

Научная статья

УДК 631.45:622.882

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-4-359-372>

CC BY 4.0

О возможности использования лигносульфоната натрия в качестве наноорганической основы для создания почвоподобных тел в целях рекультивации техногенно-деградированных земель

Екатерина Сергеевна Дорогая¹ , Руслан Римович Сулейманов^{1,2} , Елена Витальевна Кузина¹ ,
Мария Геннадьевна Юркевич^{3*} , Ольга Николаевна Бахмет² 

¹ Уфимский Институт биологии УФИЦ РАН, Уфа, Россия

² Отдел комплексных научных исследований КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия

³ Институт биологии КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: svirinka@mail.ru

АННОТАЦИЯ: Введение. В настоящее время разработано значительное количество стратегий восстановления карьеров, основывающихся на разных аспектах воздействия на почву: смешивания верхнего слоя почвы с пустой породой выработанных карьеров; внесения органических отходов; применения мульчирования и полимерных структурообразователей; использования адаптированных растений. В данном исследовании мы предприняли попытку объединить положительные стороны перечисленных ранее методов. В связи с чем **целью** наших исследований явилось создание искусственных почвоподобных тел с заданными агроэкологическими свойствами. Предполагаем дальнейшее использование полученной смеси в качестве прослойки между материалом отвалов карьера и плодородной почвой, наносимой на рекультивируемую поверхность с последующей высадкой местных видов растительности. **Материалы и методы.** Исследования по изучению возможности рекультивации отвалов выработанного рудника проводились в условиях модельного опыта с использованием в качестве органической основы почвоподобного тела отхода целлюлозно-бумажной промышленности – лигносульфоната натрия (ЛН). Отобранный с отвала рудника мелкозем (М) смешивали с ЛН в соотношении 1/0,5, 1/1 и 1/2, для ускорения разложения органического вещества в зависимости от схемы опыта добавляли штаммы бактерий *Acinetobacter calcoaceticus* и *Pseudomonas kunmingensis*. Полученные смеси компостировались в течение трех месяцев при комнатной температуре, перемешивании и поддержании режима влажности. Фитотоксичность полученных смесей оценивалась при проращивании семян скороспелого редиса с торговым названием «18 дней». **Результаты и обсуждение.** Внесение ЛН в мелкозем существенно повысило содержание органического вещества и снизило кислотность среды. Внесение азота на вариантах с ЛН по сравнению с вариантами, содержащими только ЛН, привело к значительному увеличению содержания щелочногидролизующего азота. **Заключение.** Результаты исследований показали, что добавление лигносульфоната натрия к мелкозему способствует снижению кислотности, увеличению содержания органического вещества и щелочногидролизующего азота в смеси, а также снижению токсичности субстрата.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: лигносульфонат натрия; рекультивация карьеров; наноудобрение; микроорганизмы.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ: ЛН – лигносульфонат натрия; М – мелкозем отвалов карьера; МО – микроорганизмы; ОВ – органическое вещество; ЩГА – щелочногидролизующий азот; N – минеральное азотное удобрение.

БЛАГОДАРНОСТИ. Работа выполнена в рамках гранта РНФ № 22-16-00145.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Дорогая Е.С., Сулейманов Р.Р., Кузина Е.В., Юркевич М.Г., Бахмет О.Н. О возможности использования лигносульфоната натрия в качестве наноорганической основы для создания почвоподобных тел в целях рекультивации техногенно-деградированных земель // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15, № 4. С. 359–372. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-4-359-372>. – EDN: KNZHCW.

ВВЕДЕНИЕ

Последние исследования, основанные на использовании спутникового космического монито-

ринга, показывают, что потери верхнего почвенного слоя планеты составляют 16 миллионов гектар ежегодно [1]. В то же время происходит постоянный рост численности населения планеты и усугубляется

© Дорогая Е.С., Сулейманов Р.Р., Кузина Е.В., Юркевич М.Г., Бахмет О.Н., 2023

влияние климатических изменений на природные экосистемы [2, 3]. В таких условиях необходимо не только предотвращать дефицит земель методами контролируемого земледелия и борьбы с деградацией почв, но и интенсивно восстанавливать утраченные плодородные территории. Рекультивация заброшенных карьеров может обеспечить новые виды землепользования и смягчить последствия эрозии почв [4, 5], а развитие вторичного леса на деградированных участках представляет интерес в связи с потенциалом связывания атмосферного углерода [6]. Тем не менее, многие из заброшенных карьеров не подвергаются целенаправленной рекультивации, а самовосстановление нарушенных экосистем затягивается на многие годы и даже десятилетия [7, 8].

В случаях проведения рекультивации наиболее эффективной стратегией восстановления является нанесение почвенного покрова путем возвращения снятого поверхностного слоя и насаждение растительности на рекультивируемых участках [9]. В засушливых и полусушливых регионах применение такого метода ограничено климатическими факторами, такими как высокая испаряемость и низкое количество осадков. Часто для местности с подобными условиями существует проблема нехватки достаточного количества почвы, подходящей для создания нового плодородного слоя [10]. Антропогенная нагрузка при добыче ископаемых также оказывает негативное влияние на биологическую активность почв региона [11]. В результате даже при вовремя проведенной рекультивации новые созданные почвы не обладают необходимыми физическими, химическими и биологическими характеристиками для поддержки устойчивой экосистемы [12]. Характеристики почвы напрямую влияют как на развитие эрозии, так и на укоренение растений, их плотность и покрытие, то есть на все те факторы, которые определяют развитие естественной растительности и являются ключевыми для оценки экологического восстановления [9].

За последние годы было разработано множество стратегий восстановления карьеров, основывающихся на разных аспектах воздействия на почву. Так, существуют методы улучшения агрохимического состава новых почв на восстанавливаемой территории, например, за счет внесения органических отходов [13, 14]. Или такие ландшафтные методы, предполагающие уменьшение степени эрозии и защиту почвы от неблагоприятных климатических условий за счет снижения испарения и увеличения инфильтрации, как, например, мульчирование и применение полимерных структурообразователей [15, 16]. Описаны стратегии восстановления, основанные не на внесении мелиорантов в почвы, а на создании более устойчивых экосистем в тех условиях, которые уже имеются, или с незначительным влиянием на по-

чвы, например, с использованием для рекультивации адаптированных к нехватке питательных веществ и воды видов растений. Растительность, имеющая морфологические и физиологические приспособления, позволяющие выживать и расти в суровых условиях засушливых и полусушливых районов, успешнее противостоит негативным факторам среды [17, 18]. Существуют также исследования [19, 20], рассматривающие увеличение количества вносимого для рекультивации субстрата при смешивании верхнего слоя почвы с пустой породой выработанных карьеров. Авторы работ пришли к заключению, что в результате в общей смеси увеличивалось содержание органического вещества, вероятно, за счет улучшения гидрологической функции и производства биомассы, а также активности дегидрогеназ микроорганизмов. При этом улучшения распространялись глубже по профилю и таким образом способствовали восстановлению функции почвы.

Каждая из перечисленных стратегий способствует процессам рекультивации нарушенных территорий, но имеет собственные недостатки. В случаях внесения мелиорантов, даже без учета экономических факторов, существуют ограничения в экологических требованиях по содержанию тяжелых металлов, питательных элементов, кислотности среды или устойчивости в проявлении водной и ветровой эрозии. Кроме того, эффективное использование мелиорантов предполагает не только улучшение свойств почв, но и выделение минеральных питательных веществ в соответствии с потребностями растительности. Используемые для рекультивации устойчивые виды растений не должны создавать конкуренции местной флоре, так как это отрицательно влияет на экосистемы региона в целом [21, 22]. Метод смешивания почвы с породой карьера ограничен тем, что порода должна быть определенной структуры и не должна содержать веществ, препятствующих развитию растительности. Для многих карьеров по добыче цветных и тяжелых металлов это условие не соблюдается, в них практически всегда содержатся значительные количества вредных для живых организмов элементов.

В данном исследовании мы предприняли попытку объединить положительные стороны перечисленных ранее методов. Для этого оценили внесение лигносульфоната натрия (ЛН) в субстрат, отобранный с отвалов карьера. Предполагаем дальнейшее использование полученной смеси в качестве прослойки между материалом отвалов карьера и плодородной почвой, наносимой на рекультивируемую поверхность с последующей высадкой местных видов растительности.

