

УДК 598.2(477.75)

Технологические приемы улучшения качества компоста, полученного из органических отходов мусороперерабатывающего завода

Ржевская В. С.^{1,2}, Минкина Т. М.², Крыжко А. В.³, Бурлуцкая Е. И.¹, Лисовенко Р. В.¹

¹ Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского
Симферополь, Россия
viktoriyar45@mail.ru

² Южный федеральный университет имени М. Д. Сеченова
Ростов-на-Дону, Россия
tminkina@mail.ru

³ Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма
Симферополь, Россия

Проведено сравнительное исследование технологических приемов и способов обработки (адсорбция поллютантов, микробная биоремедиация) компоста, полученного на мусороперерабатывающем заводе. Компост получали из органических отходов на мусороперерабатывающем заводе путем сепарации органических отходов от остального мусора и высушивания в биобарабане без дополнительного внесения микроорганизмов. Полученный указанным методом компост содержал тяжелые металлы, превышающих ПДК. Для микробной ремедиации использовали консорциум молочнокислых бактерий, дрожжей и мицелиальный гриб рода *Trichoderma*, а в качестве адсорбента тяжелых металлов – биочар. Микробный консорциум получали путем совместного культивирования молочнокислых бактерий и дрожжей в жидкой питательной среде MRS в лабораторном биореакторе. Биочар получали путём пиролиза из шелухи подсолнечника путём варьирования конечной температуры от 500 °С до 700 °С. Компост, полученный из органических отходов на мусороперерабатывающем заводе, полностью и гибировал всхожесть семян гороха сорта Мадонна, а семян ржи сорта Марусенька – на 52 %, а также задерживал их прорастание на 2 недели и снижал морфометрические показатели растений. Использование таких технологических приемов как внесение адсорбента поллютантов, так и микробного консорциума, в компост, полученный на МПЗ, снижает его токсическое воздействие на ростовые процессы растений. Эффективность использования микробного консорциума и биочара снижает его токсическое воздействие на ростовые процессы растений превышает таковую у каждого технологического приема в отдельности. Изучение фитостимулирующих свойств при внесении в компост микробного консорциума и биочара показало увеличение длины надземной части ржи сорта Марусенька на 14,9 % и 22,0 % по сравнению с компостом, полученным на мусороперерабатывающем заводе; а у растений гороха сорта Мадонна – снизило ингибирование длины надземной части в 1,5 раза. Использование компоста, обработанного микробным консорциумом или биочаром в качестве субстрата позволяет использовать компост в качестве субстрата для выращивания растений.

Ключевые слова: коммунальные бытовые отходы, переработка органических отходов, биоремедиация, адсорбция поллютантов, биочар, микробный консорциум, тяжелые металлы, органическое удобрение.

ВВЕДЕНИЕ

Переработка твердых коммунальных отходов (ТКО) имеет мировое значение, в том числе и для Российской Федерации (Васильев и др., 2014; Гомоницкая и др., 2015). В настоящее время одной из проблем мусороперерабатывающих предприятий России является то, что для вторичной переработки может быть использовано не более 20–25 % от общего объема ТКО, в состав которых входит органическая фракция. Около 80 % органических отходов захоранивают на полигонах, что приводит к загрязнению окружающей среды (Заболотских и др., 2016). Сортировка ТКО и выделение из них органической фракции, для дальнейшей ее переработки до состояния удобрения, улучшит экологическую обстановку и повысит эффективность, а также рентабельность мусороперерабатывающих заводов (МПЗ).

Согласно одной из технологий, органическая фракция ТКО после сепарации подвергается процессу компостирования в биотермических барабанах. Компостирование представляет собой биотермический процесс разложения органического вещества в

результате деятельности аборигенной аэробной сапрофитной микрофлоры. В процессе компостирования температура поднимается до 50–60 °С, что приводит к подавлению патогенной микрофлоры, яиц санотропных мух. Компостирование происходит с применением принудительной аэрации – для предотвращения процесса гниения и при постоянном перемешивании – для увеличения удельной поверхности и гомогенизации. В результате компостирования образуется рассыпчатая масса, внешне напоминающая почву. По физико-механическим, агрохимическим, токсикологическим, ветеринарно-санитарным и гигиеническим показателям удобрения должны соответствовать нормативу ГОСТ Р 55571 – 2013. Компост является хорошим удобрением, так как содержит минеральные и органические вещества. Однако, не на всех заводах в результате переработки органической фракции ТКО получается компост, соответствующий ГОСТ Р 55571 – 2013, из-за содержания в нём – стекла, полимерных материалов, тяжелых металлов (Заболотских и др., 2016).

Для улучшения состава компоста возможно использовать различные подходы – введение в компостируемую массу адсорбентов поллютантов, микробную биоремедиацию и другие. Одним из материалов, обладающим адсорбционными свойствами и используемым для ремедиации почв, фильтрационных систем и показавшим в последние десятилетия немало положительных эффектов, является биочар (Biederman et al., 2013; Ahmad et al., 2014; Cayuela et al., 2014).

Биочар (биоуголь) – высокопористый материал, обладающий большой площадью поверхности, что способствует повышенной сорбции поллютантов и снижению их мобильности в загрязненных почвах (Зерщикова и др., 2011). Биочар получают из биомассы различного происхождения (древесные опилки, органические отходы, навоз) с помощью пиролиза при температурах от 200 до 800 °С в условиях ограниченного присутствия кислорода (Kookana, 2010).

Активное внедрение биочара в практику сельского хозяйства привело к повышению качества сельскохозяйственных почв (Попова, 2019). Биочар улучшает структуру почвы за счет изменения объемной плотности и размера почвенных агрегатов. Также он задерживает в почве влагу, способствует накоплению элементов питания в доступных растениям формах (LeCroya et al., 2013; Xua et al., 2013; Григорьян, 2016; Зинченко, 2020).

