

Янь Ли¹, В. О. Лемешевский^{2, 3}, С. Л. Максимова⁴¹Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь, e-mail: ly15993087502@163.com²Белорусский государственный экономический университет, Минск, Беларусь³Всероссийский научно-исследовательский институт физиологии, биохимии и питания животных – филиал ФИЦ животноводства – ВИЖ им. акад. Л. К. Эрнста, Боровск, Россия⁴Филиал «Ресурсный центр ЭкоТехноПарк – Волма» Республиканского института профессионального образования, Минск, Беларусь

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА СУБСТРАТА И ВРЕМЕННОГО РЕЖИМА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЕРМИКОПОСТИРОВАНИЯ ПТИЧЬЕГО ПОМЕТА

Аннотация. В процессе экологически безопасной утилизации птичьего помета до настоящего времени недостаточно изучено, как продолжительность предварительного компостирования и состав субстрата влияют на эффективность процесса вермикомпостирования куриного помета. Целью работы была комплексная оценка этих факторов по биоэкологическим показателям популяции дождевых червей *Eisenia foetida* (выживаемость и репродуктивная активность) и изменениям физико-химических свойств субстрата. Были заложены пять вариантов субстрата (Т1–Т5) с различным содержанием куриного помета (50–100 % массы смеси) и структурных добавок (солома и торф), которые совместно подвергали аэробной ферментации в течение 3, 6, 9 и 12 месяцев. С помощью однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) оценивали выживаемость взрослых особей, число коконов и молодых червей, а также динамику pH, влажности, содержания органического вещества, общего фосфора и калия. Показано, что по мере увеличения продолжительности предварительного компостирования и стабилизации физико-химических свойств субстрата снижается его ингибирующее действие на дождевых червей: уменьшается смертность и восстанавливаются процессы коконообразования и выхода молоди. Наилучшие показатели биологической активности зарегистрированы при 12-месячной ферментации в варианте Т2 (60 % помета, 20 % соломы, 20 % торфа), где численность выживших червей, а также количество коконов и молоди статистически значимо ($p < 0,05$) превышали другие варианты. Полученные результаты подтверждают экологическую целесообразность совместной ферментации куриного помета с соломой и торфом и позволяют уточнить оптимальные сроки предварительного компостирования и соотношения компонентов субстрата, обеспечивающих устойчивое протекание процесса вермикомпостирования.

Ключевые слова: вермикомпостирование, управление навозом, экологическая эффективность

Yan Li¹, V. O. Lemiasheuski^{2, 3}, S. L. Maksimova⁴¹International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: ly15993087502@163.com²Belarusian State Economic University, Minsk, Belarus³All-Russian research Institute of Physiology, Biochemistry and Nutrition of animals – branch of the Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L. K. Ernst, Borovsk, Russian⁴Republican Institute for Vocational Education Resource Center «EcoTechnoPark – Volma»
Republican Institute of Professional Education, Minsk, Belarus

INFLUENCE OF SUBSTRATE COMPOSITION AND PRE-COMPOSTING DURATION ON THE EFFICIENCY OF POULTRY MANURE VERMICOMPOSTING

Abstract. Environmentally safe utilization of poultry manure requires a better understanding of how pre-composting duration and substrate composition affect the efficiency of the vermicomposting process. This study aimed to evaluate these factors based on the bio-ecological responses of the earthworm *Eisenia foetida* (survival and reproductive activity) and changes in substrate physicochemical properties. Five substrate treatments (T1–T5) with different proportions of chicken manure (50–100 % of the mixture) and structural additives (straw + peat) were co-composted aerobically for 3, 6, 9 and 12 months. One-way analysis of variance (ANOVA) was used to assess the survival of adult worms, numbers of cocoons and juveniles, as well as pH, moisture content, organic matter, total phosphorus and potassium in the substrate. As pre-composting time increased and the physicochemical properties of the substrate stabilized, the inhibitory effect of manure on earthworms decreased: mortality dropped, while cocoon production and juvenile output recovered. The best biological performance was obtained after 12 months and of pre-composting in treatment T2 (60 % manure, 20 % straw, 20 % peat), where the numbers of surviving worms, cocoons and juveniles were significantly higher than ($p < 0.05$) in the other treatments. These results confirm the ecological relevance of co-composting poultry manure with straw and peat and identify optimal pre-composting duration and substrate composition to ensure a stable vermicomposting process.