Известно, что наиболее экономически выгодно использовать в качестве мелиорантов органические отходы производств. Это позволяет снизить загряз-

нение местности при накапливании шлама и использовать его с выгодой в сельском хозяйстве [13, 23, 24]. В этом плане ЛН является одним из перспективных веществ. При химической переработке древесины на целлюлозно-бумажных и гидролизных предприятиях наиболее трудно утилизируемая часть целлюлозы – лигнин – становится отходом и отправляется в накопители, где хранится десятилетиями вследствие небольшой степени вторичной переработки и высокой стойкости к разложению. При этом из-за высокой кислотности такого лигнина он оказывает негативное действие на окружающую среду, подкисляет почву и воду, загрязняет воздушный бассейн и является опасным источником возгорания [25, 26]. С другой стороны, лигнин – это природный ресурс, который обеспечивает возобновляемые ароматические соединения и по молекулярному составу сходен с негидролизуемой частью гуминовой кислоты. В качестве почвенной добавки он может служить как источником органического углерода, улучшая вместе с тем азотный баланс почв, так как 1 г углерода помогает фиксировать от 15–20 до 40 мг атмосферного азота [27, 28], так и основой для накопления и постепенного высвобождения минеральных компонентов. Со стороны влияния на экологию ЛН имеет доказанную сорбционную способность к тяжелым металлам, в том числе, в качестве вещества, применяемого при очистке производственных сточных вод [29, 38], то есть будет подавлять токсическое действие материала карьера. Противозерозионная устойчивость ЛН, отмеченная в его использовании при дорожном строительстве [31, 38], также внесет положительный эффект. Таким образом, ЛН будет выступать и как вещество, улучшающее агрохимический состав почв, и как структурообразователь, и как компонент материала карьера, снижающий токсичность и позволяющий уменьшить количество используемой почвы для формирования верхнего слоя.

К настоящему времени разработано множество составов на основе ЛН в качестве альтернативы удобрений для применения в сельском хозяйстве [25, 33]. Исследователи в большинстве своем сходятся во мнении, что применение ЛН более эффективно, если: а) использовать его совместно с компонентами, являющимися источником минеральных веществ [34] для лучшего питания растений; б) после предварительного компостирования для снижения кислотности ЛН и увеличения его биодоступности, обычно с участием микроорганизмов, способствующих ускорению разложения ЛН [35, 38, 37, 38]. В первом случае ЛН используется как матрица для удержания минеральных компонентов, во втором – как источник гумусовых веществ.

В связи с чем, основываясь на всех вышеперечисленных фактах, в лабораторных условиях был

проведен модельный опыт по изучению возможности создания почвоподобных тел путем компостирования в смеси лигносульфоната натрия (ЛН) и мелкозема (М) с добавлением микроорганизмов (МО) и азотного удобрения (N).

2. МАТЕРИАЛЫ

2.1. Мелкозем (М). В качестве основы в опыте использовался материал с отвала карьера выработанного рудника Кульюртау, расположенного в Баймакском районе на юго-востоке Республики Башкортостан. Месторождение использовалось для добычи окисленных золотосодержащих руд, меди, цинка и россыпного золота. Складирование вскрышных пород осуществлялось формированием отвалов. В настоящее время выработка завершена, карьер затоплен, местность имеет сильно нарушенный рельеф, естественный почвенный покров срезан. Рекультивация после прекращения добычи не проводилась. Самозаращение составляет не менее 30 лет (с 1985 г.), на отвалах карьера заметны отдельные участки формирования вторичного почвенного покрова, предположительно, частично наносного, частично сформированного на месте. Растительность представлена молодыми зарослями берез и сосен, травяной покров отсутствует.

Материал отвалов карьера сухой белесый порошистый с вкраплениями желтого и темно-оранжевого, представлен дресвой и щебнем. Согласно литературным источникам [40], по составу схож с добываемыми рудами и содержит такие элементы, как медь, цинк, золото и серебро. Вскрышные породы сложены рудами базальт-андезит-базальт-андезит-дацит-риолитовой субформацией андезитобазальтовой формации [41]. Содержание органического углерода – 0,5%, щелочногидролизующего азота – 42 мг/кг мелкозема, реакция среды сильноокислая ($\text{pH H}_2\text{O} - 2,9$).

Местность относится к сухим с недостаточной влагообеспеченностью: продолжительность солнечного сияния – 1950–2000 часов/год; среднегодовая температура воздуха – 1,5–2°C; средняя температура воздуха в июле – 17,5–18°C; количество осадков в год – 350–400 мм; количество осадков в теплый период – 250–300 мм; среднее число дней с атмосферной засухой – 40–45 дней/год; средняя скорость ветра – 3,5–4 м/с. Район отличается высокой антропогенной нагрузкой на природную среду, обусловленную как горнодобывающей промышленностью, так и интенсивным сельским хозяйством [42].

Для модельного опыта в нескольких точках внутренней части внешнего отвала карьера отбирали пробы весом не менее 1 кг. Пробы перемешивали, освобождали от крупных обломков, камней и остат-

ков растительности, просеивали через сито диаметром 1 мм. Из полученного количества методом квартования отделяли навеску около 50 г для агрохимического анализа исходного субстрата. Остаток тщательно перемешивали и использовали в эксперименте.

2.2. Лигносальфонат натрия (ЛН). Использовали отход целлюлозно-бумажного комбината, доступный в продаже. В опыте применяли жидкую форму ЛН с техническими характеристиками, представленными в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики лигносульфоната натрия

Внешний вид	Вязкая жидкость темного цвета
Массовая доля сухих веществ, %, не менее	50
Массовая доля золы к массе сухих веществ, %	27
Концентрация ионов водорода, рН, не менее	4,5
Предел прочности на растяжение высушенных образцов, МПа	0,6
Вязкость условная, сек, не менее	80
Массовая доля редуцирующих веществ к массе сухих веществ, %	15
Плотность, кг/м ³ , не менее	1280

Таблица 2

Схема модельного опыта

Варианты опыта, (пропорции)	Состав смеси			
	Мелкозем, г	Лигносальфонат натрия, г	Азотное удобрение, г	Жидкая культура бактерий, мл
1. Контроль (М)	300	–	–	–
2. М/ЛН (1/0,5)	300	150	–	–
3. М/ЛН (1/1)	300	300	–	–
4. М/ЛН (1/2)	300	600	–	–
5. М/ЛН (1/0,5) + N	300	150	1	–
6. М/ЛН (1/0,5) + N + МО	300	150	1	1,5
7. М/ЛН (1/1) + N	300	300	1	–
8. М/ЛН (1/1) + N + МО	300	300	1	2
9. М/ЛН (1/2) + N	300	600	1	–
10. М/ЛН (1/2) + N + МО	300	600	1	3
11. М + МО	300	–	–	1
12. М + N + МО	300	–	1	1

2.3. Минеральное удобрение (N). В опыте применяли препарат с торговым названием «Удобрение смешанное минеральное Селитра аммиачная с комплексом микроэлементов, марки N-33%», произведенное ООО «ТПК «НОВ-АГРО». Содержание элементов питания по массовой доле: азот (N) – 33%, бор (В) – 0,03%, медь (Cu) – 0,15%, железо (Fe) – 0,09%, марганец (Mn) – 0,16%, молибден (Mo) – 0,002%, цинк (Zn) – 0,04%. Норма внесения в зависимости от культуры – от 15–20 г/м².

2.4. Микроорганизмы (МО). Использовались штаммы *Acinetobacter calcoaceticus* UOM 22 и *Pseudomonas kunmingensis* CA 3 с доказанной способностью к деструкции углеводов [44, 45, 45]. Культуры нарабатывали в лаборатории биотехнологий Уфимского института биологии УФИЦ РАН. Штаммы выращивались отдельно на жидкой среде Кинг В [46], затем культуры смешивали в равных количествах. Концентрация микроорганизмов в растворе составляла около 10⁹ КОЕ/мл. Рекомендуемая доза для внесения – 1 мл раствора микроорганизмов на 300 г субстрата.

2.5. Редис. Фитотоксичность полученных смесей оценивалась при проращивании семян скороспелого редиса с торговым названием «18 дней» [47].

