

УДК 631.87:632.122.1

ЗООКОМПОСТ – РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ И МАТЕРИАЛ ДЛЯ РЕМЕДИАЦИИ ПОЧВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ[§]

© 2024 г. Е. А. Пендюрин^{1,*}, Л. М. Смоленская¹, Ж. А. Сапронова¹, И. В. Бомба¹¹Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова
308012 Белгород, ул. Костюкова, 46, Россия

*E-mail: pendyrin@yandex.ru

Способ получения органического удобрения из органических отходов с использованием личинок мухи Черная львинка (*Hermetia illucens*) является достаточно новым в агропромышленной сфере и позволяет решать проблемы получения белка и переработки органических отходов. Важной задачей также является изучение возможности использования зоокомпоста для восстановления техногенно-нарушенных почв. Установлено, что зоокомпост сохраняет свою стабильность и физико-химические характеристики в течение длительного времени, добавление его в количестве 1.25 мас. % к почвенным образцам снижает содержание подвижной формы кадмия на 41%. Таким образом, можно рекомендовать использование зоокомпоста в качестве биоудобрения, а также для ремедиации грунтов, подвергшихся загрязнению тяжелыми металлами.

Ключевые слова: органические отходы, зоокомпост, муха Черная львинка, тяжелые металлы, ремедиация почв.

DOI: 10.31857/S0002188124020095

ВВЕДЕНИЕ

Утилизация органических отходов – это острая проблема городов с большой плотностью населения. Это связано с тем, что продукты питания имеют ограниченный срок годности, а т.к. органические отходы содержат ценные компоненты, это их делает потенциальным энергетическим источником. Употребление органических отходов в сельскохозяйственном производстве позволит не только снизить антропогенную нагрузку, но и извлекать из них необходимые для растений питательные вещества.

В последнее время наиболее перспективными являются инновационные технологии биопереработки органических остатков с помощью насекомых. Изучаемая биотехнология построена на трансформации личинкой насекомого Черная львинка любых органических веществ. Метод переработки органических отходов сопровождается образованием зообелковой биомассы, включая процессы сокращения объема субстрата, вторичное использование отхода культивирования личинок в качестве биокомпоста [1]. Перерабатывающие компании не способны справиться с объемом органических отходов. При этом

неправильная утилизация наносит серьезный ущерб окружающей среде. Из литературных источников известно, что личинки мухи Черная львинка способны трансформировать практически все органические остатки растениеводства и животноводства, иловые осадки сточных вод, отходы рыбы и мяса, испорченные фрукты и овощи, кухонные и ресторанные отходы [2]. Следует отметить, что одна особь в сутки утилизирует 25 мг органических отходов [3].

Исследованный способ получения органического удобрения является достаточно новым в агропромышленной сфере и позволяет решать проблемы получения белка и переработки органических отходов. Главным преимуществом этого подхода является то, что в процессе поедания органической продукции личинками насекомого данные остатки измельчаются и уменьшаются в объеме на 70–80%. Да и сами органические отходы после трансформации личинками мухи Черная львинка отходами уже не являются, т.к. представляют собой высокоценное и экологически чистое органическое удобрение для растений – зоогумус [4].

Главное достоинство изученной технологии – ее экологическая безопасность для окружающей среды и человека. Результаты исследований подтвердили, что данный вид насекомых не является переносчиком инфекций. Кроме того, он не способен к выживанию

[§] Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов “Приоритет 2030” с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

в отсутствие необходимых условий — при попадании во внешнюю среду происходит гибель насекомого [3].

Проведя оценку литературных источников, можно сделать вывод, что для переработки органических отходов можно применять личинку мухи Черная львинка, которая способна использовать в качестве питания практически все субстраты органического происхождения. Из переработанных личинок получают зообелковую биомассу, которой можно кормить животных. В отличие от зарубежных государств в России данная проблема мало изучена, технология биопереработки на данный момент практически не распространена и поэтому весьма актуальна.

Одной из приоритетных проблем Российской Федерации является сохранение и оздоровление окружающей среды [5], поэтому важной задачей также является изучение возможности использования зоокомпоста для восстановления техногенно-нарушенных почв.