Помимо применения в сельском хозяйстве, биочар имеет огромную перспективу в переводе отходов в состояние материалов для вторичного использования (Разумов, 2015). Благодаря таким свойствам биочара, как высокая пористость и большая площадь поверхности для адсорбции, он может адсорбировать различные поллютанты, находящиеся в органических отходах в большом количестве. Присущие биочару свойства: сокращать выбросы в окружающую среду закиси азота и метана, долговременно изымать значительную часть углерода из обменного резервуара (Sohi et al., 2010; Fischer et al., 2012), открывают широкую перспективу его применения в переработке отходов на МПЗ.

Использование микроорганизмов для обезвреживания и переработки промышленных и коммунальных отходов повышает уровень протеолитической и целлюлозоразрушающей активности почвы. Совместное внесение в почву промышленных органических отходов и микробных препаратов, активизирует микробный ценоз, расширяет видовой состав почвенной микрофлоры и ускоряет заселение высшими растениями. Также повышается приживаемость высаженных черенков древесных культур, многолетних трав, используемых для фиторемедиации (Водолеев, 2014; Черданцева, 2016).

Исследование новых подходов при совместном использовании биочара и микробного консорциума, для повышения фитостимулирующих свойств компоста, полученного из органических отходов ТКО, является актуальным и требует дополнительных исследований (Gorovtsov, 2019).

Целью настоящей работы является выявление и оценка фитостимулирующих свойств компоста, полученного из органической части твердых коммунальных отходов, а также подбор технологических приемов и способов его обработки для дальнейшего использования в качестве органического удобрения.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалом исследования является компост, полученный из органических отходов мусороперерабатывающего завода в г. Санкт-Петербург. Органические отходы, отделённые от остального мусора, помещали в биобарабан без дополнительного внесения микроорганизмов и без подогрева в течение 2 суток сушили при постоянном вращении барабана. В результате этого образовался компост – рыхлая сыпучая масса темно-серого цвета. Влажность компоста – 45 %, массовая доля стекла размером 3–5 мм – 10 %, 5–10 мм – 10 % и более 10 мм – 10 %. Содержание органического вещества – 35 % на сухое вещество, рН водной вытяжки – 6,2, индекс токсичности 74. Гибель дафний при разбавлении <100 – менее 10%. Острая токсичность: при в/ж введении вытяжки без разведения – LD₅₀>5000,0. У компоста отсутствует кожно-резорбтивное, сенсibiliзирующее действие, раздражающее действие на кожу и на слизистую оболочку глаз. Для оценки фитостимулирующих свойств компоста, полученного из органической части ТКО и подбора способов его обработки, было заложено 2 серии опытов.

Схема опыта 1. Для проведения исследований по перспективности использования компоста, полученного из органических отходов, для посадки культурных растений или органического удобрения были использованы три варианта субстрата: компост, почвенная смесь и комбинация – компост с почвенной смесью в соотношении 1:1. Для определения всхожести и фитостимулирующей активности компоста, семена растений ржи и гороха высаживали в стаканы с субстратом по 30 штук. Полив растений проводили отстоянной водопроводной водой и однократно (за весь период опыта) внесённым 1 % микробным консорциумом молочнокислых бактерий и дрожжей (7 мл на один стакан почвы объемом 200 мл).

Схема опыта 2. В связи с тем, что компост, полученный из органических отходов на мусороперерабатывающем заводе, непригоден для прорастания семян для второго опыта в качестве контроля 1 использовали компост, однократно обработанный 1 % раствором микробного консорциума молочнокислых бактерий и дрожжей и выдержанный в течение одного месяца (табл. 1). В качестве контроля 2 использовали почвенную смесь. Для улучшения фитостимулирующих свойств компоста, полученного из органических отходов, использовали по отдельности 2 компонента – микробный консорциум молочнокислых бактерий, дрожжей и грибы рода *Trichoderma* (варианты опыта 3, 4, 5), а также биочар (варианты 6-10).

Микробный консорциум включает: штаммы молочнокислых бактерий *L. casei* IMB В-7343, *L. plantarum* IMB В-7344, *L. lactis* IMB В-7352, дрожжи *S. cerevisiae* IMB Y-5046, мицелиальный гриб *Trichoderma asperellum* F-1527. Микроорганизмы депонированы в Депозитории института микробиологии и вирусологии НАН Украины (г. Киев) и Всероссийской коллекции промышленных штаммов микроорганизмов (г. Москва).

Микробный консорциум получали путем совместного культивирования молочнокислых бактерий и дрожжей в жидкой питательной среде MRS. Культивирование микроорганизмов проводили в биореакторе Minifors 2 объемом 4 л (Ifors HT, Швейцария) при температуре 32 °С и 50 об/мин в течение 3-х суток. Учет численности микроорганизмов в консорциуме проводили методом предельных разведений. Микробный консорциум содержал клетки микроорганизмов: *L. casei* IMB В-7343 – $6,2 \times 10^8$ КОЕ/мл, *L. plantarum* IMB В-7344 – $7,4 \times 10^8$ КОЕ/мл, *L. lactis* IMB В-7352 – $1,2 \times 10^9$ КОЕ/мл, *S. cerevisiae* IMB Y-5046 – $2,7 \times 10^6$ КОЕ/мл, метаболиты микроорганизмов, экскретированные в культуральную жидкость, неизрасходованные компоненты среды MRS.

Мицелиальный гриб культивировали на скошенном агаре Сабуро 14 суток, смыв провели стерильной дистиллированной водой. Смыв гриба, содержащего смесь спор и фрагментов мицелия ($1,7 \cdot 10^9$ КОЕ/мл), в количестве 1 мл вносили в 100 мл суспензии, содержащей микробный консорциум молочнокислых бактерий и дрожжей.