3. МЕТОДЫ

Опыт проводился в вегетационных сосудах по схеме, представленной в табл. 2.

Предварительно очищенный мелкозем просеивали для более эффективного взаимодействия с вно-

симыми добавками. В эксперименте использовалась фракция меньше 1 мм. Количество вносимого ЛН рассчитывалось из заданного соотношения по весу. Норма комплексного удобрения N составляла 1 г на каждый сосуд. Микроорганизмы вносили в количестве 1 мл на 300 г субстрата.

После добавления всех компонентов (кроме микроорганизмов, их вносили путем добавления в воду для полива) смеси тщательно перемешивались, затем в каждую добавляли по 100 мл дистиллированной воды и вновь перемешивали. Полученные образцы оставляли для компостирования в лабораторных условиях при температуре 25–26°C, естественном освещении и проветривании. По мере необходимости сосуды увлажняли. Количество поливов и объем воды фиксировали. Раз в две недели из образцов, при предварительном увлажнении и тщательном перемешивании, отбирали навеску для анализа 20–25 г, которую затем помещали в морозильную камеру для деактивации жизнедеятельности микроорганизмов.

Отборы проб для анализа по времени компостирования проводили на 3 (1 срок), 7 (2 срок), 13 (3 срок), 27 (4 срок), 41 (5 срок), 56 (6 срок) и 82 (7 срок) сутки (завершение компостирования). После завершения компостирования почвоподобная смесь высушивалась до воздушно-сухого состояния и повторно анализировалась на 250 сутки (8 срок) после начала модельного опыта.

В отобранных образцах определяли содержание органического вещества (ОВ) по методу Тюрина с окончанием по Орлову и Гриндель, щелочногидролизующего азота (ЩГА) – по Корнфилду и рН водной суспензии – потенциметрически [39].

Компостируемые смеси проверяли на фитотоксичность с использованием семян скороспелого редиса. В протертый и просеянный через сито диаметром 1 мм образец массой 1 г добавляли 10 мл дистиллированной воды, перемешивали и полученным раствором пропитывали фильтровальную бумагу. На поверхность влажной бумаги выкладывали по 10 семян. Контролем также была фильтровальная бумага, пропитанная дистиллированной водой и водной вытяжкой с мелкозема. Фитотоксичность оценивали по количеству проросших семян и сухой массе семян и проростков через 48 часов. Повторность теста трехкратная. Полученные данные обрабатывались статистически.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Через три дня (1 срок) от начала компостирования была отобрана первая серия проб для анализов. Внесение ЛН в мелкозем существенно повысило содержание органического вещества и снижало кислотность среды. Содержание органического веще-

ства росло пропорционально увеличению доли ЛН. Концентрация лигносульфоната натрия не оказала значимого влияния на кислотность мелкозема и содержание в нем щелочногидролизующего азота (рис. 1, варианты опыта 2–4).

Известно, что деструкция ЛН идет медленно и доступность органического вещества для питания растений из него низкая [25, 33]. Для интенсификации процесса разложения органического вещества из ЛН применялись микроорганизмы и/или азотные удобрения [34, 35, 36, 37, 38]. Внесение азотсодержащих веществ, кроме того, способствовало повышению крайне низкого уровня азота в субстрате (рис. 16, варианты опыта 5–10, 12).

Внесение азотного удобрения на вариантах с лигносульфонатом натрия по сравнению с вариантами, содержащими только ЛН, привело к значительному увеличению содержания ЩГА. Количество органического вещества при этом было несколько ниже, чем у аналогичных проб без N, что может указывать на начало процесса его разложения (рис. 1а). Наименьшее различие в содержании органического вещества между вариантами только с ЛН и ЛН + N наблюдались в варианте 5 (М/ЛН (1/0,5) + N). Для этого варианта также характерно наименьшее повышение количества щелочногидролизующего азота, что не соответствует тренду распределения азотного удобрения в массе субстрата (рис. 16). Вариант 5 (М/ЛН (1/0,5) + N) по массе содержит 450 г вещества, вариант 7 (М/ЛН (1/1) + N) – 600 г и вариант 9 (М/ЛН (1/2) + N) – 900 г, однако при одинаковом количестве внесенного азотного удобрения в данные варианты наименьшее увеличение его содержания отмечено в варианте 5 (М/ЛН (1/0,5) + N). Вероятно, такой результат обусловлен чрезмерным количеством N на массу субстрата, что привело к денитрификации азота удобрения и снизило его полезное влияние. Реакция среды в вариантах с ЛН и N аналогична вариантам только с ЛН – кислотность снижалась с 2,8 до 4,1–4,4 единиц рН во всех образцах (рис. 1в).

Реакцию микроорганизмов на лигносульфонат натрия оценивали по дополнительным вариантам 11 и 12, где к мелкозему без внесения ЛН добавляли только МО (вариант 11) и МО с N (вариант 12). По результатам анализов (рис. 1) видно, что внесение микроорганизмов к мелкозему без добавления каких-либо других веществ не оказало существенного влияния на его агрохимические свойства. Внесение микроорганизмов в сочетании с азотным удобрением приводило к значительному увеличению количества ЩГА и несколько повышало кислотность среды (до 3 рН Н₂O). При этом концентрация N в субстрате наибольшая среди всех проб (1 г удобрения на 300 г субстрата), но эффекта потери азота, рассмотренного для варианта 5 (1 г удобрения на 450 г субстрата), не наблюдалось.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

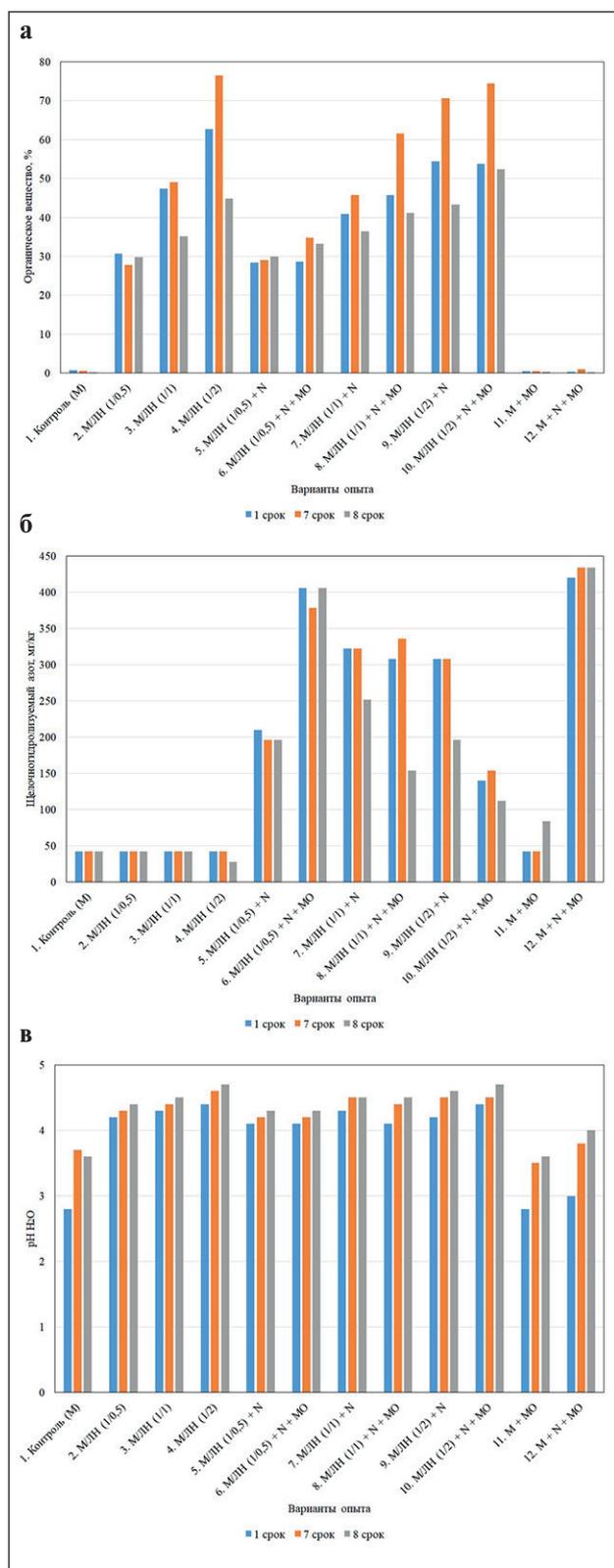


Рис. 1. Агрохимические свойства смесей на основе ЛН по срокам, где 1 срок – 3 дня компостирования, 7 срок – 82 дня компостирования, 8 срок – 6 месяцев после окончания компостирования