Keywords: vermicomposting; manure management; ecological efficiency

Янь Лі¹, В. А. Лемяшэўскі^{2,3}, С. Л. Максімава⁴

¹Міжнародны дзяржаўны экалагічны інстытут ім. А. Д. Сахарава Беларускага дзяржаўнага ўніверсітэта, Мінск, Беларусь, e-mail:ly15993087502@163.com

²Беларускі дзяржаўны эканамічны ўніверсітэт, Мінск, Беларусь

³Усерасійскі Навукова-даследчы інстытут фізіялогіі, біяхіміі і харчавання жывёл – філіял ФДЦ жывёлагадоўлі – УІЖ ім. акад. Л. К. Эрнста, Бароўск, Расія

⁴Філіял «Рэсурсны цэнтр ЭкаТэхнаПарк – Волма» Рэспубліканскага інстытута прафесійнай адукацыі, Мінск, Беларусь

УПЛЫЎ СКЛАДУ СУБСТРАТУ І ЧАСОВАГА РЭЖЫМУ НА ЭФЕКТЫЎНАСЦЬ ВЕРМІКАМПАСЦІРАВАННЯ ПТУШЫНАГА ПАМЁТУ

Анацыя. У працэсе экалагічна бяспечнай утылізацыі птушынага памёту да гэтага часу недастаткова вывучана, як працягласць папярэдняга кампасціравання і склад субстрата ўплываюць на эфектыўнасць працэсу вермікампасціравання курынага памёту. Мэтай працы была комплексная ацэнка гэтых фактараў па біяэкалагічных паказчыках папуляцыі дажджавых чарвякоў *Eisenia foetida* (выжывальнасць і рэпрадуктыўная актыўнасць) і зменах фізіка-хімічных уласцівасцяў субстрата. Былі закладзены пяць варыянтаў субстрату (Т1–Т5) з розным утрыманнем курынага памёту (50–100 % масы сумесі) і структурных дабавак (салома і торф), якія сумесна падвяргалі аэробнай ферментацыі на працягу 3, 6, 9 і 12 месяцаў. З дапамогай аднафактарнага дысперсійнага аналізу (ANOVA) ацэньвалі выжывальнасць дарослых асобін, колькасць коканаў і маладых чарвякоў, а таксама дынаміку рН, вільготнасці, утрымання арганічнага рэчыва, агульнага фосфару і калію. Паказана, што па меры павелічэння працягласці папярэдняга кампасціравання і стабілізацыі фізіка-хімічных уласцівасцяў субстрата зніжаецца яго інгібіруючае дзеянне на дажджавых чарвякоў: мяншаецца смяротнасць і аднаўляюцца працэсы коканаўтварэння і выхаду моладзі. Найлепшыя паказчыкі біялагічнай актыўнасці зарэгістраваны пры 12-месячнай ферментацыі ў варыянце Т2 (60 % памёту, 20 % саломы, 20 % торфу), дзе колькасць выжыўшых чарвякоў, а таксама колькасць коканаў і моладзі статыстычна ($p < 0,05$) значна перавышалі іншыя варыянты. Атрыманая вынікі пацвярджаюць экалагічную мэтазгоднасць сумеснай ферментацыі курынага памёту з саломой і торфам і дазваляюць удакладніць аптымальныя тэрміны папярэдняга кампасціравання і суадносіны кампанентаў субстрата, якія забяспечваюць устойлівае праходжанне працэсу вермікампасціравання.

Ключавыя словы: вермікампасціраванне, кіраванне гноем, экалагічная эфектыўнасць

Введение. В связи с постоянным расширением масштабов мирового птицеводства объемы производства птичьего помета неуклонно увеличиваются, превращаясь в один из значительных источников аграрного диффузного загрязнения. Птичий помет, особенно куриный, отличается высоким содержанием органических веществ, азота, фосфора, калия и других элементов питания растений, что теоретически делает его перспективным ресурсом для сельского хозяйства. Согласно имеющимся данным содержание сырого протеина в его сухом веществе достигает 20–30 %, тогда как концентрации общего фосфора и калия находятся в пределах 1–2 % [1, 2]. Благодаря этим свойствам куриный помет рассматривается как потенциально ценный органический удобрительный материал.

