

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2024-2-174-182>
УДК 595.14

Поступила в редакцию 30.10.2024
Received 30.10.2024

ПЕРЕРАБОТКА ОТРАБОТАННОГО ГРИБНОГО СУБСТРАТА МЕТОДОМ ВЕРМИКОПОСТИРОВАНИЯ

М. А. Шелоник, Г. Г. Янута

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. В связи с повышенным интересом в последние годы к грибоводству актуальными становятся вопросы переработки отработанного грибного субстрата. Перспективным и экологически безопасным методом для решения этой проблемы является вермикомпостирование. Приведены доводы по использованию отработанного грибного субстрата в качестве источника питания для вермикультуры. Исследованы свойства вермикомпоста относительно его влияния на растения с помощью вегетационных и фитотоксических опытов. Полученные результаты свидетельствуют, что для образца, переработанного с помощью вермикомпостирования, отмечается высокая ростостимулирующая активность, в сравнении с образцом без переработки. Метод вермикомпостирования позволяет не только переработать образующиеся отходы, но и получить новые продукты с улучшенными биологическими и физико-химическими свойствами, которые могут найти применение в сельском хозяйстве.

Ключевые слова: отработанный грибной субстрат; вермикомпостирование; вермикомпост; грибоводство; вермитехнология.

Для цитирования. Шелоник М. А., Янута Г. Г. Переработка отработанного грибного субстрата методом вермикомпостирования // Природопользование. – 2024. – № 2. – С. 174–182.

RECYCLING OF USED SPENT MUSHROOM SUBSTRATE BY A VERMICOMPOSTING METHOD

M. A. Shelonik, G. G. Yanuta

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. All over the world, the formation of difficult-to-process waste is a pressing issue for all industries, including mushroom growing, whose volumes of waste production can be up to 60 %. Storing, burying or burning waste does not solve the problem, but only aggravates the negative consequences, especially in relation to the environment. A possible and promising solution to this problem may be the use of vermicomposting, since it allows not only completely process waste, but also obtain new environmentally friendly products. It has been established that spent mushroom substrate processed by worms has growth-stimulating activity in relation to plants, which increased as it was processed, and a complete absence of phytotoxicity.

Keywords: spent mushroom substrate; vermicomposting; vermicompost; mushroom growing; vermitechnology.

For citation. Shelonik M. A., Yanuta G. G. Recycling of used spent mushroom substrate by the vermicomposting method. *Nature Management*, 2024, no. 2, pp. 174–182.

Введение. Ежегодно в мире образуется около 3,5 млрд т отходов, из них 2,1 млрд т составляют твердые коммунальные отходы, 1,2 млрд т – отходы от сельскохозяйственных предприятий [1]. Не менее трети из всех отходов не перерабатывается экологически безопасным методом, что объясняется постоянно растущими объемами и сложностью состава образующихся отходов. Грибоводство как активно развивающаяся отрасль данная проблема не обошла стороной. Высокий спрос на продукцию и переход населения планеты на здоровое питание не только способствуют развитию грибного рынка, но вместе с тем увеличивают объемы образуемых отходов. Согласно статистическим данным, на 1 кг продукции образуется около 4–5 кг отработанного грибного субстрата (далее – ОГС) [2]. ОГС представляет собой отход грибоводческих предприятий, который содержит остатки мицелия и плодовых тел грибов, большое количество питательных и минеральных веществ, в том числе макро- и микроэлементов (азот, кальций, калий и др.). Богатый химический состав и низкая себестоимость отхода позволили мировым производителям, в первую очередь это касается стран Азии, занимающих лидирующую позицию, использовать ОГС в различных сферах деятельности, начиная от сельского хозяйства и заканчивая энергетикой [3]. К сожалению, многие отечественные производители как крупных, так и мелких

предприятий не имеют подобных результатов и рассматривают ОГС в большей степени как отход производства, для которого один путь – складирование или захоронение. Использование ОГС таким образом имеет негативные последствия: во-первых, из-за растущих объемов образующихся отходов приходится отводить значительные площади для их складирования и захоронения, которые с каждым годом только растут, в то время как подавляющая часть отходов может быть переработана и использована в качестве сырья для создания новых материалов; во-вторых, значительное скопление отходов может привести к выделению опасных химических веществ или заражению патогенными микроорганизмами или другими вредителями, которые негативно влияют на окружающую среду. Переработка отхода является альтернативным путем, который выгоден как с экономической, так и с экологической точки зрения. Причем следует заметить, что наибольший интерес отдают биологическим направлениям, ввиду их экологической безопасности и эффективности в сравнении с другими. Одним из успешных на сегодня биотехнологических направлений является вермифтехнология, которая разводит и использует специально выведенных дождевых червей с целью не только переработки отходов, но и получения экологически безопасной биопродукции.