Таблица 1

Схема опыта 2

№ варианта опыта	Варианты опыта		
	Варианты субстрата	Полив	
1	Контроль 1 (компост)	Вода	
2	Контроль 2 (почва)	Вода	
3	Внесение микробного консорциума в компост (далее по тексту, компост МК)	Компост МК	Вода
4		Компост МК : почва (1:5)	Вода
5		Компост МК : почва (1:10)	Вода
6	Внесение биочара в компост (далее по тексту, компост Б)	Компост Б	Вода
7		Компост Б : почва (1:5)	Вода
8			МК
9		Компост Б : почва (1:10)	Вода
10			МК

Для обработки компоста, полученного из органических отходов, вносили на 1 кг компоста, 1 мл микробного консорциума молочнокислых бактерий, дрожжей и гриба *T. asperellum* F-1527. Влажность субстрата доводили до 70 % и выдерживали в течение 4 месяцев. В опыте использовали компост, обработанный микробным консорциумом в качестве субстрата (вариант 3) и в смеси с почвой в соотношении 1:5 (вариант 4) и 1:10 (вариант 5). Полив вариантов 3–5 проводили отстоянной водопроводной водой.

Биочар получен из шелухи подсолнечника путём пиролиза на кафедре почвоведения и земельных ресурсов ЮФУ. Для этого 100 г сырья засыпали в толстостенный сосуд из нержавеющей стали с герметичной крышкой (реторту). Реторту помещали в лабораторную муфельную печь. Далее, путём варьирования конечной температуры от 500 °С до 700 °С, скорость нагрева 3–15 °С/мин и времени обработки от 10 до 45 минут было получено несколько образцов биочара. Выход биочара составил 34 % (Sushkova et al., 2021). Определение удельной площади поверхности и пористости образцов было выполнено на волюметрическом анализаторе ASAP 2020 Micromeritics по методу низкотемпературной адсорбции азота. Расчёт параметров пористости и поверхности осуществлялся методом БЭТ по N₂ в диапазоне равновесных значений P/P₀ = 0,05–0,33.

Биочар вносили в компост, полученный из органических отходов мусороперерабатывающего завода, в количестве 10 г на 1 кг компоста.

В опыте в качестве субстрата использовали компост, с внесением биочаром (вариант 6) и в смеси с почвой в соотношении 1:5 (вариант 7 и 8) и 1:10 (вариант 9 и 10). Полив вариантов 7 и 9 проводили отстоянной водопроводной водой, а вариантов 8 и 10–0,1% микробным консорциум молочнокислых бактерий и дрожжей. Полив растений проводили до увлажнения почвенного комка.

Эффективность внесения биочара и микробного консорциума изучали с помощью фитотестирования в лабораторных условиях. В качестве тест объектов использовали семена однодольных и двудольных растений – рожь сорта Марусенька и горох сорта Мадонна. Ростовые процессы растений изучали на ранних этапах развития (до 1 мес.) в вегетационных опытах. Всхожесть семян учитывали на 14-е сутки. Длину надземной части измеряли

линейкой с шагом 0,05 см с 14 по 28 сутки с периодичностью 7 дней. Ростовые показатели растений выражали в процентах к контролю (Грицаенко, 2003).

Все опыты проводили в трехкратной повторности. Статистическую обработку данных проводили по стандартным методикам (Trukhacheva, 2012), а также с использованием программы Microsoft Excel® 2016. Полученные результаты представлены на рисунках и в таблице в виде средней арифметической величины со стандартной ошибкой.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Компост, полученный из органических отходов мусороперерабатывающего завода, представляет собой комплекс различных химических элементов, которые могут служить как источник питания для растений, так и быть токсичными для растений. Было проведено сравнение содержания металлов в компосте с данными нормативных документов (табл. 2).

Таблица 2

Токсикологический показатель в компосте, полученном на мусороперерабатывающем заводе и нормативных документах

Наименование показателя	Массовая доля примесей токсичных элементов (валовое содержание), мг/кг сухого вещества, не более *	Величина ОДК (мг/кг) почвы с учетом фона (кларк), валовая форма **		Массовая доля примесей токсичных элементов в компосте, полученном на МПЗ, мг/кг	
		pH<5.5	pH>5.5	Валовая форма	Подвижная форма
Кадмий	5,0	1,0	2,0	5,0	-
Медь	300,0	66,0	132,0	300,0	50,0
Никель	100,0	40,0	80,0	80,0	4,0
Свинец	200,0	65,0	130,0	130,0	50,0
Цинк	500,0	110,0	220,0	1300,0	500,0
Ртуть	10,0	-	-	2,1	-
Мышьяк	10,0	5,0	10,0	2,0	-
Марганец	-	-	-	1500,0	100,0–500,0
Хром	300,0	-	-	50,0	6,0
Кобальт	-	-	-	-	5,0

Примечание к таблице. * – нормы по токсикологическому показателю (ГОСТ Р 55571-2013); ** – ориентировочно-допустимые концентрации (ОДК) тяжелых металлов в почве, утвержденные ГК, СЕН, РФ, 27.12.1994 пр. № 12.

Валовое содержание в компосте кадмия и меди выражается верхним значением ПДК токсических элементов в удобрениях органических на основе твердых бытовых отходов (ГОСТ Р 55571-2013), а цинка – превышает его в 2,6 раза. Содержащиеся в компосте валовые формы кадмия, меди и цинка превышают ориентировочно-допустимые концентрации тяжелых металлов в почве. Внесение в почву компоста, загрязнённого тяжелыми металлами, может привести к дестабилизации аборигенной микрофлоры и растений.

Изучение фитостимулирующих свойств компоста, полученного из органических отходов на МПЗ, показало ингибирование процесса прорастания семян культурных растений. Так, в результате посева семян растений в компост, наблюдалось полное отсутствие прорастания

семян гороха сорта Мадонна и 48 % всхожести семян ржи с запозданием на 2 недели по сравнению с контролем (почва), а в варианте смеси компоста и почвы отмечено снижение морфометрических показателей проростков (табл. 3). Можно предположить, что отсутствие и снижение всхожести семян тест-растений, и ингибирование морфометрического показателя по сравнению с контролем, вызвано наличием тяжелых металлов.