Однако прямое внесение некомпостированного куриного помета в почву может сопровождаться серьезными экологическими рисками. Высокая концентрация аммонийного азота и свободного аммиака оказывает токсическое воздействие на корневую систему растений и почвенные микробные сообщества, а также вызывает физиологический стресс у сапрофагов, включая дождевых червей [3]. Щелочной рН (обычно выше 8,0) и значительная концентрация растворимых солей затрудняют поддержание структуры почвы и снижают ее биологическое разнообразие. Кроме того, в курином помете часто выявляются остатки антибиотиков, тяжелые металлы, гормоноподобные соединения и патогены (в том числе сальмонеллы, кишечная палочка и яйца паразитов), которые при отсутствии надлежащей деструкции могут поступать в агроценозы и нарушать устойчивость экосистем [4]. При складировании или в условиях высокой влажности куриный помет становится источником интенсивного выделения аммиака (NH_3), метана (CH_4) и закиси азота (N_2O), усугубляя проблемы загрязнения атмосферы и климатических изменений [5]. Ранее проведенные исследования разных авторов указывают, что при длительном аэробном компостировании органических отходов возможно образование NH_3 , CH_4 и N_2O , особенно при отсутствии углеродсодержащих структурных компонентов [1, 5]. Однако совмещение свежего помета с соломой и торфом уже на этапе закладки компоста позволяет частично адсорбировать аммиак, улучшить C/N соотношение, а также снизить скорость анаэробных процессов, способствующих образованию метана и закиси азота. Именно поэтому в настоящем исследовании применялась смешанная ферментация всех компонентов, что способствует формированию более устойчивой экологической конфигурации субстрата и снижению риска газообразных выбросов при утилизации помета.

В связи с указанными экологическими и санитарными угрозами в последние годы разрабатываются различные подходы к безопасной утилизации куриного помета. Одним из перспективных биотехнологических решений является вермикомпостирование – процесс, при котором за счет жизнедеятельности сапрофагов, преимущественно *Eisenia foetida*, органические отходы трансформируются в высокостабильный, гумусированный и агрономически ценный продукт – биогумус. Эта технология характеризуется высокой эффективностью, низкими энергетическими затратами и способностью к значительному снижению концентраций патогенов и вредных соединений. Исследования подтверждают, что при оптимальных условиях черви способствуют повышению коэффициента трансформации азота и фосфора, стимулируют накопление гумусовых веществ, а также через кишечную микрофлору и ферментативные процессы участвуют в частичном разложении антибиотиков и органических токсикантов [6, 7].

Однако практическая эффективность вермикомпостирования значительно зависит от степени разложения органического субстрата и его физической структуры. Свежий куриный помет, содержащий аммиак, органические кислоты и другие токсичные компоненты, может вызывать гибель червей или подавлять их репродуктивную активность. Недостаточно аэрируемый однородный субстрат без добавления структурных материалов также не обеспечивает оптимальный водно-воздушный режим. Большинство публикаций посвящено влиянию кратковременной ферментации или применению одного типа добавки, тогда как системные исследования по комбинированному воздействию различных сроков предварительного компостирования и многокомпонентных субстратов на эффективность вермикомпостирования встречаются редко. Этот пробел ограничивает широкомасштабное применение технологии в практике переработки птичьего помета.

Цель исследования – изучить влияние продолжительности предварительной ферментации куриного помета и соотношения компонентов субстрата на выживаемость и репродуктивную способность *Eisenia foetida*, а также на pH, влажность, содержание органического углерода, фосфора и калия в процессе вермикомпостирования. Экологическую эффективность и токсичность субстрата по отношению к дождевым червям оценивали по выживаемости, репродуктивным показателям *Eisenia foetida* и изменению перечисленных физико-химических свойств.

Материалы и методы исследования. В настоящем исследовании в качестве основного сырья использовался куриный помет, полученный из крупных птицефабрик, расположенных в Гомельской обл. Республики Беларусь. Субстраты компостировались в течение 3, 6, 9 и 12 месяцев в виде смешанных смесей, включающих куриный помет, ржаную солому и торф, взятые в соответствующих пропорциях (Т1–Т5). Компостирование проводилось в условиях естественной аэрации, с регулярным перемешиванием раз в 7–10 суток и контролем влажности (60–70 %). На всех стадиях процесса не применялись никакие внешние добавки или ускорители разложения.

