. I. The possibility of application of bioadditives to diesel fuel at mining enterprises. *GIAB*. 2022. No. 10-1. pp. 39–49.
33. Chukaeva M. A., Matveeva V. A., Sverchkov I. P. Complex processing of high-carbon ash and slag waste. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 253. pp. 97–104.
34. Litvinova T. E., Suchkov D. V. Lightweight ash-based concrete production as a promising way of technogenic product utilization (on the example of sewage treatment waste). *Journal of Mining Institute*. 2023. 16020. Available at: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/16020> (accessed: 15.06.2023).
35. Pashkevich M. A., Alekseenko A. V. Reutilization prospects of diamond clay tailings at the Lomonosov Mine, Northwestern Russia. *Minerals*. 2020. Vol. 10, Iss. 6. 517. DOI: 10.3390/min10060517
36. Kharkevich L. P. Influence of sewage sludge and liming on yield and quality of perennial grasses hay. *Agrokhimicheskiy vestnik*. 2011. No. 3. pp. 12–13.
38. Mezheva A. S. Unconventional natural and technogenic fertilizers-meliorants and their opportunities. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*. 2016. No. 4(36). pp. 78–83.
39. Pyndak V. I., Novikov A. E. Natural improvement made of silica and alumina. *Izvestiya Nizhnevolskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie*. 2015. No. 2(38). pp. 73–76.
40. Baranovskiy I. N., Podolyan E. A. Fertilizer mixtures with wastewater sludge on sod-podzolic soils. *Molochnokhozyaystvennyy vestnik*. 2017. No. 3(27). pp. 16–25.
41. Levandovskaya T. V., Chupakova A. V. Agrochemical properties of clearing constructions' wastes in the Arkhangelsk and Solombala pulp and paper mills. *Vestnik Pomorskogo universiteta. Ser.: Estestvennye i tochnye nauki*. 2005. No. 2. pp. 112–115.
42. Miller V. S., Naeth M. A. Amendments and substrates to develop anthroposols for northern mine reclamation. *Canadian Journal of Soil Science*. 2017. Vol. 97, No. 2. pp. 266–277.
43. Smirnov Yu. D., Suchkov D. V., Danilov A. S., Goryunova T. V. Artificial soils for restoration of disturbed land productivity. *Eurasian Mining*. 2021. No. 2. pp. 92–96.
44. Panasin V. I., Ronzhina E. S., Shogenov T. A., Rymarenko D. A. Ecological and agrochemical aspects of using glauconitic sands in agriculture of the Kaliningrad region. *Izvestiya KGTU*. 2017. No. 47. pp. 148–156.
45. Matveeva V. A., Smirnov Yu. D., Suchkov D. V. Industrial processing of phosphogypsum into organomineral fertilizer. *Environmental Geochemistry and Health*. 2021. Vol. 44, Iss. 5. pp. 1605–1618.
46. Artico M., Firpo B. A., Artico L. L., Tubino R. M. C. Integrated use of sewage sludge and basalt mine waste as soil substitute for environmental restoration. *Revista Escola de Minas*. 2020. Vol. 73, No. 2. pp. 225–232.
47. Undurraga P., Hirzel J., Celis J., Pérez C., Sandoval M. A. Toxicity of paper mill pelletized waste using germination and biomass production as bioindicators. *Ciencia e Investigación Agraria*. 2018. Vol. 45, No. 2. pp. 147–157.
48. Undurraga P., Hirzel J., Celis J., Pérez C., Sandoval M. A. Pelletized paper mill waste promotes nutrient input and N mineralization in a degraded Alfisol. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 2017. Vol. 77, Iss. 4. pp. 390–399.
49. Hechmi S., Hamdi H., Mokni-Tlili S., Zoghalmi I. R., Khelil M. N. et al. Carbon mineralization, biological indicators, and phytotoxicity to assess the impact of urban sewage sludge on two light-textured soils in a microcosm. *Journal of Environmental Quality*. 2020. Vol. 49, Iss. 2. pp. 460–471.
50. Gallardo F., Cea M., Tortella G. R., Diez M. C. Effect of pulp mill sludge on soil characteristics, microbial community and vegetal production of *Lolium Perenne*. *Journal of Environmental Management*. 2012. Vol. 95. Supplement. pp. 193–198.
51. Gomes L. A., Santos A. F., Góis J. C., Quina M. J. Thermal dehydration of urban biosolids with green liquor dregs from pulp and paper mill. *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 261. 109944. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109944
52. Linghong Zhang, Chunbao (Charles) Xu, Pascale Champagne. Energy recovery from secondary pulp/paper-mill sludge and sewage sludge with supercritical water treatment. *Bioresource Technology*. 2010. Vol. 101, Iss. 8. pp. 2713–2721.
53. Černe M., Palčić I., Pasković I., Major N., Romić M. et al. The effect of stabilization on the utilization of municipal sewage sludge as a soil amendment. *Waste Management*. 2019. Vol. 94. pp. 27–38.
54. Pérez R. A., Sánchez-Brunete C., Albero B., Miguel E., Tadeo J. L. et al. Quality assessment of three industry-derived organic amendments for agricultural use. *Compost Science & Utilization*. 2016. Vol. 24, Iss. 3. pp. 190–202.
55. Chow T. L., Rees H. W., Fahmy S. H., Monteith J. O. Effects of pulp fibre on soil physical properties and soil erosion under simulated rainfall. *Canadian Journal of Soil Science*. 2003. Vol. 83, No. 1. pp. 109–119.
56. Rasa K., Pennanen T., Peltoniemi K., Velmala S., Fritze H. et al. Pulp and paper mill sludges decrease soil erodibility. *Journal of Environmental Quality*. 2021. Vol. 50, Iss. 1. pp. 172–184.
57. Semenov V. M. Functions of carbon in the mineralization–immobilization turnover of nitrogen in soil. *Eurasian Soil Science*. 2020. No. 6. pp. 78–96.
58. Fang M., Wong J. W. C. Effects of lime amendment on availability of heavy metals and maturation in sewage sludge composting. *Environmental Pollution*. 1999. Vol. 106, Iss. 1. pp. 83–89.
59. Yuan Luo, Jie Liang, Guangming Zeng, Ming Chen, Dan Mo et al. Seed germination test for toxicity evaluation of compost: Its roles, problems and prospects. *Waste Management*. 2018. Vol. 71. pp. 109–114.
60. Zenkov I. V., Kiryushina E. V., Vokin V. N., Maglinets Yu. A. Review of global trends in meeting the ecological challenges of the mining industry. Part I: International research. *Eurasian Mining*. 2022. No. 1. pp. 90–94.