Количество вносимого лигносульфоната натрия влияло на динамику изменения содержания органического вещества и щелочногидролизуемого азота, в смеси мелкозема с ЛН, N и MO. Для вариантов с соотношением М/ЛН в соотношении 1/0,5 и 1/1 содержание органического вещества выше по сравнению с вариантами, содержащими N (на 0,3 и 4,8%, соответственно), но ниже, чем у вариантов только с ЛН (на 2,3 и 1,8%, соответственно). ЩГА в присутствии микроорганизмов при этом в варианте с соотношением 1/0,5 выше, чем только с N (210 мг/кг в варианте М/ЛН + N против 406 мг/кг в варианте М/ЛН + N + MO), но для соотношения 1/1 становится ниже, чем в аналогичной пробе только с N (322 мг/кг в варианте М/ЛН + N против 308 мг/кг в варианте М/ЛН + N + MO). Варианты с соотношением М/ЛН (1/2) демонстрируют снижение как содержания органического вещества (62,7% для варианта только с М/ЛН, 54,4% для М/ЛН + N и 53,8% для М/ЛН + N + MO), так и щелочногидролизуемого азота (308 мг/кг для М/ЛН + N против 140 мг/кг для М/ЛН + N + MO) (рис. 1).

Оценка агрохимического состояния почвоподобных тел по вариантам опыта, проводимая как в конце эксперимента (7 срок), так и повторно после высушивания (8 срок), показала, что реакция среды всех образцов с добавками со временем становилась менее кислой. Во всех вариантах, кроме контрольного (вариант 1 – мелкозем), значения кислотности снижались (хоть и незначительно, но стабильно для всех образцов) даже после окончания компостирования, что указывает на влияние внесенных компонентов и продолжение реакции нейтрализации субстрата (рис. 1в).

Динамика изменения органического вещества схожа во всех образцах, кроме вариантов с соотношением М/ЛН (1/0,5). В остальных случаях пробы с добавками характеризовались повышением содержания органического вещества через 82 дня компостирования (7 срок) от 3,24% до 38,27% (максимальное значение, вариант 10 – М/ЛН (1/2) + N + MO) и последующим снижением уровня содержания органического вещества ниже начального на 2,62% (вариант 10 – М/ЛН (1/2) + N + MO) – 28,58% (вариант 4 – М/ЛН (1/2)). Вероятно, такая реакция обусловлена ростом микробной массы на питательной среде ЛН, при этом прослеживается тенденция повышения количества органического вещества с увеличением концентрации лигносульфоната натрия и внесением микроорганизмов. При высушивании субстрата (8 срок) отмечалось снижение содержания органического вещества [48]. В вариантах с соотношением компонентов М/ЛН (1/0,5) динамика изменения ОВ в зависимости от добавок менее выражена, а количество ОВ после окончания компостирования и высушивания проб (8 срок) становилось

выше или соответствовало начальному содержанию ОВ. В вариантах 11 (М + МО) и 12 (М + N + МО) существенных изменений не наблюдалось. Следует отметить, что в варианте 12 (М + N + МО) на 7 сроке отбора содержание органического вещества повышалось до 1% и затем сокращалось через 6 месяцев после окончания компостирования (8 срок) до 0,3%, что может указывать на пролонгированное действие микроорганизмов и их возможность развиваться на чистом мелкозем в присутствии азотсодержащего удобрения (рис. 1а).

Изменение содержания щелочногидролизуемого азота однонаправленно по динамике с изменением органического вещества в пробах. Из общей схемы выделяются образцы с соотношением М/ЛН (1/0,5), где не наблюдалось существенных изменений содержания ЩГА во времени (рис. 1б).

Проверка полученных смесей на фитотоксичность показала 100% всхожесть семян во всех вариантах опыта. Ростки редиса появились одновременно на второй день проращивания, к концу срока проращивания достигали 3–4 см высоты (табл. 3).

Наиболее успешный вариант выращивания редиса наблюдался для смеси с соотношением М/ЛН (1/0,5) в присутствии азотного удобрения и микроорганизмов (прирост сухой биомассы составил 82,35%) (табл. 3).

После завершения опыта и оценки образцов на содержание органического вещества, щелочногидролизуемого азота и рН Н₂О среды провели анализ полученных данных с использованием машинного вычисления.

Расчеты проводили с учетом данных агрохимического анализа промежуточных проб всех вариантов по следующим предикторам:

1. Начальная концентрация внесенных добавок (ЛН, N, МО);
2. Количество дней компостирования по всем срокам отбора проб с 1 по 8 сроки.

Провели регрессионный анализ для выявления зависимости между перечисленными факторами и содержанием ОВ, ЩГА азота и рН Н₂О (табл. 4, 5).

По данным анализа можно оценить наличие и направление (прямая или обратная) зависимости между предикторами и изменяемыми величинами и степень их влияния друг на друга. Полученные значения регрессионной статистики (табл. 4) указывают на следующее:

1. Доля объясненных вариаций (коэффициент детерминации: R-квадрат) для всех трех оцениваемых показателей выше 0,8 (для ОВ выше 0,9), что доказывает высокое качество используемой модели;
2. Нормированный R² снижается незначительно, подтверждая оптимальный выбор количества предикторов.

Исходя из вышесказанного, можно предположить, что коэффициенты влияния дают достаточно точное представление о значимости каждого фактора в формуле линейной регрессии. Анализ числовых значений коэффициентов показал, что на содержание ОВ в первую очередь влияет количество внесенного ЛН, изменение количества ЩГА происходит при добавлении N, а кислотность почвы зависит от внесения ЛН (табл. 5).

Таблица 3

Всхожесть и сухой вес семян и ростков редиса

Варианты опыта на фитотоксичность	Количество проросших семян, %	Сухая масса семян, г	Прирост сухой биомассы, %
1. Контроль (М)	100	0,12	21,74
2. М/ЛН (1/0,5)	100	0,12	33,33
3. М/ЛН (1/1)	100	0,12	50,00
4. М/ЛН (1/2)	100	0,13	8,33
5. М/ЛН (1/0,5) + N	100	0,12	16,67
6. М/ЛН (1/0,5) + N + МО	100	0,09	82,35
7. М/ЛН (1/1) + N	100	0,14	30,43
8. М/ЛН (1/1) + N + МО	100	0,14	14,29
9. М/ЛН (1/2) + N	100	0,12	14,81
10. М/ЛН (1/2) + N + МО	100	0,12	15,38
11. М + МО	100	0,12	21,74
12. М + N + МО	100	0,10	33,33
13. Контроль (на фильтре)	100	0,13	36,00

Таблица 4

Данные регрессионной статистики

Показатель	ОВ, %	ЩГА, мг/кг	pH H ₂ O
Множественный R	0,96	0,91	0,90
R-квадрат	0,92	0,83	0,82
Нормированный R-квадрат	0,91	0,82	0,81
Стандартная ошибка	6	60	0,24
Наблюдения	96	96	96

Таблица 5

Коэффициенты, полученные в результате применения регрессионного метода для оценки степени влияния предикторов на изменяемые факторы содержания ОВ, ЩГА и pH H₂O

Показатель	ОВ, %	ЩГА, мг/кг	pH H ₂ O
У-пересечение	-0,16	40,61	3,18
Срок, дни	-0,0002	-0,0625	0,0011
Внесение ЛН, г/г	81,67	25,36	1,96
Внесение N, мг/г	-0,63	116,22	0,09
Внесение МО, мл/мл	0,80	2,99	-0,0003

Полученные в результате расчетов значения согласуются с опытными данными и являются логически непротиворечивыми, что визуально подтверждается графиками сходимости, на которых для каждого изменяющегося фактора построены зависимости между опытными и рассчитанными по формуле линейной регрессии данными (рис. 2).