Для подготовки субстратов все компоненты – куриный помет, ржаная солома и верховой торф предварительно смешивались в заданных пропорциях, соответствующих вариантам Т1–Т5, и далее подвергались совместному аэробному компостированию в течение 3, 6, 9 и 12 месяцев. Это обеспечивало более равномерную стабилизацию субстрата, снижение аммиачной токсичности и улучшение структуры перед вермикомпостированием. Состав смесей: Т1 – 50 % куриного помета, 25 % ржаной соломы, 25 % торфа; Т2 – 60 % помета, 20 % соломы, 20 % торфа; Т3 – 70 % помета, 15 % соломы, 15 % торфа; Т4 – 80 % помета, 10 % соломы, 10 % торфа; Т5 – 100 % куриного помета без добавок.

Каждая серия эксперимента включала пять указанных вариантов субстрата, что в сочетании с четырьмя сроками предварительной ферментации и тремя биологическими повторами дало в общей сложности 60 опытных образцов.

Для проведения эксперимента подготовленные субстраты помещали в пластиковые контейнеры объемом 250 мл с равномерной укладкой материала. В каждый контейнер вносили по 50 взрослых особей дождевого червя вида *Eisenia foetida*, полученных из лабораторной популяции НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам. С целью адаптации черви предварительно выдерживались в стандартном зрелом компосте в течение 7 суток. Фаза инкубации проводилась в условиях постоянной температуры (20–25 °С), относительной влажности – 60–70 % и полного отсутствия света на протяжении 30 суток.

По завершении инкубации дождевые черви вручную извлекались из субстрата с использованием сита размером ячеек 2 мм. Для оценки биологической реакции червей на различные варианты субстрата фиксировались следующие показатели: число выживших взрослых особей, их живая масса, а также количество коконов и молодых червей. Каждый вариант опыта включал три повтора с целью повышения надежности результатов.

Одновременно с этим отбирались пробы субстрата для анализа физико-химических свойств. Лабораторные измерения необходимых параметров проводились в соответствии с методическими рекомендациями «Методика анализа органических удобрений» (М. : Колос, 1984) и действующими государственными стандартами (ГОСТ): влажность определялась по методу высушивания при 105 °С (ГОСТ 26713-85); органическое вещество – методом прокаливания в муфельной печи при 550 °С (ГОСТ 27980-88); pH – потенциометрическим методом в водной суспензии (ГОСТ 27979-88); общее содержание азота – методом Кельдаля (ГОСТ 26715-85); общее содержание фосфора – колориметрическим методом с фосфорновольфрамовой кислотой с пересчетом на P₂O₅, (ГОСТ 26717-85); общее содержание калия – методом фотометрии в пламени с пересчетом на K₂O (ГОСТ 26718-85).

Каждое измерение проводилось в трех технических повторностях. Полученные данные представлены в виде среднего значения с добавлением стандартного отклонения.

Статистическая обработка данных осуществлялась с использованием программного обеспечения Microsoft Excel 2021 и IBM SPSS Statistics 29.0. Для каждой экспериментальной серии (в пределах установленного срока ферментации) данные пяти вариантов субстрата подвергались однофакторному дисперсионному анализу (ANOVA). При обнаружении статистически значимых различий применялся апостериорный LSD-тест Фишера для попарного сравнения групп. Уровень статистической значимости установлен на значении $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение. По завершении каждого этапа компостирования отобранные образцы направлялись на лабораторный анализ для определения основных физико-химических характеристик, включая содержание влаги, уровень pH, общее содержание азота, фосфора, калия и органического вещества (табл. 1).

Таблица 1. Физико-химический анализ состава куриного помета при различных сроках ферментации (% в сыром веществе)