Таблица 3

Оценка фитостимулирующих свойств компоста, полученного из органических отходов на мусороперерабатывающем заводе

Субстрат	Всхожесть семян, %		Длина надземной части тест – растений, %	
	Рожь, сорт Марусенька	Горох, сорт Мадонна	Рожь, сорт Марусенька	Горох, сорт Мадонна
Компост	48	-	-	-
Контроль (почва)	85	73	100,00	100,00
Компост : почва (1:1)	54	46	95,67	60,71

Изучение влияния микробного консорциума на всхожесть семян ржи сорта Марусенька показало, что при использовании компоста, обработанного микробным консорциумом (компост МК) в качестве субстрата всхожесть увеличилась на 20 % по сравнению с контролем 1, а смесь компоста МК и почвы в соотношениях 1:5 и 1:10 – на 45–47 % соответственно (рис. 1). У растений гороха сорта Мадонна, использование смеси компоста МК и почвы в соотношениях 1:5 и 1:10, увеличило всхожесть семян на 38–50 % по сравнению с контролем 1. При использовании биочара отмечена аналогичная тенденция – смесь компоста с внесением биочара (компост Б) и почвы, независимо от соотношения, увеличило всхожесть семян ржи сорта Марусенька на 57–59 % по сравнению с контролем 1, а гороха сорта Мадонна – на 33–38 %. Данные показатели свидетельствуют о том, что такие технологические приемы, как микробная ремедиация консорциумом молочнокислых бактерий, дрожжей, мицелиальным грибом и адсорбирование тяжелых металлов биочаром, позволяют компосту, полученному из органических остатков МПЗ, иметь показатели всхожести семян, не имеющие достоверных отличий по сравнению с почвой (контролем 2).

Ингибирующее действие компоста, полученного из органических отходов, более ярко проявлялось на ранних этапах развития растений, но по мере их роста - становилось менее выраженным. Так, на 14 сутки компост (контроль 1) ингибировал рост надземной части на 53,08 % по сравнению с контролем 2 (почва), на 21 сутки – на 29,17 %, а на 28 – 13,5% (табл. 4). На 14 сутки, в результате внесения в компост микробного консорциума и биочара, не отмечено достоверных отличий по сравнению с контролем 1. На 28 сутки, наблюдалось увеличение длины надземной части ржи сорта Марусенька, в варианте внесения микробного консорциума на 14,9 % по сравнению с контролем 1, а в варианте с биочаром (6 вариант) – на 22,0 % (рис. 2). В результате внесения в компост как биочара, так и микробного консорциума, достоверных отличий по сравнению с почвой (контроль 2) не отмечено. Отсутствие достоверных отличий контроля 2 (почвы) и компоста, подвергнутого микробной ремедиации или внесению адсорбента, говорит об эффективности применённых технологических приемов для улучшения фитостимулирующих свойств компоста, получаемого на МПЗ и возможности его использования для культивирования растений.

При использовании в качестве субстрата смеси, обработанного микробным консорциумом компоста с почвой в соотношениях 1:5 и 1:10 (варианты 4 и 5), длина надземной части ржи сорта Марусенька на 28 сутки, не имела достоверных отличий с контролем 2 (рис. 2). В вариантах 6, 7, 9, с применением биочара для снижения токсичности

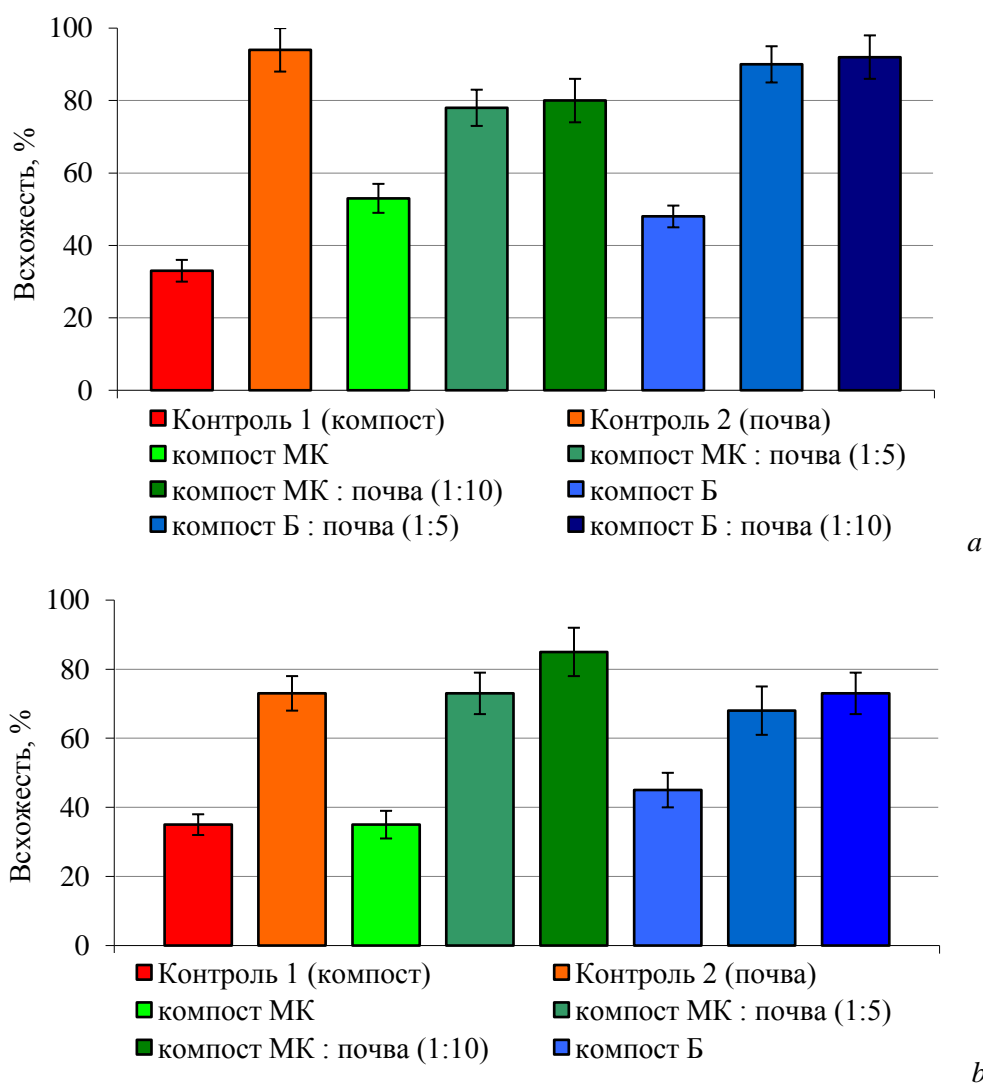


Рис. 1. Всхожесть семян ржи сорта Марусенька (а) и гороха посевного сорта Мадонна (б) в компосте, с различными вариантами внесения микробного консорциума и биочара