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Как уже было отмечено, для всех смесей с лигносульфонатом натрия наблюдался рост содержания органического вещества и сдвиг реакции среды в нейтральную сторону (рис. 1а и 1в). Внесение минерального азотного удобрения являлось ключевым фактором повышения содержания щелочногидролизующего азота (рис. 1б). Регрессионный анализ подтвердил, что основные предикторы, имеющие наибольший вес в формуле линейной регрессионной зависимости и имеющие положительное влияние – это концентрация ЛН в смеси для содержания органического вещества и pH среды, и концентрация N для содержания ЩГА (табл. 5). Остальные предикторы влияют на изменяемые факторы следующим образом:

- для содержания ОВ без учета фактора, имеющего основное значение (концентрация ЛН): дополнительное внесение МО имеет положительное влияние, отрицательное – внесение N и количество дней компостирования;

- для содержания ЩГА (без учета внесения N): положительное влияние имеют концентрация ЛН и внесение МО, но отрицательное влияние – количество дней компостирования;
- для pH (без учета концентрации ЛН): внесение N и срок компостирования имеют положительное влияние, но отрицательное – внесение МО.

Такие выводы показывают общее направление влияния добавок на смесь, но не отражают сути происходящих процессов при взаимодействии компонентов во времени. Рассмотрим динамику измеряемых факторов для лучшего понимания механизмов взаимодействия между ними и предикторами, взяв за основу соотношение мелкозем/лигносульфонат натрия в смеси.

5.1. Почвогрунты с соотношением М/ЛН – 1/0,5. Внесение ЛН повышало содержание ОВ в начале опыта (1 срок) до 30,7% для варианта только с ЛН (вариант 2 – М/ЛН), но относительно этого варианта содержание ОВ было ниже на 2,3% для смеси с N (вариант 5 – М/ЛН + N) и на 2% для смеси с N + МО (вариант 6 – М/ЛН + N + МО) (рис. 1). К 8 сроку содержание ОВ уменьшалось относительно начального только для смеси с ЛН без дополнительных добавок (на 0,9%). Но в вариантах 5 и 6 (М/ЛН + N и М/ЛН + N + МО) отмечено увеличение содержания ОВ относительно начального на 1,6% и 4,5%, соответственно (рис. 1а). Вероятно, снижение количества ОВ в начале опыта может свидетельствовать о том, что некоторое его количество израсходовалось для

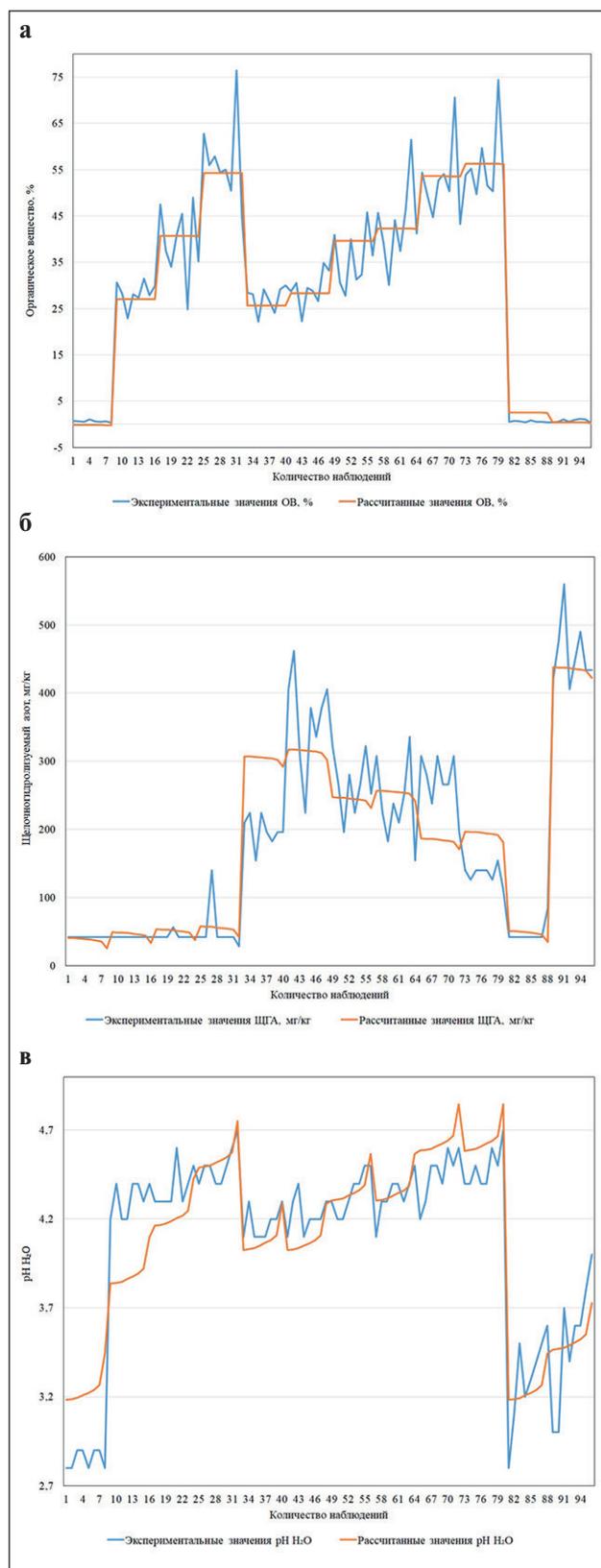


Рис. 2. Графики сходимости между опытными и расчетными данными для содержания ОВ (график а), ЩГА (график б) и показателя pH H₂O (график в)

питания МО, а дальнейшее увеличение показывало рост пула бактерий, при этом прирост массы бактерий был выше там, где использовалось дополнительное внесение МО. Таким образом, когда содержание ОВ в смеси оставалось на одном уровне или немного росло относительно начального, то предположительно его биодоступность в почве увеличивалась. Следует отметить, изменение содержания ОВ в пробе только с ЛН через 82 дня компостирования (7 срок) снижалось относительно начального содержания на 2,9%, но затем к 8 сроку вновь увеличивалось на 2%. Такие результаты можно объяснить как эмиссией углерода в процессе компостирования с последующей секвестрацией его из атмосферы при высушивании пробы, так и тем, что МО, находящиеся в М, способны перерабатывать ОВ из ЛН и развиваться на нем даже без дополнительного внесения N или культур бактерий.

Содержание ЩГА, как видно из рис. 1б, напрямую зависит только от внесения N, но МО способствовали его удержанию и сохранению в субстрате – вариант 5 (М/ЛН + N) содержит на 196 мг/кг ЩГА меньше, чем вариант 6 (М/ЛН + N + МО) на 1 сроке. Изменение содержания ЩГА к окончанию опыта незначительное – для варианта 5 (М/ЛН + N) уменьшилось на 6,7% относительно начального, для варианта 6 (М/ЛН + N + МО) значение не изменилось к 8 сроку, хотя на 7 сроке было на 6,9% ниже начального (рис. 1б). По-видимому, процесс потребления МО минерального азота соответствовал по интенсивности процессу минерализации ими органического азота, позволяя сохранять начальный уровень содержания ЩГА.

Реакция среды в течение всего периода исследования увеличилась с 2,8-2,9 единиц pH для М до 4,4 в варианте 2 (М/ЛН) и до 4,3 в вариантах 5 (М/ЛН + N) и 6 (М/ЛН + N + МО) (рис. 1в).

Тест на фитотоксичность показал 100% всхожесть семян редиса (табл. 3), при этом прирост сухой биомассы увеличивался в следующем порядке: вариант 2 (М/ЛН), вариант 5 (М/ЛН + N) и вариант 6 (М/ЛН + N + МО). Наилучший результат (прирост сухой биомассы 82,35%) отмечен в смеси (М/ЛН = 1/0,5) + N + МО (табл. 3). Такие результаты, вероятно, были достигнуты как за счет высокого содержания ЩГА (406 мг/кг – максимальное значение среди всех смесей с ЛН), так и оптимального отношения доступного ОВ в субстрате, что подтверждает сравнение с вариантом 12 (М + N + МО), содержащим на 6,5% больше ЩГА (434 мг/кг) без ЛН, при меньшем приросте биомассы (рис. 1а и 1б).

5.2. Почвогрунты с соотношением М/ЛН – 1/1.