Показатель	Влажность	pH, ед.	Азот общий	Фосфор	Калий	Органическое вещество	
Срок ферментации, мес.	1	81,23 ± 1,06	8,86 ± 0,07	1,72 ± 0,05	0,73 ± 0,05	0,56 ± 0,02	43,10 ± 0,54
	2	78,30 ± 0,64	8,54 ± 0,12	1,69 ± 0,02	0,66 ± 0,08	0,54 ± 0,03	42,39 ± 0,16
	3	73,85 ± 1,76	8,38 ± 0,16	1,67 ± 0,04	0,56 ± 0,07	0,49 ± 0,02	42,80 ± 0,53
	4	70,79 ± 1,13	8,03 ± 0,12	1,63 ± 0,04	0,50 ± 0,07	0,44 ± 0,05	42,93 ± 0,30
	5	69,48 ± 0,61	7,92 ± 0,07	1,59 ± 0,02	0,48 ± 0,05	0,39 ± 0,03	42,20 ± 0,02
	6	68,23 ± 0,56	7,82 ± 0,04	1,55 ± 0,05	0,42 ± 0,03	0,37 ± 0,03	42,79 ± 0,67
	7	67,39 ± 0,56	7,74 ± 0,05	1,54 ± 0,06	0,42 ± 0,02	0,36 ± 0,02	41,96 ± 0,59
	8	67,16 ± 0,08	7,74 ± 0,03	1,54 ± 0,04	0,42 ± 0,03	0,35 ± 0,01	41,81 ± 0,28
	9	67,32 ± 0,08	7,72 ± 0,03	1,52 ± 0,05	0,42 ± 0,03	0,34 ± 0,03	42,64 ± 0,44
	10	66,85 ± 0,21	7,71 ± 0,01	1,47 ± 0,05	0,39 ± 0,02	0,33 ± 0,05	42,55 ± 1,13
	11	66,95 ± 0,26	7,69 ± 0,03	1,43 ± 0,05	0,39 ± 0,03	0,33 ± 0,02	43,32 ± 0,29
	12	64,32 ± 0,06	7,69 ± 0,03	1,46 ± 0,11	0,38 ± 0,05	0,34 ± 0,03	43,75 ± 0,42

С целью улучшения структуры субстрата и снижения токсичности куриного помета в качестве добавки использовалась предварительно перемешанная в соотношении 1 : 1 по массе смесь ржаной соломы и верхового торфа. Оба компонента прошли предварительную лабораторную обработку и были увлажнены до уровня влажности около 70 %. Для каждого из них были определены ключевые физико-химические показатели: влажность, pH, общее содержание азота, фосфора, калия и органического вещества (табл. 2 и 3). В образцах торфа дополнительно анализировались концентрации P₂O₅, K₂O и Fe₂O₃.

Таблица 2. Физико-химический анализ компонентов ржаной соломы (% в сыром веществе)

Показатель	Значение
Влажность	14,54 ± 0,13
Азот	0,47 ± 0,05
Фосфор	0,26 ± 0,02
Калий	1,01 ± 0,08
Кальций	0,31 ± 0,11

Таблица 3. Физико-химический анализ компонентов торфа (% в сыром веществе)

Показатель	Значение
Влажность	82,60 ± 2,02
pH, ед.	2,87 ± 0,06
Азот общий	0,14 ± 0,02
CO	0,63 ± 0,03
P ₂ O ₅	0,12 ± 0,02
K ₂ O	0,85 ± 0,03
Fe ₂ O ₃	0,27 ± 0,02
Органическое вещество	97,57 ± 0,45
Зола	2,33 ± 0,58

Оценка биоэкологических показателей дождевых червей при 3-месячном сроке предварительного компостирования. При сроке предварительного компостирования в 3 месяца общее состояние выживаемости и репродуктивной активности дождевых червей по всем вариантам оказалось неудовлетворительным (табл. 4). Существенное число выживших особей было зафиксировано только в варианте T2, где среднее количество живых червей составило 1,67 особи, при этом наблюдалось также незначительное коконообразование (в среднем 3,67 кокона) и появление молодняка (0,67 особи), что статистически значимо ($p < 0,05$). Варианты T3 и T4 показали несколько лучшие результаты по сравнению с T1 и T5, однако различия между ними не достигли уровня статистической значимости. В вариантах T1 и T5 все черви погибли, при этом никаких признаков размножения зафиксировано не было.

Низкая экологическая эффективность на данном этапе, проявляющаяся высокой смертностью и отсутствием размножения дождевых червей, свидетельствует о том, что трехмесячной ферментации недостаточно для снижения ингибирующего действия субстрата. Подобные эффекты характерны для незрелых органических отходов, содержащих повышенные количества свободного аммиака, органических кислот и других нестабилизированных соединений, способных вызывать физиологический стресс у дождевых червей и подавлять их репродуктивную активность [8]. Несмотря на некоторое смягчение

Таблица 4. Влияние ферментации куриного помета в течение 3 месяцев на выживаемость дождевых червей

Показатель	Количество		
	Выжившие особи	Коконы	Ювенильные особи
T1	0 ^b	0 ^c	0 ^a
T2	1,67 ± 0,58 ^a	3,67 ± 1,15 ^a	0,67 ± 0,58 ^a
T3	0,67 ± 0,58 ^b	1,67 ± 0,58 ^b	0,33 ± 0,58 ^a
T4	0,67 ± 0,58 ^b	1,67 ± 1,15 ^b	0,33 ± 0,58 ^a
T5	0 ^b	0 ^c	0 ^a

Примечание. Буквенные обозначения (a, b, c, d, e) в табл. 4–7 указывают на значимые различия между группами при уровне $p < 0,05$ с помощью однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) с последующим апостериорным тестом.