компоста при поливе растений ржи сорта Марусенька водой, также получены не достоверные отличия с контролем 2. В вариантах опыта 8 и 10, при поливе растений ржи сорта Марусенька микробным консорциумом, отмечена стимуляция роста надземной части на 6,8–30,7 % по сравнению с контролем 2 и на 23,4–51,1 % по сравнению с контролем 1. Таким образом, компост, подвергнутый микробной ремедиации или внесению адсорбента, можно использовать как в чистом виде, так и в смеси с почвой. Использование этих двух подходов совместно дает наибольший эффект, нежели каждого в отдельности.

Токсическое действие компоста (вариант 1) на длину надземной части гороха сорта Мадонна более выражено, чем в случае ржи. Чем меньше срок развития растения, тем больше проявляется токсическое действие компоста: на 14 сутки компост ингибировал рост надземной части на 83,05 % по сравнению с контролем 2, на 21 сутки – на 45,4 %, а на 28–43,7 % (табл. 5).

Компост МК (вариант 3), в качестве субстрата для посева семян, стимулировал длину рост надземной части растений гороха сорта Мадонна на 28 сутки на 50,0 %, а компост б – на 52,9 % по сравнению с контролем 1 (рис. 3). При использовании в качестве субстрата смеси

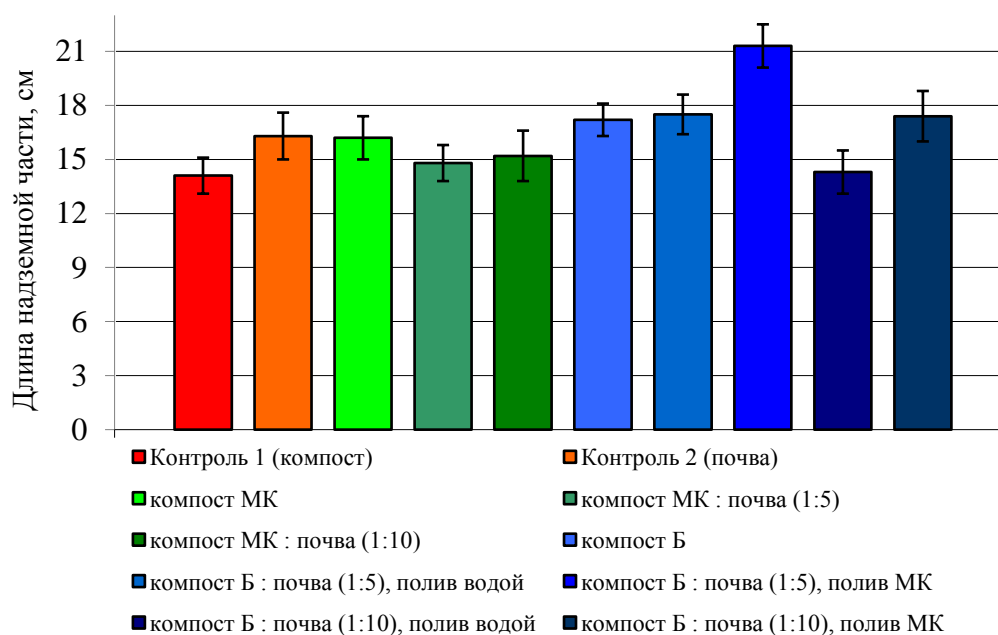


Рис. 2. Длина надземной части ржи сорта Марусенька на 28 сутки в компосте, с различными вариантами внесения микробного консорциума и биочара

Таблица 4

Влияние внесения микробного консорциума и биочара в компост, полученный из органических отходов, на длину надземной части ржи сорта Марусенька

Варианты опыта			Длина надземной части растений, см			
Варианты субстрата		Полив	№ варианта опыта	14 сутки	21 сутки	28 сутки
Контроль 1 (компост)		Вода	1	6,1±0,2	10,2±0,6	14,1±1,1
Контроль 2 (почва)		Вода	2	13,0±0,5	14,4±0,9	16,3±1,3
Внесение микробного консорциума в компост	Вода	Вода	3	7±0,4	13±0,9	16,2±1,2
	Вода	Вода	4	12±0,5	13,5±1,0	14,8±1,0
	Вода	Вода	5	11±0,5	14,7±0,8	15,2±1,4
Внесение биочара в компост	Компост Б	Вода	6	7±0,3	12±0,9	17,2±0,9
	Компост Б : почва (1:5)	Вода	7	14±0,6	16±1,0	17,5±1,1
		МК	8	14,5±0,5	17±1,1	21,3±1,2
	Компост Б : почва (1:10)	Вода	9	12±0,4	13±0,8	14,3±1,2
МК		10	12±0,3	15±0,7	17,4±1,4	

Таблица 5

Влияние внесения микробного консорциума и биочара в компост, полученный из органических отходов, на длину надземной части гороха посевного сорта Мадонна

Субстрат		Полив	№ варианта опыта	Длина надземной части растений, см		
				14 сутки	21 сутки	28 сутки
Контроль 1 (компост)		Вода	1	1,0±0,2	8,3±0,6	10,2±1,2
Контроль 2 (почва)		Вода	2	5,9±0,5	15,2±0,8	18,1±1,4
Внесение микробного консорциума в компост	Вода	Вода	3	2,1±0,7	13,4±0,6	15,3±1,5
	Вода	Вода	4	5,0±0,7	14,1±0,5	20,2±1,4
	Вода	Вода	5	4,5±1,0	17,2±0,7	20,4±1,2
Внесение биочара в компост	Вода	Вода	6	1,5±0,6	13,4±0,6	15,6±1,4
		Вода	7	2,2±0,6	14,3±0,5	16,3±1,5
	Компост Б : почва (1:10)	МК	8	6,3±0,9	17,2±0,8	19,6±1,2
		Вода	9	4,0±1,1	17,5±0,7	20,2±0,9
		МК	10	5,1±0,5	17,9±0,6	21,3±1,3

почвы и компоста МК в соотношении 1:5 и 1:10 (вариант 4 и 5), отмечена стимуляция длины роста надземной части растений гороха сорта Мадонна в 2 раза, по сравнению с контролем 1. В вариантах обработки микробным консорциумом компоста и использования его в качестве субстрата в чистом виде или смеси с почвой в отношениях 1:5 и 1:10, по сравнению с контролем 2 – не выявлено достоверных отличий. Аналогичная тенденция отмечена и при использовании внесении в компост биочара.