Как и для смесей с соотношением М/ЛН – 1/0,5, после внесения всех добавок на 1 сроке наибольшее содержание ОВ отмечено в смеси только с ЛН (вари-

ант 3 – М/ЛН), содержание ОВ в смеси М/ЛН + N + МО (вариант 8) было ниже (на 1,8%) и самое низкое содержание (на 6,6% ниже, чем в варианте 3 (М/ЛН)) наблюдалось в смеси только с N (вариант 7 – М/ЛН + N) (рис. 1а). Через 82 дня компостирования (7 срок) содержание ОВ относительно начального выросло на 1,5% для варианта 3 (М/ЛН), на 4,9% для варианта 7 (М/ЛН + N) и на 15,8% – для варианта 8 (М/ЛН + N + МО). Через 6 месяцев после окончания компостирования (8 срок) содержание ОВ упало относительно начального также во всех вариантах на 12,3% (вариант 3 – М/ЛН), 4,4% (вариант 7 – М/ЛН + N) и 4,5% (вариант 8 – М/ЛН + N + МО) (рис. 1а). При этом количество ЩГА в вариантах 7 и 8 (М/ЛН + N и М/ЛН + N + МО) с внесением удобрения снизилось относительно начального на 22% и 50% соответственно (рис. 1б). Полученные результаты указывают на интенсивные процессы поглощения минерального азота для питания МО и увеличение массы их пула. Рост содержания ОВ в процессе компостирования наблюдался в варианте 3 (М/ЛН), где не вносили дополнительных добавок, что подтверждает предположение, выдвинутое выше о взаимодействии МО, обитающих в исходном М и ЛН (рис. 1).

Реакция среды в течение опыта увеличилась с 2,8–2,9 единиц рН для М до 4,5 по всем вариантам опыта (рис. 1в).

Тест на фитотоксичность показал 100% всхожесть семян редиса, при этом прирост сухой биомассы увеличивался в следующем порядке: вариант 8 (М/ЛН + N + МО), вариант 7 (М/ЛН + N) и вариант 3 (М/ЛН). Таким образом, наилучший результат для соотношения М/ЛН = 1/1 был получен при проращивании растения редиса в присутствии смеси только с ЛН (прирост сухой биомассы 50%) (табл. 3).

5.3. Почвогрунты с соотношением М/ЛН – 1/2.

После внесения всех добавок в смеси содержание ОВ на 1 сроке уменьшалось в порядке: смесь М/ЛН (4 вариант, 62,7%) > смесь М/ЛН + N (9 вариант, 54,4%) > смесь М/ЛН + N + МО (10 вариант, 53,8%) (рис. 1а). Через 82 дня компостирования (7 срок) содержание ОВ относительно начального увеличилось во всех вариантах на 13,8%, 16,2% и 20,6% соответственно, а через 6 месяцев после окончания компостирования (8 срок) содержание ОВ упало относительно начального на 17,9%, 11,1% и 1,4% соответственно для вариантов 4 (М/ЛН), 9 (М/ЛН + N) и 10 (М/ЛН + N + МО) (рис. 1а). Как видно из этих результатов, высокое начальное содержание ОВ способствовало более интенсивному росту содержания ОВ в процессе компостирования. Вероятно, это говорит о лучшем развитии микробной массы при увеличении количества ОВ для питания, при этом, как и для смесей с соотношением М/ЛН – 1/1, до-

полнительное внесение N способствовало процессу накопления ОВ (рис. 1а и 1б). В смесях с внесением N содержание ЩГА снижалось не только ко времени окончания опыта на 36,4% для варианта 9 (М/ЛН + N) и на 20% для варианта 10 (М/ЛН + N + МО), но уже через 3 дня компостирования (1 срок) сильно различалось между вариантом 9 (М/ЛН + N – 308 мг/кг) и вариантом 10 (М/ЛН + N + МО – 140 мг/кг) (рис. 1б). Это может означать, что для соотношения М/ЛН – 1/2 количества N было изначально недостаточно для поддержания более высокого уровня содержания ЩГА. На 7 сроке для варианта 10 (М/ЛН + N + МО) наблюдалось повышение содержания ЩГА на 10%, но затем снизилось к 8 сроку и составило 80% от начального (рис. 1б).

Реакция среды в течение опыта увеличилась с 2,8–2,9 единиц рН для М до 4,7 в вариантах 4 (М/ЛН) и 10 (М/ЛН + N + МО) и до 4,6 в варианте 9 (М/ЛН + N) (рис. 1в).

Тест на фитотоксичность показал 100% всхожесть семян редиса, прирост массы увеличивался от варианта 4 (М/ЛН) к варианту 9 (М/ЛН + N) и затем варианту 10 (М/ЛН + N + МО). Таким образом, наиболее успешный результат для соотношения М/ЛН = 1/2 был получен при проращивании растения редиса в присутствии смеси М/ЛН + N + МО (прирост сухой биомассы 15,38%). Проращивание растения редиса в присутствии смеси М/ЛН = 1/2 имело худшие результаты среди всех вариантов (прирост сухой биомассы 8,33%) (табл. 3).

Полученные результаты динамики содержания ОВ во время компостирования ЛН соотносятся с результатами, описанными Davide Savy et al [48], когда в опыте с компостированием в течение 180 дней с добавками, разработанными на основе лигнина для изучения микробных сообществ, количество ОВ сначала увеличивалось, а затем сокращалось. Был сделан вывод о прекращении достаточного питания МО в результате гумификации ОВ и перехода его в менее доступную для разложения форму. Можно предположить аналогичную динамику ОВ и при проведении данного эксперимента. Таким образом, полученные смеси не только демонстрировали наличие высокого содержания ОВ, а при внесении минерального удобрения еще и ЩГА, но и с высокой вероятностью, тем не менее требующей дополнительного изучения, постепенно могли трансформироваться в гуминовые кислоты, являющиеся основой почвы. Применение таких смесей в качестве добавки к плодородному слою почвы, наносимой на поверхность рекультивированных техногенно-нарушенных территорий, в перспективе позволит снизить количество используемой для рекультивации почвы и повысить ее агрохимические показатели за счет действия ЛН как наноудобрения,

постепенно высвобождающего углерод и азот для питания почвенных МО и растений.

Проведенное исследование позволило выявить закономерности зависимости между начальными компонентами и их количеством и итоговыми значениями агрохимических показателей смесей для рекультивации отвалов карьеров на основе ЛН, а также позволило оценить процессы, протекающие при компостировании этих смесей. Анализ результатов на проверку фитотоксичности и показателей агрохимического состава позволяет говорить о хорошем потенциале полученных смесей для применения в качестве добавки к материалу отвалов карьеров при их рекультивации. Изученные механизмы воздействия компонентов друг на друга могут служить основой для планирования и разработки новых смесей с использованием тех же компонентов, но отвечающих заранее заданным итоговым параметрам. Таким образом, применение ЛН при рекультивации техногенно-нарушенных территорий будет способствовать утилизации отходов деревообрабатывающей промышленности, послужит основой для разработки и создания почвоподобных тел с заданными свойствами и позволит использовать его как наноудобрение.

ВЫВОДЫ

Варианты смесей мелкозема с лигносульфонатом натрия в зависимости от части лигносульфоната натрия: 0,5; 1; 2 без дополнительных добавок – имели содержание органического вещества 29,8%, 35,2% и 44,8%, соответственно. Влияния внесения ЛН на содержание ЩГА не выявлено, его уровень для всех смесей соответствовал уровню содержания в мелкоземе 42 мг/кг.

При добавлении к смесям с соотношением компонентов М/ЛН – 1/0,5, 1/1 и 1/2 по 1 г минерального азотного удобрения содержание органического вещества возросло и составило 30; 36,5; и 43,3%, соответственно. Содержание щелочногидролизующего азота составило 196, 252 и 196 мг/кг, соответственно.

Внесение жидкой культуры бактерий в присутствии азотного удобрения для смесей с лигносуль-

фонатом натрия при тех же условиях компостирования и высушивания приводило к максимальному увеличению содержания органического вещества для каждого из соотношений М/ЛН: 33,2; 41,2; 52,4%. Отмечено максимальное значение содержания ЩГА среди всех исследованных смесей для варианта М/ЛН (1/0,5) + N + МО – 406 мг/кг.