Цель работы – применение метода вермикомпостирования путем переработки отработанного грибного субстрата для получения новых продуктов.

Материалы и методы исследования. Объектами исследования служили вермикультура технических дождевых червей и образцы ОГС до вермикомпостирования, после него, с добавлением мела. Для образцов ОГС определяли общетехнические характеристики (влажность, зольность, рН) согласно [4]; для определения ростостимулирующей активности проводили вегетационные и фитотоксические опыты. Вегетационные опыты проводили согласно ISO 11269-2:2012. Для определения вегетационной и фитотоксической активности в качестве тест-культуры использовали семена редьки масличной (*Brassica rapa*) с величиной всхожести не менее 80 %, предварительно прошедшие лабораторный контроль качества на всхожесть согласно ГОСТ 12038-84.

Результаты и их обсуждение. Вермифтехнология – комплекс мероприятий, в ходе которых культура технических дождевых червей используется для переработки отходов и одновременно для получения новых продуктов. В настоящее время биотехнология переработки органических отходов с помощью вермифтехнологии широко применяется во многих странах, особенно в США, Канаде, Китае, Индии и др. В Республике Беларусь также имеются, хоть и в малом количестве, предприятия, занимающиеся червями. В качестве источника питания для них чаще используют конский навоз из-за высокого содержания там целлюлозы. Однако в последнее время, ввиду невысокого развития коневодческой отрасли в нашей стране, предпочтение отдается более доступным отходам.

Вермифтехнология условно разделяется на два биотехнологических направления: вермикультивирование и вермикомпостирование [5]. Вермикультивирование в большей степени ориентировано на интенсифицированное производство биомассы червей с целью их последующего применения в качестве кормовой добавки в животноводческих и рыбных хозяйствах. Вермикомпостирование, наоборот, сосредоточено на переработке различного профиля отходов и получении продукта, обогащенного экскрементами червей (копролитами), – вермикомпоста или биогумуса. Как правило, процесс вермикомпостирования происходит либо в контейнерах («закрытый метод»), либо в открытом пространстве в виде кучи («открытый метод»). Первый метод предпочтителен для малых хозяйств в небольших объемах, в то время как второй чаще используется для переработки больших объемов отходов [5, 6].

Согласно теории И. Н. Титова, дождевых червей по способу питания классифицируют на фитофагов (питающиеся растительными остатками или дебрисом), геофагов (питающиеся почвой) и геофитофагов (смешанное питание). По условиям среды обитания их также разделяют на эпигеики, анецики, эндогеики. Группа эпигеики обитает в основном в подстилке на поверхности почвы и пигментирована; эндогеики – обитают глубже в почвенном профиле (на 10–15 см), питаются как почвой, так и растительным опадом, в отличие от эпигеиков, они слабо пигментированы; анецики – относительно крупные виды, обитающие в вертикальных норах, которые могут простираться на несколько метров вглубь почвы. Наиболее подходят для вермикомпостирования эпигейные виды, благодаря их толерантности к меняющимся условиям окружающей среды, высокому уровню воспроизводства потомства с коротким жизненным циклом, высоким показателям скорости потребления и переваривания органических веществ, простоте культивирования. Из них для вермикомпостирования широко используют такие виды, как *Eisenia fetida*, *Eisenia andrei* и *Perionyx excavatus* [7].

Хотя дождевые черви и являются ключевыми игроками в процессе вермикомпостирования, именно микроорганизмы выполняют биохимическое разложение органического вещества, независимо от того, где они находятся: в почве или в кишечнике червя [8]. Присутствие синергетических отношений между дождевыми червями и микроорганизмами неоспоримо, поскольку благодаря своей деятельности, черви создают благоприятные условия для их работы [9]. Согласно литературным источникам, разделение микроорганизмов происходит на три группы: микроорганизмы, изначально обитающие в органическом субстрате; микроорганизмы, обитающие в кишечнике дождевых червей; микроорганизмы, обитающие в субстрате после его компостирования. Микробный биом был разделен между типами Proteobacteria, Bacteroidetes, Actinobacteria, Firmicutes и Verrucimicrobia [8–11]. Следует учитывать,

что в зависимости от перерабатываемого субстрата бактериальное сообщество меняется. Если взять субстрат из навоза, помета или сточных вод, то, как правило, материалы, перерабатываемые животными, имеют большее разнообразие и более высокую численность микроорганизмов. Из микроорганизмов, встречающихся в процессе вермикомпостирования, известны фосфатмобилизирующие *Bacillus* (*Firmicutes*), *Streptomyces* (*Actinobacteria*), *Pseudomonas* sp. (*Proteobacteria*) и азотфиксирующие *Azobacter* (*Proteobacteria*). Отдельно встречались виды, вырабатывающие соединения, стимулирующие рост растений и способствующие лучшей биodeградации отработанного субстрата.