Известно, что компост из смешанных твердых бытовых отходов можно успешно использовать для восстановления сильноокислых, загрязненных металлами шахтных почв, для корректировки кислотности почвы и увеличения содержания в почве органического вещества, общего азота и доступных фосфора и калия [6].

Компост ограничивает доступность Zn в загрязненных почвах, а гуминовые вещества могут образовывать комплексы с ионами металлов или непосредственно реагировать с тяжелыми металлами (ТМ) из-за обилия различных функциональных групп, таких как карбоксильные, карбонильные и фенольные. Кроме того, некоторые микроорганизмы в компосте могут напрямую иммобилизовать ТМ. Внесение компоста может влиять на численность, состав сообщества и активность почвенных микроорганизмов и способствовать прямой деградации или косвенной трансформации загрязнителей в той или иной степени [7].

При длительном хранении зоокомпоста его физико-химические характеристики могут претерпевать изменения, поэтому при его использовании в сельском хозяйстве нужно обладать информацией о его стабильности. Цель работы — исследование свойств зоокомпоста на основе органических субстратов и личинок мухи Черная львинка для его использования в качестве органического удобрения и ремедиатора почв при их загрязнении ТМ.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования использовали образцы зоокомпоста личинок мухи Черная львинка — свежие и после хранения в течение одного года в закрытом полипропиленовом мешке в складском помещении с температурой окружающей среды 12–17°C. В качестве питательного субстрата для выращивания личинок и получения зоокомпоста

использовали опилки, некондиционное зерно, просроченные пищевые продукты.

Для исследования образцов зоокомпоста использовали стандартные методы: воздушно-тепловой, титриметрический, спектрофотометрический, потенциометрический и кондуктометрический.

Наличие и разнообразие микробоценоза исследованного зоокомпоста оценивали методом посева водных вытяжек материала со степенью разведения 10^{-4} и 10^{-7} на твердые питательные среды, с последующим культивированием в оптимальных условиях роста и подсчетом колоний образующих единиц (КОЕ) в 1 г компоста.

Максимальное количество аэробных бактерий учитывали на питательной среде МПА (мясопептонном агаре), для подсчета количества грибной и дрожжевой микрофлоры использовали питательные среды (агар) Чапека и Сабуро. Количество колоний пересчитывали на 1 г зоокомпоста с учетом влажности, определенной весовым методом.

Важным этапом исследований было определение влияния добавки зоокомпоста на почвы в случае загрязнения ТМ. В качестве металла был выбран кадмий, являющийся распространенным экотоксикантом.

Для проведения эксперимента пробы почв были искусственно загрязнены ионами кадмия в расчете 10 мг/кг почвы. Растворы, содержащие ионы Cd^{2+} в необходимых концентрациях, готовили путем растворения $Cd(NO_3)_2 \times 4H_2O$ в дистиллированной воде. Обработанные растворами пробы почв выдерживали во влажном состоянии в течение 72 ч для равномерного распределения соли металла в объеме всего образца. Затем к почвенным пробам был добавлен зоокомпост в различных соотношениях. Контролем выступала почва, также загрязненная кадмием. После добавления зоокомпоста пробы снова выдерживали 72 ч для взаимодействия компонентов зоокомпоста с кадмием. Определение содержания металла проводили в соответствии с РД 52.18.289-90 “Методика выполнения измерений массовой доли подвижных форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия, кобальта, хрома, марганца) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Показано, что зоокомпост личинок мухи Черная львинка был рыхлым рассыпчатым органическим веществом с преобладающим размером частиц 0.5–3.0 мм. Установлено, что зоокомпост личинок мухи Черная львинка обладал высокой влагоемкостью и влагостойкостью. Причем, это характерно как для свежих, так и для образцов, хранившихся в течение 1-го года. Установлено, что зоокомпост личинок мухи Черная львинка в процессе хранения не спрессовывался и не уплотнялся — следовательно, его можно

использовать как разрыхлитель почвы. Основные питательные вещества в нем находились в виде различных легкодоступных органико-минеральных соединений. Зоокомпост личинок мухи Черная львинка содержал Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe_2O_3 , а также был богат полезной для почвы и растений микробной флорой – до 70×10^7 бактериальных КОЕ, свыше 21×10^7 КОЕ дрожжевых и грибных культур [8].