неблагоприятного воздействия субстрата за счет структурных добавок в варианте T2, трехмесячный срок ферментации все же нельзя считать достаточным с точки зрения экологической безопасности вермикомпостирования.

Оценка биоэкологических показателей дождевых червей при 6-месячном сроке предварительного компостирования. С увеличением продолжительности ферментации до 6 месяцев наблюдалось заметное улучшение биоэкологических показателей дождевых червей (табл. 5). Вариант T2 продемонстрировал наилучшие результаты: среднее количество выживших особей составило 2,67, а число коконов и молодых червей достигло 6,33 и 1,67 соответственно, что статистически значимо превышает показатели других групп ($p < 0,05$). В вариантах T3 и T4 также началось стабильное размножение червей – количество выживших составило по 1,67 особи, а число молодняка достигло 1,67 в каждом из вариантов.

Таблица 5. Влияние ферментации куриного помета в течение 6 месяцев на выживаемость дождевых червей

Показатель	Количество		
	Выжившие особи	Коконы	Ювенильные особи
T1	1,33 ± 0,58 ^b	1,33 ± 0,58 ^b	0,33 ± 0,58 ^b
T2	2,67 ± 0,58 ^a	6,33 ± 1,15 ^a	1,67 ± 1,15 ^a
T3	1,67 ± 0,58 ^b	2,00 ± 1,00 ^b	1,67 ± 0,58 ^a
T4	1,67 ± 0,58 ^b	3,33 ± 0,58 ^b	1,67 ± 0,58 ^a
T5	0 ^c	0 ^b	0 ^b

Вариант T1 показал некоторое улучшение по сравнению с предыдущим этапом, однако репродуктивная активность червей осталась значительно ниже по сравнению с другими вариантами. В группе T5, как и ранее, в течение двух последовательных серий эксперимента выжившие особи зафиксированы не были. Ранее опубликованные исследования подтверждают, что в процессе 6-месячного компостирования птичьего или животного помета содержание токсичных компонентов может существенно снижаться, что способствует повышению выживаемости и репродуктивной активности дождевых червей [9]. Кроме того, введение структурных компонентов, таких как древесные опилки или кокосовое волокно, позволяет улучшить аэрацию и влагоемкость субстрата, тем самым создавая более благоприятные условия обитания для червей [10].

Оценка биоэкологических показателей дождевых червей при 9-месячном сроке предварительного компостирования. При 9-месячной ферментации куриного помета наблюдалось дальнейшее улучшение экологических показателей во всех экспериментальных вариантах (табл. 6). Наиболее выраженные результаты были получены в варианте T2, где среднее количество выживших червей составило 4,67 особи, а количество коконов и молодых червей достигло 7,33 в обоих случаях, что статистически значимо превосходит остальные группы ($p < 0,05$). В варианте T4 также зафиксировано существенное улучшение всех показателей, при этом количество молодняка достигло 5,67. Вариант T3 продемонстрировал стабильные, но менее выраженные результаты. В группе T1 было отмечено незначительное улучшение, однако показатели репродуктивной активности по-прежнему оставались низкими. В варианте T5 выявлено минимальное количество выживших особей (0,67), при этом признаков эффективного размножения не наблюдалось.

Таблица 6. Влияние ферментации куриного помета в течение 9 месяцев на выживаемость дождевых червей

Показатель	Количество		
	Выжившие особи	Коконы	Выжившие особи
T1	1,67 ± 0,58 ^{b,c}	2,00 ± 1,00 ^d	2,67 ± 0,58 ^c
T2	4,67 ± 0,58 ^a	7,33 ± 0,58 ^a	7,33 ± 0,58 ^a
T3	2,33 ± 0,58 ^b	3,33 ± 0,58 ^c	3,00 ± 1,00 ^c
T4	3,33 ± 0,58 ^b	5,67 ± 0,58 ^b	5,67 ± 0,58 ^b
T5	0,67 ± 0,58 ^{b,c}	0,67 ± 0,58 ^e	1,00 ± 1,00 ^d

Полученные данные показывают, что по мере увеличения продолжительности ферментации снижается ингибирующее действие субстрата на дождевых червей, а роль структурных добавок в улучшении его свойств становится более выраженной. Это соответствует выводам J. Domínguez, M. Gómez-Brandón, отметивших, что структурное регулирование субстрата способствует оптимизации микробиологических условий и повышению адаптивности дождевых червей [2].