Варианты без внесения лигносульфоната натрия на фоне добавления к мелкозему микроорганизмов как в присутствии азотного удобрения, так и без него, в том числе контрольный вариант, не выявили существенных изменений содержания органического вещества и уровня содержания щелочногидролизующего азота.

Реакция среды всех проб с ЛН увеличивалась к концу опыта с 2,8–2,9 единиц рН для исходного М до 4,3–4,7 единиц рН в зависимости от добавок и их сочетания. Внесение в мелкозем микроорганизмов без использования ЛН как на фоне азотного удобрения, так и без него содействовали раскислению до 4,0 и 3,6 единиц рН соответственно.

Проведенный регрессионный анализ полученных опытных данных показал, что наибольшее влияние на содержание органического вещества и кислотности почвы оказывает концентрация лигносульфоната, а на содержание щелочногидролизующего азота – внесение азотного удобрения. Содержание органического вещества в смеси увеличивалось в соответствии со сроком компостирования при достаточном увлажнении. Дополнительное внесение микроорганизмов и азотного удобрения приводило к увеличению содержания органического вещества, использование только азотного удобрения способствовало снижению количества ОВ. При этом содержание ОВ и ЩГА со временем снижалось, а значение рН возрастало.

Результаты анализа на фитотоксичность субстрата позволяют говорить о 100% всхожести растения редиса при проращивании его в присутствии всех полученных смесей лигносульфонатом. Лучшие результаты всхожести и прироста сухой массы показала смесь с содержанием (М/ЛН = 1/0,5) + N + МО (прирост сухой массы 82,35% и 100% всхожесть).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Stockmann U., Minasny B., McBratney A.B. Monitoring changes in global soil organic carbon stocks from space. *Remote Sensing of Environment*. 2022; 281: 113260. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113260>
2. Wang J., Zhen J., Hu W., Chen S., Lizaga I., Zeraatpisheh M., Yang Xi. Remote sensing of soil degradation: Progress and perspective. *International Soil and Water Conservation Research*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.03.002>

3. Zika M., Erb K.-H. The global loss of net primary production resulting from human-induced soil degradation in drylands. *Ecological Economics*. 2009; 69(2): 310–318. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.06.014>
4. Mi J., Huping H., Simit R., Yongjun Y., Shaoliang Zh., Yifei H., Chen W., Fuyao Ch. Effect of crop cultivation on the soil carbon stock in mine dumps of the Loess Plateau, China. *Science of The Total Environment*. 2020; 741: 139809. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139809>
5. Mukhopadhyay S., Maiti S.K., Masto R.E. Development of mine soil quality index (MSQI) for evaluation of reclamation success: A chronosequence study. *Ecological Engineering*. 2014; 71: 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.07.001>
6. Sullivan J., Aggett J., Amacher G., Burger J. Financial viability of reforestation reclaimed surface mined lands, the burden of site conservation costs, and carbon payments as reforestation incentives. *Resources Policy*. 2006; 30: 247–258. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2006.03.001>
7. Bonifazi G., Cutaia L., Massacci P., Roselli I. Monitoring of abandoned quarries by remote sensing and in situ surveying. *Ecological Modelling*. 2003; 170 (2–3): 213–218. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(03\)00228-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(03)00228-X)
8. Abakumov E., Zverev A., Suleymanov A., Suleymanov R. Microbiome of post-technogenic soils of quarries in the Republic of Bashkortostan (Russia). *Open Agriculture*. 2020; 5 (1): 529–538. <https://doi.org/10.1515/opag-2020-0053>
9. Gentili R., Casati E., Ferrario A., Monti A., Montagnani Ch., Caronni S., Citterio S. Vegetation cover and biodiversity levels are driven by backfilling material in quarry restoration. *CATENA*. 2020; 195: 104839. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104839>
10. Soliveres S., Gutiérrez-Acevedo E., Moghli A., Cortina-Segarra J. Effects of early irrigation and compost addition on soil and vegetation of a restored semiarid limestone quarry are undetectable after 13 years. *Journal of Arid Environments*. 2021; 186: 104401. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104401>
11. Abakumov E.V., Suyundukov Ya.T., Pigareva T.A., Semenova I.N., Khasanova R.F., Biktimerova G.Ya., Rafikova Yu.S., Ilbulova G.R. Biological and sanitary evaluation of Sibaisky quarry dumps of the Bashkortostan Republic. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2016; 95(10): 929–934. (In Russ.). <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2016-95-10-929-934>
12. Soliveres S., Gutiérrez-Acevedo E., Moghli A., Cortina-Segarra J. Effects of early irrigation and compost addition on soil and vegetation of a restored semiarid limestone quarry are undetectable after 13 years. *Journal of Arid Environments*. 2021; 186: 104401. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104401>
13. Murali S., Asokan P., Morchhale R.K. Chapter 12 – *High volume fly ash utilization for reclamation of wastelands with special reference to mine spoil and ash back-haul areas for agriculture and forestry*. Editor(s): Gouri Sankar Bhunia, Uday Chatterjee, Anil Kashyap, Pravat Kumar Shit. *Modern Cartography Series*. Cambridge, Massachusetts: Academic Press; 2021; 10: 243–263. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823895-0.00029-4>
14. Zornoza R., Faz A., Carmona D.M., Martinaz-Martinez S., Acosta J.A. Plant Cover and Soil Biochemical Properties in a Mine Tailing Pond Five Years After Application of Marble Wastes and Organic Amendments. *Pedosphere*. 2012; 22 (1): 22–32. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(11\)60188-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60188-4)
15. Navarro-Pedreño J., Belén Almendro-Candel M., Gómez I., Jordán M.M., Pardo F. Chapter 14 - *Organic Mulching to Improve Mining Soil Restoration*. Editor(s): Jaume Bech, Claudio Bini, Mariya A. Pashkevich. *Assessment, Restoration and Reclamation of Mining Influenced Soils*. Cambridge, Massachusetts: Academic Press; 2017; 375–386. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809588-1.00014-1>
16. Zheng M., Huang Zh., Ji H., Qiu F., Zhao D., Bredar A.R.C., Farnum B.H. Simultaneous control of soil erosion and arsenic leaching at disturbed land using polyacrylamide modified magnetite nanoparticles. *Science of The Total Environment*. 2020; 702: 134997. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134997>
17. Ortega R., Domene M.A., Soriano M., Sánchez-Marañón M., Asensio C., Miralles I. Improving the fertility of degraded soils from a limestone quarry with organic and inorganic amendments to support vegetation restoration with semiarid Mediterranean plants. *Soil and Tillage Research*. 2020; 204: 104718. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104718>
18. Prasad M.N.V., Nakbanpote W., Phadermrod C., Rose D., Suthari, S. Mulberry and Vetiver for Phytostabilization of Mine Overburden. *Bioremediation and Bioeconomy*. 2016; 295–328. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-802830-8.00013-7>
19. O'Brien P.L., DeSutter T.M., Ritter S.S., Casey F.X.M., Wick A.F., Khan E., Matthees H.L. A large-scale soil-mixing process for reclamation of heavily disturbed soils. *Ecological Engineering*. 2017; 109, 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.09.015>
20. Merino-Martín L., Commander L., Mao Z., Stevens J.C., Miller B.P., Golos P.J., Dixon K. Overcoming top-soil deficits in restoration of semiarid lands: Designing hydrologically favourable soil covers for seedling emergence. *Ecological Engineering*. 2017; 105: 102–117. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.04.033>