Задачами исследования зоокомпоста личинок мухи Черная львинка были оценка содержания водорастворимой части, биогенных элементов и оценка обобщенных показателей. Показано, что образцы зоокомпоста имели повышенное солесодержание – 4.94–5.31%. Среди анионов преобладали сульфаты (0.739–1.009%) и гидрокарбонаты (0.566–1.879%). Установлено, что хранение образцов зоокомпоста в течение 1-го года не оказывало влияния на его солесодержание (табл. 1).

Наличие в зоокомпосте личинок мухи Черная львинка определяло содержание биологически значимых химических элементов, обеспечивающих интенсивное развитие сельскохозяйственных культур. Было установлено, что в образцах происходили процессы нитрификации. Среди продуктов азотистого обмена преобладал аммонийный азот, причем по истечении 1-го года хранения доли содержания нитратного

и нитритного азота значительно увеличивались – в среднем в 8–10 раз (табл. 2).

С целью установления возможности использования зоокомпоста личинок мухи Черная львинка в качестве органического удобрения были определены его некоторые дополнительные показатели (табл. 3).

Для комплексной характеристики биологической активности почвы, позволяющей оценить интенсивность и направленность процессов, обусловленных жизнедеятельностью почвенной биоты, используют микробиологические (численность, состав различных групп микро- и мезоорганизмов, биомасса микроорганизмов и т.п.) и биохимические (уровень ферментативной активности, “дыхание” почвы и т.п.) показатели.

Биологическая активность зоокомпостов определяется в основном жизнедеятельностью микроорганизмов. Потенциальную биологическую активность характеризует пул микроорганизмов, традиционно определяемый методом посева на твердые (агаризованные) питательные среды методом разведений.

На основании визуальной оценки интенсивности роста микроскопических культур на питательных средах и проведенных соответствующих расчетов показано наличие в составе микробценоза представителей всех видов микроорганизмов, количество

Таблица 1. Исследование водной вытяжки зоокомпоста личинок мухи Черная львинка

Образец	Характеристика солевого режима	Сухой остаток	Анионы				Катионы	
			%					
			CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}
1	Солончаки	5.31 ± 0.36	0.150 ± 0.02	0.566 ± 0.01	0.138 ± 0.02	1.009 ± 0.09	0.071 ± 0.02	0.020 ± 0.04
После хранения в течение 1-го года								
2	Солончаки	4.94 ± 0.04	–	1.88 ± 0.01	0.825 ± 0.02	0.729 ± 0.05	0.133 ± 0.02	0.040 ± 0.03

Таблица 2. Содержание основных биогенных компонентов в зоокомпосте

Образец	Нитраты, (NO_3^-)	Нитриты (NO_2^-)	Ион аммония (NH_4^+)	Общий азот (N)	$C_{орг}$	Гумус	P_2O_5	Fe_2O_3
	мг/кг				%		мг/100 г	
1	619 ± 28	2.54 ± 0.2	8030 ± 1110	8650 ± 990	17.8 ± 0.3	30.6 ± 0.2	227 ± 20	25.7 ± 1.2
После хранения в течение 1-го года								
2	4960 ± 25	97.8 ± 0.2	5440 ± 1010	10500 ± 1000	16.1 ± 0.2	27.7 ± 0.3	315 ± 21	26.5 ± 1.3

Таблица 3. Дополнительные показатели зоокомпоста личинок мухи Черная львинка

Образец	Влажность $W, \%$	pH_{H_2O}	pH_{KCl}	В водной вытяжке 1 : 10		Общее солесодержание, %	Общая щелочность, мг-экв/100 г
				УЭП*, мСм/см	минерализация по NaCl, г/л		
1	60.5 ± 0.7	8.01 ± 0.25	8.10 ± 0.71	2.55	1.3	7.3 ± 0.1	24.1 ± 0.4
После хранения в течение 1-го года							
2	55.0 ± 0.9	7.62 ± 0.14	7.48 ± 0.2	2.07	1.2	6.7 ± 0.1	30.8 ± 0.4

*УЭП – удельная электропроводность.