В результате проведенных исследований показано, что у растений гороха сорта Мадонна и биочара, и микробный консорциум снижают токсическое действие компоста, полученного на МПЗ в равной мере. Причем, использование компоста Б и компоста МК в качестве субстрата, снизило ингибирование длины надземной части гороха сорта Мадонна в 1,5 раза, а при смешивании их с почвой – в 2 раза. Таким образом, такие технологические приемы, как микробная ремедиация и внесение адсорбента поллютантов в компост, полученный на МПЗ, снижают его токсическое воздействие на ростовые процессы растений и позволяют использовать его в смеси с почвой в качестве субстрата для растений.

В результате проведенных нами исследований показано, что использование адсорбента поллютантов – биочара и микробного консорциума молочнокислых бактерий, дрожжей и грибов рода Триходерма, приводит к улучшению свойств компоста, полученного из органических отходов МПЗ. Данный компост по физико-химическим и санитарно-микробиологическим показателям, соответствует нормативным документам и только валовое содержание некоторых тяжелых металлов находилось на максимальном значении ПДК или превышало его. Стимуляция ростовых процессов растений при внесении биочара в компост, вероятно обусловлена именно снижением токсичности тяжелых металлов (Соколик, 2020) в компосте. Благодаря большой площади поверхности и высокой пористости, биочар эффективно адсорбирует различные типы органических и неорганических веществ, а также токсические элементы (Herath et al., 2016).

Известно, что металлы необходимы для жизнедеятельности микроорганизмов в качестве микроэлементов (Евдокимова и др., 1991; Колесников, 2012; Переломов и др., 2013). Многие микроорганизмы (бактерии, грибы, дрожжи), могут эффективно противостоять

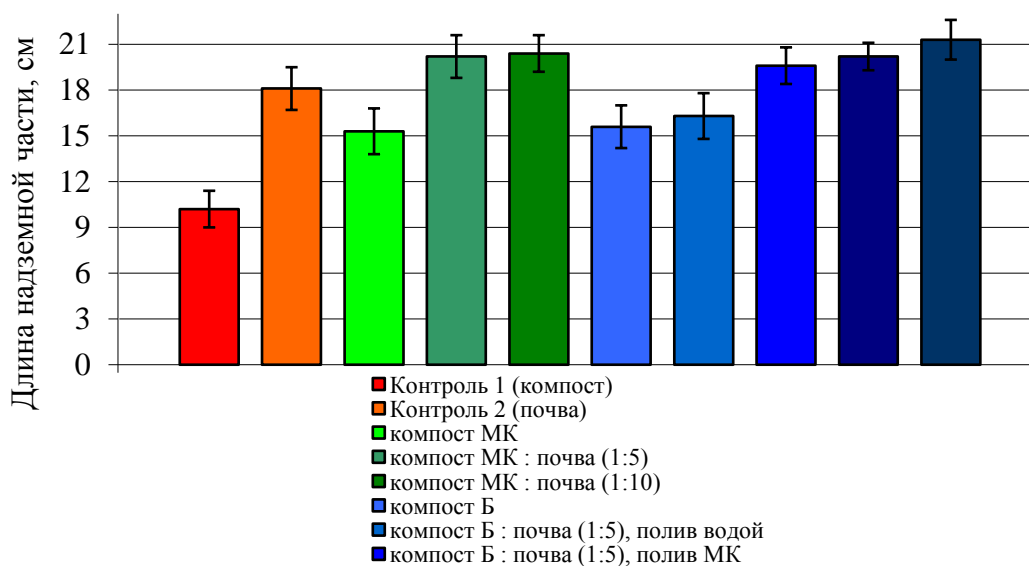


Рис. 3. Длина надземной части гороха посевного сорта Мадонна на 28 сутки в компосте, с различными вариантами внесения микробного консорциума и биочара

токсическому действию и удалять тяжёлые металлы из окружающей среды за счет включения поллютантов в процесс своего метаболизма или перевода их в инертную форму (Фокина и др., 2008).

При сравнении влияния компоста, обработанного микробным консорциумом и биочаром, показано, что используемые нами тест-растения – рожь сорта Марусенька, относящаяся к классу Однодольных и горох сорта Мадонна, относящийся к классу Двудольных, по-разному реагировали на два используемых технологических приема. Так, токсическое действие компоста, полученного на МПЗ, на 28 сутки эксперимента у растений ржи сорта Марусенька, вызвало ингибирование длины надземной части на 14,2 %, а у гороха сорта Мадонна – на 77,5 % по сравнению с контролем 2 (почвой). Снижение токсического действия используемыми технологическими приемами было аналогичное – у растений ржи сорта Марусенька отмечено увеличение длины надземной части при внесении в компост микробного консорциума и биочара на 14,9 % и 22,0 % по сравнению с компостом, полученном на заводе, а у гороха сорта Мадонна на 50,0 и 52,9 % соответственно.

Для растений ржи сорта Марусенька в качестве субстрата можно использовать компосты, полученные обоими технологическими приемами как в чистом виде, так и в смеси с почвой (при поливе водой), в то время как у растений гороха сорта Мадонна наибольший стимулирующий эффект достигнут при использовании компостов не в чистом виде, а именно в смеси с почвой.