21. Sampaio A.D., Pereira P.F., Nunes A., Clemente A., Salgueiro V., Silva C., Mira A., Branquinho Cr., Salgueiro P. Bottom-up cascading effects of quarry revegetation deplete bird-mediated seed dispersal services. *Journal of Environmental Management*. 2021; 298: 113472. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113472>
22. Carvalho C., Oliveira A., Caeiro E., Miralto O., Parrinha M., Sampaio A., Silva C., Mira A., Salgueiro P.A. Insect pollination services in actively and spontaneously restored quarries converge differently to natural reference ecosystem. *Journal of Environmental Management*. 2022; 318: 115450. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115450>
23. Luna L., Pastorelli R., Bastida F., Hernández T., García C., Miralles I., Solé-Benet A. The combination of quarry restoration strategies in semiarid climate induces different responses in biochemical and microbiological soil properties. *Applied Soil Ecology*. 2016; 107: 33–47. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.05.006>
24. Tomczyk A., Kubaczyński A., Szewczuk-Karpisz K. Assessment of agricultural waste biochars for remediation of degraded water-soil environment: Dissolved organic carbon release and immobilization of impurities in one- or two-adsorbate systems. *Waste Management*. 2023; 155: 87–98. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.10.039>
25. Ariyanta H.A., Sari F.P., Sohail A., Restu W.K., Septiyanti M., Aryana N., Fatriasari W., Kumar A. Current roles of lignin for the agroindustry: Applications, challenges, and opportunities. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023; 240: 124523. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124523>
26. Ерошина Д.М., Лысухо Н.А., Ракова Ю.С. Лигнин – образование, использование, хранение, воздействие на окружающую среду // Экологический вестник. 2010. 3. 109–118.
27. Shi W., Zhao H.-Y., Chen Y., Wang J.-S., Han B., Li C.-P., Lu J.-Y., Zhang L.-M. Organic manure rather than phosphorus fertilization primarily determined asymbiotic nitrogen fixation rate and the stability of diazotrophic community in an upland red soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2021; 319: 107535. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107535>
28. Химизация земледелия и природная среда / под ред. Минеева В.Г. М.: Агропромиздат, 1990. 287 с.
29. Sobek S., Tran Q.K., Junga R., Sajdak M., Werle S. Comparative assessment of liquid product from hydrothermal treatment of lignosulfonate in batch and nozzle reactors for aromatic compounds recovery. *Biomass and Bioenergy*. 2023; 172: 106768. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106768>
30. Yang J., Liu L., An X., Seta F.T., Li C., Zhang H., Luo B., Hu Q., Zhang R., Nie Sh., Cao H. Cheng Zh., Liu H. Facile preparation of lignosulfonate induced silver nanoparticles for high efficient removal of organic contaminants in wastewater. *Industrial Crops and Products*. 2021; 169: 113644. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113644>
31. Barbieri D.M., Hoff I., Mørk, M.B.E. Organosilane and lignosulfonate as innovative stabilization techniques for crushed rocks used in road unbound layers. *Transportation Geotechnics*. 2020; 22: 100308. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100308>
32. Vakili A.H., Ghasemi J., bin Selamat M.R., Salimi M., Farhadi M.S. Internal erosional behaviour of dispersive clay stabilized with lignosulfonate and reinforced with polypropylene fiber. *Construction and Building Materials*. 2018; 193: 405–415. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.213>
33. Ahmad U.M., Ji N., Li H., Wu Q., Song C., Liu Q., Ma D., Lu X. Can lignin be transformed into agrochemicals? Recent advances in the agricultural applications of lignin. *Industrial Crops and Products*. 2021; 170: 113646. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113646>
34. Lu J., Cheng M., Zhao Ch., Li B., Peng H., Zhang Y., Shao Q., Hassan M. Application of lignin in preparation of slow-release fertilizer: Current status and future perspectives. *Industrial Crops and Products*. 2022; 176: 114267. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114267>
35. Wang W., Hou Y., Huang W., Liu X., Wen P., Wang Y., Yu Zh., Zhou S. Alkali lignin and sodium lignosulfonate additives promote the formation of humic substances during paper mill sludge composting. *Bioresource Technology*. 2020. 124361. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124361>
36. Abdellah Y.A.Y., Shi Zh.-J., Sun Sh.-Sh., Luo Y.-S., Yang X., Hou W.-T., Wang R.-L. An assessment of composting conditions, humic matters formation and product maturity in response to different additives: A meta-analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2022; 366: 132953. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132953>
37. Волчатова И.В., Медведева С.А. Эффективность удобрения на основе гидролизного лигнина на серой лесной почве // Агрохимия. 2014. 11. 30–33.
38. Yurkevich M.G., Ikkonen E.N. Influence of sodium lignosulfonate on loamy soil and cucumber plants. *Russian journal of resources, conservation and recycling*. 2020; 7(2). Available at: <https://resources.today/PDF/01ECOR220.pdf> (in Russian). <https://doi.org/10.15862/01ECOR220>
39. Carter M.R., Gregorich E.G. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. 2nd Edition. Boca Raton, Florida: CRC Press; 2007.

40. Гильмутдинова Р.А., Мичурин С.В., Ковтуненко С.В., Елизарьева Е.Н. К вопросу об использовании и переработке отходов горно-обогатительных комбинатов Южного Урала // *Успехи современного естествознания*. 2017. 2. 68–73.
41. Беликова Г.И., Бердников П.Г., Ковалев С.Г., Салихов Д.Н. Полезные ископаемые республики Башкортостан (Золото). Часть 1 / под ред. Салихова Д.Н. Уфа: Экология, 2003. 222 с.
42. Атлас Республики Башкортостан / под ред. Ярапова И.М. Уфа: Китап, 2005. 419 с.
43. Шарипова Ю.Ю., Кузина Е.В., Мухаматдырова С.Р., Коршунова Т.Ю., Махмутов А.Р. Биотехнологические свойства нового штамма-нефтедеструктора *Acinetobacter Sp.* UOM 22 // *Интеграция науки и высшего образования в области био- и органической химии и биотехнологии: материалы XVI Всероссийской научной интернет-конференции* / редкол.: Р.У. Рабаев и др. Уфа: УНПЦ «Изд-во УГНТУ», 2022. 168 с.
44. Korshunova Y.Yu., Kuzina E.V., Mukhamatdyarova S.R., Loginov D.O., Sharipova Yu.Yu. Screening for hydrocarbon-oxidizing microorganisms resistant to heavy metals and sodium chloride. *Proceedings of the RAS Ufa Scientific Centre*. 2022. 3: 23–30. <https://doi.org/10.31040/2222-8349-2022-0-3-23-30>
45. Кузина Е.В., Рафикова Г.Ф., Мухаматдырова С.Р., Шарипова Ю.Ю., Коршунова Т.Ю. Микробиологический препарат для ускорения деструкции соломы и повышения плодородия почвы // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. 36 (9). 32–36.
46. King E.D., Ward M.K., Raney D.E. Two Simple Media for the Demonstration of Pyo-Cyanin and Fluorescin. *Journal of laboratory and clinical medicine*. 1954; 44: 301–307.
47. Филатов Н.Е., Полушин И.П., Кузнецов Н.С. Оценка всхожести семян редиса // *Современные проблемы и направления развития агроинженерии в России: сборник научных статей Международной научно-технической конференции*. Курск, 30 октября 2021 года. Курск: Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И.И. Иванова. 2021. 147–150.
48. Savy D., Mercl F., Cozzolino V., Spaccini R., Cangemi S., Piccolo A. Soil amendments with lignocellulosic residues of biorefinery processes affect soil organic matter accumulation and microbial growth. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2020; 8 (8): 3381–3391. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b07474>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дорогая Екатерина Сергеевна – аспирантка, Уфимский Институт биологии УФИЦ РАН, Уфа, Россия, ekaterina.s.dorogaya@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4553-1465>

Сулейманов Руслан Римович – доктор биологических наук, профессор, Отдел комплексных научных исследований КарНЦ РАН, Уфимский Институт биологии УФИЦ РАН, Петрозаводск, Уфа, Россия, soils@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7754-0406>

Кузина Елена Витальевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Уфимский Институт биологии УФИЦ РАН, Уфа, Россия, misshalen@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6905-0108>

Юркевич Мария Геннадьевна – кандидат сельскохозяйственных наук, заведующая лаборатории экологии и географии почв, Институт биологии – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра Карельского научного центра РАН (ИБ КарНЦ РАН), Петрозаводск, Россия, svirinka@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0458-5734>

Бахмет Ольга Николаевна – член-корреспондент РАН, доктор биологических наук, генеральный директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра Карельского научного центра РАН (КарНЦ РАН), Петрозаводск, Россия, bahmet@krc.karelia.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5093-3285>

ВКЛАД АВТОРОВ

Дорогая Е.С., Кузина Е.В. – проведение экспериментов.

Сулейманов Р.Р., Юркевич М.Г. – подготовка публикации.

Бахмет О.Н. – общее руководство работой.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 11.07.2023; одобрена после рецензирования 03.08.2023; принята к публикации 05.08.2023.