Таблица 4. Характеристики образцов зоокомпоста культивирования личинок мухи Черная львинка

Наименование показателей по ГОСТ 33830-2016 и ГОСТ 34102-2017	Образцы зоокомпоста		
	исходный	после хранения в течение 1-го года	
Массовая доля сухого вещества, %	≥25	39.6 45.0	
Содержание балластных инородных механических включений (камни, щебень, металл и т.п.) размером <40 мм, %	1.5	Отсутствует	
Показатель активности водородных ионов, ед. рН	6.0–8.5	8.0	7.6
Массовая доля органического вещества, % на сухое вещество, не менее	50	43	36
Массовая доля питательных веществ в удобрении с исходной влажностью, %, не менее			
азота общего	0.7	0.9	1.0
фосфора общего, в пересчете на P ₂ O ₅	0.5	0.2	0.3
Наличие патогенных и болезнетворных микроорганизмов, в том числе энтеробактерий (патогенных серовариантов кишечной палочки, сальмонелл, протеи), энтерококков, стафилококков, клостридий, бацилл, энтеровирусов, КОЕ/г	Не допускается	Отсутствует	
Наличие жизнеспособных яиц и личинок гельминтов, в том числе нематод (аскаридат, трихоцефалов, стронгилят, стронгилоидов), трематод, цестод, экз./кг	Не допускается	Отсутствует	

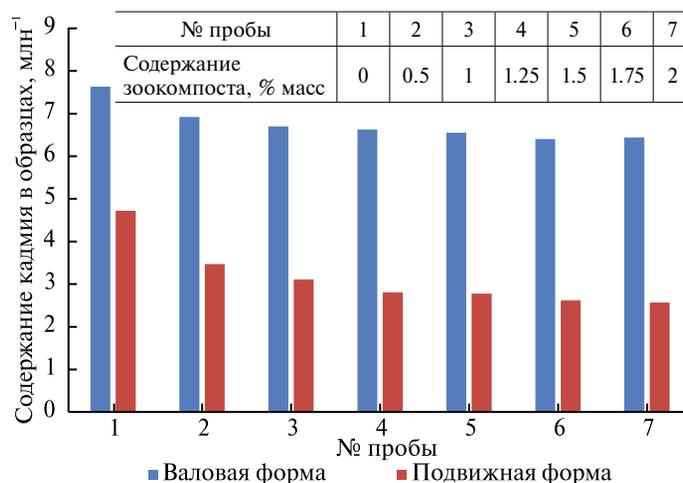
которых в 1 г сухого компоста составило: бактериальных КОЕ – до 70×10^7 , дрожжевых и грибных культур – свыше 21×10^7 КОЕ. Было установлено, что после 1-го года хранения количество микроорганизмов в 1 г сухого компоста незначительно уменьшилось и составило: бактериальных КОЕ – до 52×10^7 , дрожжевых и грибных культур – свыше 19×10^7 КОЕ.

С целью установления пригодности зоокомпоста личинок мухи Черная львинка для использования в качестве органических удобрений в сельском и приусадебном хозяйстве сравнили полученные физико-химические, механические и агрохимические показатели с требованиями ГОСТ 33830–2016 и ГОСТ 34102-2017 (табл. 4).

После анализа данных табл. 4 можно сделать вывод, что зоокомпост личинок мухи Черная львинка соответствует требованиям ГОСТ 33830-2016, ГОСТ 34102-2017, и его можно применять в качестве органического удобрения в сельском и приусадебном хозяйствах.

На рис. 1 приведены результаты исследования возможности использования зоокомпоста для уменьшения подвижности ионов кадмия в почвенных образцах.

При добавлении зоокомпоста в количестве 1.25 мас. % наблюдали значительное снижение подвижности ионов кадмия (на 41%), при добавлении зоокомпоста в количестве 2.0 мас. % подвижность элемента снижалась на 46%. Таким образом, можно

**Рис. 1.** Содержание валовой и подвижной форм кадмия в исследованных почвенных образцах с разным содержанием зоокомпоста.

рекомендовать использование зоокомпоста в грунтах, подвергшихся загрязнению тяжелыми металлами для снижения биодоступности последних для растений.

ВЫВОДЫ

1. Зоокомпост, полученный переработкой пищевых и сельскохозяйственных отходов личинками мухи Черная львинка, сохранял свою стабильность и физико-химические характеристики в течение длительного времени. Образцы зоокомпоста сохраняли показатели влажности 55–60% и не слеживались по истечении 1-го года хранения.