В качестве источников питания для вермикюльтуры используют различные субстраты и их комбинации с другими материалами. Отходами для вермикомпостирования являются отходы сельского хозяйства, либо от твердых коммунальных отходов, либо от отходов промышленности [8–13]. Наиболее часто для вермикомпостирования используют именно отходы сельского хозяйства из-за их высокой питательности, но кроме них черви способны перерабатывать отходы промышленности (например: угольная зола, жом, пивная дробина, шламы бумажной и хлебопекарной промышленности и т. д.) [12, 13]. У данного направления есть перспектива в будущем, поскольку оно позволяет не только переработать два разных вида отходов, но и получить продукты с добавленной стоимостью [13].

Однако для правильного развития вермикюльтуры в материале должны соблюдаться такие параметры, как температура, влажность, pH, соотношение C : N [14]:

1) температура: влияние температуры неоспоримо не только для дождевых червей, но и для обитающих в отработанном субстрате микроорганизмов, которые активизируются при определенной температуре и, соответственно, участвуют в его полном разложении [11];

2) уровень pH: дождевые черви предпочитают нейтральную среду (pH = 6,0–7,0), поскольку величины кислотности выше или ниже 7,0 не способствуют их развитию, а соответственно, и размножению в субстрате [14];

3) влажность: из-за своей физиологии черви нуждаются во влажной среде обитания, поскольку без дыхания черви не смогут развиваться и давать потомство;

4) соотношение C : N: данный показатель необходим для контроля бактериальной активности в субстрате. Высокое соотношение C : N приводит к снижению бактериальной активности из-за нехватки азота, который участвует в синтезе белков и аминокислот. Низкое соотношение C : N также нежелательно, поскольку приводит к высоким концентрациям аммиака, который может быть губителен для червей. Процесс вермикомпостирования будет протекать должным образом, если соотношение C : N составляет около 25–30 и будет уменьшаться в ходе процесса. Углерод уменьшается, потому что гетеротрофные бактерии используют органический субстрат в качестве источника электронов, после чего углерод окисляется и высвобождается в атмосферу в виде CO₂. Для микроорганизмов азот в виде аммиака также может быть использован и преобразован в нитриты и нитраты, которые потом могут восстанавливаться, а выделившийся азот уходить в виде N₂.

Вермикомпостирование представляет собой сложную комбинацию биохимических процессов, происходящих с помощью дождевых червей и микроорганизмов для переработки образующихся отходов и превращающих их в новый продукт. Конечный продукт жизнедеятельности червей – вермикомпост, представляющий собой их экскременты (копролиты), обогащенные гуминовыми веществами, биологически активными соединениями, гормонами и т. д. [12–14]. Если рассматривать изменения, которые претерпел субстрат после вермипереработки, то с физической точки зрения вермикомпост обладает высокой водоудерживающей способностью и пористостью; оптимальная влажность находится в пределах 60–80 % (поскольку высокая влажность способствует лучшему разложению твердых отходов). Наблюдается снижение насыпной плотности, размер частиц варьируется в зависимости от природы субстратов: чем больше размер частиц, тем меньше удельная поверхность и тем меньше она доступна для деятельности микроорганизмов.

С химической точки зрения, в вермикомпосте происходит снижение pH за счет образования органических кислот и выделения CO₂ во время разложения [15]. Как правило, на начальном этапе вермикомпостирования pH увеличивается из-за образования азотистых продуктов в субстрате, а после уменьшается на конечном этапе из-за нитрификации и образования органических кислот и улетучивания аммиака. Показатель pH является важным фактором, поскольку характеризует не только активность микроорганизмов, но и доступность питательных веществ. Низкий показатель pH характеризует высокую доступность макроэлементов и меньшую доступность микроэлементов, в случае высокого показателя pH – все наоборот. Нейтральная среда гарантирует доступность макро- и микроэлементов для правильного роста и развития вермикюльтуры. Кроме pH снижается общий органический углерод (ТОС), что обусловлено потреблением органики дождевыми червями в качестве источника энергии и потерей в виде углекислого газа через дыхание. Наблюдается повышение емкости катионного обмена (ЕКО) во время вермикомпостирования, что связано с накоплением карбоксильных и фенольных групп при процессе гумификации.