Оценка биоэкологических показателей дождевых червей при 12-месячном сроке предварительного компостирования. С увеличением продолжительности ферментации до 12 месяцев все показатели экологической эффективности достигли наилучших значений (табл. 7). Вариант Т2 вновь продемонстрировал лучшие результаты: среднее количество выживших червей составило 48,33, число коконов – 10,67, количество молодняка – 20,33, что статистически значимо превышает аналогичные показатели в других вариантах ($p < 0,05$). Вариант Т4 также характеризовался высокой выживаемостью и активным размножением. Варианты Т1 и Т3 показали улучшение, однако их репродуктивный потенциал уступал Т2 и Т4. В варианте Т5 в четвертый раз подряд не было зафиксировано эффективного размножения.

Таблица 7. Влияние времени ферментации куриного помета в течение 12 месяцев на выживаемость дождевых червей

Показатель	Количество		
	Выжившие особи	Коконь	Выжившие особи
Т1	24,67 ± 0,58 ^c	3,33 ± 0,58 ^c	9,33 ± 0,58 ^d
Т2	48,33 ± 1,15 ^a	10,67 ± 0,58 ^a	20,33 ± 0,58 ^a
Т3	21,67 ± 0,58 ^d	4,33 ± 1,15 ^c	11,33 ± 0,58 ^c
Т4	41,33 ± 0,58 ^b	7,33 ± 0,58 ^b	14,33 ± 0,58 ^b
Т5	0 ^e	0 ^d	0 ^e

Полученные данные свидетельствуют о том, что 12-месячная предварительная ферментация куриного помета в смешанном субстрате варианта Т2 (60 % помета, 20 % соломы, 20 % торфа) обеспечивает оптимальную экологическую конфигурацию: в этих условиях существенно снижается ингибирующее действие субстрата на дождевых червей и стабилизируются его основные физико-химические свойства. Эти выводы согласуются с результатами исследований, в соответствии с которыми длительная стабилизация субстрата способствует поддержанию высокой репродуктивной активности популяций дождевых червей [11].

В целом по мере увеличения продолжительности ферментации концентрация потенциально ингибирующих факторов в субстрате на основе куриного помета снижалась, а показатели выживаемости и размножения червей улучшались. Особенно выраженные положительные эффекты были зафиксированы в вариантах Т2 и Т4, где содержание структурных добавок и доля помета находились в оптимальном соотношении, способствуя формированию устойчивой экосистемы. Наоборот, в варианте Т5 даже по истечении 12 месяцев не наблюдалось признаков размножения, что указывает на сохраняющееся экологическое несоответствие однородного субстрата, связанное с его рН, воздухообменом и другими ограничениями [12].

Таким образом, экспериментально подтверждена точка зрения ряда авторов, согласно которой умеренная степень разложения органического сырья и наличие источников углерода способствуют стабилизации популяции дождевых червей [13, 14]. Настоящее исследование также позволило уточнить конкретные параметры (пропорции и сроки), обеспечивающие наилучшую экологическую эффективность процесса вермикомпостирования.

Заключение. Системно оценено влияние продолжительности предварительной ферментации куриного помета и состава субстрата на эффективность вермикомпостирования. Установлено, что 3-месячная ферментация не обеспечивает достаточного снижения ингибирующего действия субстрата на дождевых червей, вследствие чего сохраняется высокая смертность и подавление размножения *Eisenia foetida*. При увеличении срока до 6–9 месяцев физико-химические характеристики субстрата улучшаются, особенно в вариантах Т2 и Т4, где присутствуют структурные добавки (солома и торф), способствующие формированию более благоприятной среды обитания для дождевых червей. Наиболее высокие показатели жизнеспособности и репродуктивной активности зафиксированы при 12-месячной ферментации, особенно в варианте Т2, что свидетельствует о достижении оптимального баланса между стабильностью и питательной ценностью субстрата. Наоборот, субстрат без структурных добавок (Т5) даже через год сохранял неблагоприятные свойства и не обеспечивал размножения червей. Таким образом, установлено, что умеренная степень стабилизации в сочетании с рациональной структурной коррекцией существенно повышает биологическую эффективность вермикомпостирования. Определены оптимальные параметры – 12 месяцев предварительной ферментации субстрата варианта Т2 (60 % помета, 20 % соломы, 20 % торфа), обеспечивающие наилучшее сочетание выживаемости и репродуктивной активности дождевых червей с устойчивыми физико-химическими свойствами субстрата, и рекомендованы для практического применения в условиях сельской переработки органических отходов. Следует подчеркнуть, что

исследования проводились в лабораторных условиях; дальнейшие работы должны включать полевые и пилотные испытания для комплексной оценки экологической устойчивости и агропрактической применимости технологии.