2. Образцы свежего зоокомпоста личинок мухи Черная львинка и образцы после хранения в течение 1-го года в закрытом полипропиленовом мешке в складском помещении с температурой окружающей среды 12–17°C содержали продукты азотистого обмена с преобладанием аммонийного азота, причем через 1 год доля нитратного и нитритного азота увеличилась.

3. На основании визуальной оценки интенсивности роста микроскопических культур на питательных средах и проведенных соответствующих расчетов показано наличие в составе микробоценоза зоокомпоста личинок мухи Черная львинка представителей всех видов микроорганизмов, количество которых в 1 г сухого компоста составило: бактериальных КОЕ – до $52-70 \times 10^7$, дрожжевых и грибных культур – свыше $19-21 \times 10^7$ КОЕ.

4. При добавлении к грунту зоокомпоста в количестве 1.25 мас. % наблюдали значительное снижение подвижности ионов кадмия. Зоокомпост личинок мухи Черная львинка может оказаться эффективным ремедиатором почвы при ее загрязнении тяжелыми металлами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пендюрин Е.А., Рыбина С.Ю., Смоленская Л.М. Использование зоокомпоста Черной львинки в качестве органического удобрения // Аграрн. наука. 2020. № 7–8. С. 106–110.
2. Bosch G., van Zanten H.H.E., Zamprogn A., Veenenbos M. Conversion of organic resources by black soldier fly larvae: Legislation, efficiency and environmental impact // J. Clean. Product. 2019. V. 222. P. 355–363.
3. Бастраков А.И., Загоринский А.А., Козлова А.А., Ушакова Н.А. Высокоэффективная биоконверсия органических субстратов личинками Черной Львинки (*Hermetia illucens*) // Биотехнология и качество жизни: Международ. научн.-практ. конф. Москва, 18–20 марта 2014 г. М., 2014. С. 418–419.
4. Удалова Ж.В., Бастраков А.И., Зиновьева С.В., Ушакова Н.А. Применение личинок Черной львинки, *Hermetia illucens*, для утилизации картофеля, зараженного фитонематодами // Теория и практика борьбы с паразитарными болезнями. 2019. № 20. С. 627–632.
5. Глаголева Н.Н., Матвеева О.П. Экологическая безопасность как фактор экономического развития страны // Вестн. Белгород. гос. технол. ун-та им. В. Г. Шухова. 2015. № 5. С. 286–289.
6. Sajeevee S.S., Rengel Z., Solaiman Z.M. Remediation of heavy metal-contaminated iron ore tailings by applying compost and growing perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) // Chemosphere. 2022. V. 288. 132573. 10 p.
7. Qian Sh., Zhou X., Fu Y. Biochar-compost as a new option for soil improvement: Application in various problem soils // Sci. Total Environ. 2023. V. 870 162024. 18 p.
8. Пендюрин Е.А., Смоленская Л.М., Святченко А.В. Использование зоокомпоста культивирования личинок мухи черная львинка (*Hermetia illucens*) при выращивании огурцов // Вестн. аграрн. науки. 2021. № 1(88). С. 56–62.

Zoocompost – a Solution to the Organic Waste Problem and a Material for Soils Polluted with Heavy Metals Remediation

E. A. Pendyurin^{a, #}, L. M. Smolenskaya^a, J. A. Saprionova^a, I. V. Bomba^a

^aShukhov Belgorod State Technological University,
ul. Kostyukova 46, Belgorod 308012, Russia

[#]E-mail: pendyurin@yandex.ru

Recycling of organic waste is an acute environmental problem. Recently, the most promising are innovative technologies for bio-processing of organic residues with the help of insects. The method of obtaining organic fertilizer from organic waste using larvae of the Black Lion fly is quite new in the agro-industrial sphere and allows solving the problems of protein production and processing of organic waste. An important task is also to study the possibility of using a zoo compost for the restoration of technogenically disturbed soils. It was found that the zoo compost retains its stability and physico-chemical characteristics for a long time, adding it in an amount of 1.25 wt.% to soil samples reduces the content of the mobile form of cadmium by 41%. Thus, it is possible to recommend the use of zoocompost as a biofertilizer, as well as for remediation of soils contaminated with heavy metals.

Keywords: organic waste, zoo compost, Black Lion fly, heavy metals, soil remediation.