В результате наших исследований показано, что токсическое действие компоста, полученного на МПЗ, у ржи сорта Марусенька эффективнее снижал биочар, чем микробный консорциум, а на растениях гороха сорта Мадонна эффективность обоих приемов была одинакова. При этом, для растений ржи сорта Марусенька максимальный стимулирующий эффект отмечен при использовании двух приемов одновременно, нежели каждого в отдельности, а у растений гороха сорта Мадонна эта закономерность отмечена только при использовании в качестве субстрата смеси компоста с биочаром и почвы в отношении 1:10.

Комплексное использование биочара и микробного консорциума, более эффективно в силу взаимного усиления положительных качеств каждого. Аналогичные данные получены также при изучении активности нитрификации почв (Зинченко, 2020). Решение о совместном использовании биочара с микробным консорциумом для детоксикации отходов мусороперерабатывающих заводов, требует дополнительных данных и исследований, включающих в себя определение объема материальных затрат, направленных на

необходимость внесения ряда изменений в технологию компостирования на МПЗ и выявления экономической результативности описанных способов применяемых при вторичном использовании переработанных отходов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что компост, полученный из органических отходов на мусороперерабатывающем заводе, ингибирует прорастание семян и морфометрические показатели проростков. Токсичное действие компоста более ярко проявлялось на ранних этапах развития растений.

Показано, что внесение в компост биочара и микробного консорциума повышают всхожесть семян гороха сорта Мадонна и ржи сорта Марусенька. Максимальный эффект влияния биочара и микробного консорциума на увеличение всхожести семян –50 % отмечен при смешивании компоста с почвой в соотношениях 1:5 и 1:10.

Отмечено увеличение длины надземной части ржи сорта Марусенька при внесении в компост микробного консорциума и биочара на 14,9 % и 22,0 % по сравнению с компостом, полученном на заводе, а при совместном использовании адсорбента и микроорганизмов – на 23,4–51,1 %. На растениях ржи сорта Марусенька максимальное снижение токсического действия компоста и стимуляция ростовых процессов растений отмечена при совместном использовании биочара и микробного консорциума, что свидетельствует о проявлении синергического эффекта двух технологических приемов.

Выявлено, что у растений гороха сорта Мадонна биочар и микробный консорциум снижают токсическое действие компоста, полученного на МПЗ эффективно в равной мере. Наибольший эффект стимуляции надземной части растений гороха сорта Мадонна в 2 раза достигнут при использовании в качестве субстрата компостов, обработанных микробным консорциумом и биочаром именно в смеси с почвой в отношении 1:10, а не в чистом виде.

Таким образом, совместное использование биочара и микробного консорциума снижает токсическое действие компоста, полученного из органических отходов мусороперерабатывающего завода, и может быть рекомендовано для использования их в технологических процессах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по поддержке молодежной лаборатории «Агробиотехнологии для повышения плодородия почв и качества сельскохозяйственной продукции» в рамках программы развития межрегионального научно-образовательного центра Юга России (№ ЛабНОЦ-21-01АБ).

Список литературы

- Васильев А. В. Комплексный экологический мониторинг как фактор обеспечения экологической безопасности // Академический журнал Западной Сибири. – 2014. – Т. 10, № 2. – С. 23.
- Водолеев А. С., Черданцева Е. С., Куренский И. А. Обезвреживание промышленных отходов с использованием почвенных микроорганизмов и высших растений // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2014. – № 2 (8). – С. 51–54.
- Гомоницкая А. О., Заболотских В. В., Нагайцева М. П. Внедрение дуальной системы сбора ТБО в г. Тольятти: проблемы и перспективы // материалы IX Международной научно-практической конференции «Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия». – 2015. – С. 5–8.
- ГОСТ Р 55571 – 2013. Удобрения органические на основе твердых бытовых отходов. Технические условия. – Москва: Стандартинформ, 2014. – С. 14.
- Григорьян Б. Р., Грачев А. Н., Кулагина В. И., Сунгатуллина Л. М., Кольцова Т. Г., Рязанов С. С. Влияние биоугля на рост растений, микробиологические и физико-химические показатели мало гумусированной почвы в условиях вегетационного опыта // Вестник Казанского технологического университета. – 2016. – Т. 19, №. 11. – С. 185–189.
- Грицаенко З. М., Грицаенко А. О., Карпенко А. О. Методы биологических и агрохимических исследований растений и почв. – К.: ЗАТ «НІЧЛАВА», 2003. – 320 с.