Комплексное использование структурных добавок уже на этапе компостирования способствует адаптации червей и стабилизации физико-химических свойств субстрата, что может снижать риск атмосферных выбросов при утилизации помета и в совокупности подтверждает экологическую целесообразность предложенной технологии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Lim, S.-L. Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis / S.-L. Lim, L.-H. Lee, T.-Y. Wu // *Journal of Cleaner Production*. – 2016. – Vol. 111. – P. 262–278.
2. Domínguez, J. The influence of earthworms on nutrient dynamics during vermicomposting / J. Domínguez, M. Gómez-Brandón // *Waste Management & Research*. – 2013. – Vol. 31, № 8. – P. 859–868.
3. Jia, A. P. Effects of manure application on soil ammonia oxidation and functional microorganism / A. P. Jia, Y. T. Sun, W. Y. Li // *Journal of Agro-Environment Science*. – 2014. – Vol. 33, № 3. – P. 415–421.
4. Biodegradation of antibiotic residues in chicken manure by composting processes / S. Salma, R. E. Junita, E. Handayanto [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – Vol. 648, № 1. – Art. ID 012179.
5. Effects of microbial culture and chicken manure biochar on compost maturity and greenhouse gas emissions during chicken manure composting / H. Chen, S. K. Awasthi, T. Liu [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. – 2020. – Vol. 389. – Art. ID 121908.
6. Transformation of soil humic acids by *Aporrectodea caliginosa* earthworm: Effect of gut fluid and gut associated bacteria / V. Tikhonov, J. Zavgorodnyaya, V. Demin [et al.] // *European Journal of Soil Biology*. – 2016. – Vol. 75. – P. 47–53.
7. Quantitative relationship between earthworms' sensitivity to organic pollutants and the contaminants' degradation in soil: a meta-analysis / H. Chao, M. Sun, Y. Wu [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. – 2022. – Vol. 429. – Art. ID 128286.
8. Zubillaga, M. Phytotoxicity of biosolids compost at different degrees of maturity compared to biosolids and animal manures / M. Zubillaga, R. Lavado // *Compost Science & Utilization*. – 2006. – Vol. 14, № 4. – P. 267–270.
9. How earthworm density affects microbial biomass and activity in pig manure / M. Aira, J. Domínguez, S. Mato // *European Journal of Soil Biology*. – 2006. – Vol. 42, № 1. – P. 21–26.
10. Domínguez, J. Influence of bedding material on worm population dynamics and microbial activity during vermicomposting / J. Domínguez, M. Aira, M. Gómez-Brandón // *Bioresource Technology*. – 2010. – Vol. 101, № 11. – P. 3732–3737.
11. Jayakumar, V. Biodynamics of epigeic earthworm *Eudrilus eugeniae* and *Eisenia fetida* during recycling of poultry waste amended with different organic food sources / V. Jayakumar, S. S. Murugan, S. Manivannan // *International Archives of Applied Science and Technology*. – 2018. – Vol. 9, № 4. – P. 46–51.
12. Martin, M. Labile carbon affects fecundity of *Omodeoscolex divergens* and *Eudrilus eugeniae* under pure and mixed culture vermicomposting / M. Martin, G. Eudoxie, G. Gouveia // *Compost Science & Utilization*. – 2020. – Vol. 28, № 1. – P. 1–15.
13. Hashemimajd, H. Study of structural changes in organic matter during the composting and vermicomposting of cow dung and filter cake using ¹³C nuclear magnetic resonance spectroscopy / H. Hashemimajd, S. H. Jamaati-e-Somarin // *Waste Management*. – 2013. – Vol. 33, № 1. – P. 61–68.
14. Oriented regulation of earthworm production and compost quality by a degradable/non-degradable carbon ratio adjustment / M. Lin, J. Wang, H. Tang [et al.] // *Journal of Environmental Management*. – 2024. – Vol. 349. – Art. ID 119281.

Поступила 11.06.2025