- Евдокимова Г. А., Мозгова Н. П. Аккумуляция меди и никеля почвенными грибами // *Микробиология*. – 1991. – Т. 60, № 5. – С. 801–807.
- Заболотских В. В., Гомоницкая А. С., Кутмина С. В. Технологические приемы улучшения качества компоста, получаемого из органических отходов // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2016. – Т. 18, № 5 (3). – С. 437–445.
- Зерщикова М. А. Последствия загрязнения окружающей среды и их влияние на экономические показатели (методы сохранения и улучшения состояния окружающей среды) // *Инженерный Вестник Дона*. – 2011. – № 1. – С. 65–77.
- Зинченко В. В., Погоньшев П. Д., Антоненко С. А., Федоренко Е. С., Лобзенко И. П., Горовцов А. В., Минкина Т. М., Сушкова С. Н. Биологическая активность лугово-черноземной почвы на фоне внесения биочара // *Материалы международного научного семинара «Биоуголь: свойства, применение в сельском хозяйстве, влияние на почву, растения и окружающую среду» ФГБНУ АФИ (Санкт-Петербург, Россия, 08 декабря 2020 г.)*. – 2020. – С. 35–38.
- Колесников О. В. Влияние ксенобиотиков и тяжелых металлов на систему микроорганизм-растение: автореф. дис... канд. биол. наук. – Москва, 2012. – 23 с.
- Переломов Л. В., Чулин А. Н. Молекулярные механизмы взаимодействия микроорганизмов и микроэлементов в окружающей среде. Прямая биологическая трансформация соединений микроэлементов // *Успехи современной биологии*. – 2013. – Т. 133. – № 5. – С. 452–470.
- Попова А. Д., Семаль В. А., Брикманс А. В., Нестерова О. В., Колесникова Ю. А., Бовсун М. А. Применение биоугля как мелиоранта и его влияние на изменение физических свойств агропочв юга Приморского края // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. – 2019. – № 6. – С. 57–63.
- Разумов Е. Ю. Биоуголь: современное представление // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2015. – Т. 18, № 2. – С. 220–222.
- Соколик Г. А., Овсянникова С. В., Попеня М. В. Влияние биоугля на определяющие подвижность в почвах формы нахождения кадмия, свинца и урана // *Материалы международного научного семинара «Биоуголь: свойства, применение в сельском хозяйстве, влияние на почву, растения и окружающую среду» ФГБНУ АФИ (Санкт-Петербург, Россия 08 декабря 2020 г.)*. – С. 86–90.
- Фокина А. И., Домрачева Л. И., Широких И. Г., Кондакова Л. В., Огородникова С. Ю. Микробная детоксикация тяжелых металлов (литературный обзор) // *Теоретическая и прикладная экология*. – 2008. – № 1. – С. 4–10.
- Черданцева Е. С., Гаврилова О. В. Использование микроорганизмов при утилизации промышленных и бытовых отходов // *Научно-исследовательские публикации*. – 2016. – № 1 (33). – С. 66–69.
- Ahmad M., Rajapaksha A. U., Lim J. E., Zhang M., Bolan N., Mohan D., Vithanage M., Lee S. S., Ok Y.S. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review // *Chemosphere*. – 2014. – Vol. 99. – P. 19–23. doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.10.071
- Biederman L. A., Stanley Harpole W. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: A meta-analysis // *GCB Bioenergy*. – 2013. – Vol. 5. – P. 202–214. doi:10.1111/gcbb.12037
- Cayuela M. L., Zwieter L., Singh B. P., Jeffery S., Roig A., Sanchez-Monedero M.A. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. – 2014. – Vol. 191. – P. 5–16. doi: 10.1016/j.agee.2013.10.009
- Fischer D., Glaser B. Synergisms between Compost and Biochar for Sustainable Soil Amelioration // *Management of Organic Waste*. – 2012. – P. 167–198. DOI:10.5772/31200
- Gorovtsov A. V., Minkina T. M., Mandzhieva S. S., Perelomov L. V., Soja G., Zamulina I. V., Yao J. The mechanisms of biochar interactions with microorganisms in soil // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2019. – P. 1–24.
- Kookana R. S. The role of biochar in modifying the environmental fate, bioavailability, and efficacy of pesticides in soils: A review // *Australian Journal of Soil Research*. – 2010. – Vol. 48. – P. 627–637. doi:10.1071/SR10007
- LeCroya C., Masiello C. A., Rudgers J. A., Hockaday W. C., Silberg J. J. Nitrogen, biochar, and mycorrhizae: Alteration of the symbiosis and oxidation of the char surface // *Soil Biology and Biochemistry*. – 2013. – Vol. 58. – P. 248–254.
- Sohi S., Krull E., Lopez-Capel E., Bol R. A review of biochar and its use and function in soil // *Advances in Agronomy*. – 2010. – Vol. 105. P. 47–82.
- Sushkova S., Minkina T., Dudnikova T., Barbashev A., Popov Yu., Rajput V., Bauer T., Nazarenko O., Kizilkaya R. Reduced plant uptake of PAHs from soil amended with sunflower husk biochar // *Eurasian Journal of Soil Science*. – 2021. – P. 10. <https://doi.org/10.18393/ejss.935397>
- Trukhacheva N. Mathematical statistics in biomedical research using the Statistica package. – М.: GEOTAR-Media, 2012. – 379 p.
- Xu G., Wei L. L., Sun J. N., Chang S. X. What is more important for enhancing nutrient bioavailability with biochar application into a sandy soil: Direct or indirect mechanism? // *Ecological Engineering*. – 2013. – Vol. 52. – 119–124.

Rzhevskaya V. S., Minkina T. M., Kryzhko A. V., Burlutskaya E. I., Lisovenko R. V. Technological methods to improve the quality of compost at a waste processing plant // Ekosistemy. 2022. Iss. 32. P. 60–72.

A comparative study of technological methods and treatments (pollutant adsorption, microbial bioremediation) of compost produced at the waste processing plant was conducted. Compost was produced from organic waste by separating the organic waste from the rest of the rubbish and drying it in a drum-like drier without the addition of microorganisms. The compost obtained by this method contained heavy metals exceeding the maximum permissible concentration. For microbial remediation, a consortium of lactic acid bacteria, yeasts and mycelial fungus of the genus *Trichoderma* was used, while biochar was used as an adsorbent for heavy metals. The microbial consortium was produced by co-culturing lactic acid bacteria and yeast in liquid MRS nutrient medium in a laboratory bioreactor. Biochar was produced by pyrolysis from sunflower husks by varying the final temperature from 500 °C to 700 °C. The compost obtained from organic waste at the waste processing plant completely inhibited the germination of pea seeds of Madonna variety and rye seeds of Marusenka variety by 52 %, and also delayed their germination by 2 weeks and reduced the morphometric indices of the plants. The use of such technological methods as the introduction of pollutant adsorbent and microbial consortium into the compost produced at the waste processing plant reduces its toxic effects on the growth processes. Complex use of the microbial consortium and biochar reduces its toxic effects on plant growth processes more than each technological method separately. The study of phytostimulating properties of biochar enriched with microbial consortium showed a 14.9 % and 22.0 % increase in length of aboveground parts of Marusenka rye variety compared to compost. In pea plants of the Madonna variety, inhibition of the length of the aboveground part decreased by 1.5 times. The use of compost treated with microbial consortium or biochar allows the product to be used as a substrate for growing plants.

Key words: municipal waste, organic waste recycling, bioremediation, pollutant adsorption, biochar, microbial consortium, heavy metals, organic fertilizer.

Поступила в редакцию 17.11.22

Принята к печати 19.12.22