С агрономической точки зрения, в вермикомпосте увеличивается содержание фосфора из-за активности фосфатмобилизирующих бактерий. Повышается концентрация азота, калия, натрия, кальция,

магния, серы. Общая концентрация азота увеличивается из-за минерализации, полисахаридов, конечных азотистых продуктов, гормонов, вырабатываемых дождевыми червями [14, 15]. Наблюдается пониженная концентрация тяжелых металлов, что обусловлено образованием металлокомплекса и аккумуляцией в тканях дождевых червей. После переработки полученный вермикомпост содержит высокий процент гумуса. Гуминовая кислота, присутствующая в гумусе, помогает растениям эффективнее извлекать питательные вещества из почвы, стимулирует рост побегов и корней, помогает преодолеть различные стрессы и участвует в профилактике вредителей (таких как нематоды, фитопатогенные бактерии и грибки) и некоторых насекомых [13]. В сравнении с микробиологическим компостированием, вермикомпостирование как процесс имеет ряд преимуществ. Вермикомпостирование – в первую очередь мезофильный процесс, в котором участвуют дождевые черви и живущие в них микроорганизмы, которые активны при температуре от 10 °С до 28 °С (имеется в виду не температура окружающей среды, а температура внутри органического материала). Процесс происходит в разы быстрее, чем компостирование, поскольку почвенный материал проходит через кишечник дождевого червя, происходит его трансформация, в результате чего полученные отходы дождевых червей (копролиты) обладают высокой микробной, стимулирующей и антибактериальной активностью для растений [12–14].

Кроме биомассы червей и вермикомпоста посредством вермикомпостирования можно получить и другие продукты. Вермикула представляет собой кормовой препарат, состоящий из переработанной биомассы дождевых червей, перетертых в муку. Это богатый источник животного белка, незаменимых аминокислот, жиров, витаминов и минералов, который найдет применение в животноводстве и рыболовном хозяйстве [14]. Другим примером может служить вермикомпостный чай, представляющий собой экстракт из вермикомпоста, настоянный в высокоаэрированной воде. Препарат кроме высокого содержания полезных элементов также содержит аэробные бактерии и актиномицеты, которые помогают обогащать почву и подавлять различные болезни растений. Использование вермикулы в качестве удобрений поможет улучшить структуру почвы, ускорить созревание саженцев культурных растений и т. д. [16]. Однако несмотря на многочисленные исследования, посвященные вермикомпостированию, все еще существуют пробелы в знаниях, которые могли бы помочь максимально раскрыть потенциал его применения. Одним из таких вопросов является детальное изучение состава бактериальных сообществ, обитающих не только в субстрате, но и в кишечнике самих червей. Процесс разложения происходит в течение определенного периода времени и может быть разделен на несколько фаз, в которых происходят изменения в составе микробного сообщества. Исследование в данной области не только позволило бы лучше понять синергию между дождевыми червями и микроорганизмами, но и использовать эти знания для определения свойств конечного продукта. Еще один вопрос: биодоступность тяжелых металлов и их накопление. Согласно литературным источникам, вермикомпост влияет на биодоступность и подвижность тяжелых металлов в почве, что делает возможным его использование в фиторемедиации, тем самым позволяя растениям увеличивать накопление определенных металлов, которых не хватает в почвах. Один из примеров – недостаток цинка в почвах стран Азии. Цинк является важным элементом для всех живых организмов (у растений он входит в состав различных ферментов, участвует в образовании ростовых веществ) [18]. В Индии почвы с дефицитом цинка могут вызывать серьезные проблемы со здоровьем у населения, такие как снижение иммунитета, заболевания кожи, пищеварения и т. д. Ученые проводили исследования по обогащению почвы цинком с целью увеличения его концентрации и накопления в почвах, на которых выращивают сельскохозяйственные культуры, а также удовлетворения потребности людей в данном элементе. Кроме цинка это может касаться и других металлов, например железа. Детальное изучение данного процесса в вермикомпосте может найти применение в природоохранной деятельности и использоваться для озеленения территорий [19].

Выбор использования ОГС в качестве источника питания для вермикультуры объясняется наличием нейтрального pH, необходимым соотношением C : N, достигаемым при приготовлении субстрата, и высоким содержанием питательных веществ. Для проведения исследований вермикультуру червей эпигнеков *Eisenia fetida* вносили в ОГС от выращивания шампиньонов, после чего через определенные промежутки времени отбирали пробы для проведения дальнейших опытов, фиксировали состояние ОГС и червей. Процесс вермикомпостирования контролировали по таким показателям, как общая численность (количество червей), общий вес, длина особей (см. рис. 1).

На выходе полученный вермикомпост приобретал однородную структуру, черный цвет и не имел запаха. Согласно рис. 1, численность особей в начале опыта значительно уменьшалась, однако после 14 суток стабилизировалась и либо не изменялась до конца проведения эксперимента, либо увеличивалась, что можно объяснить полной адаптацией червей к исследуемому субстрату. Примечательно, что изменение численности происходило при внесении добавки в ОГС. Общая биомасса червей до вермикомпостирования и после значительно отличалась, поскольку питательные вещества, содержащиеся в отработанном субстрате, по мере переработки их червями истощались. До вермикомпостирования общая биомасса составляла от 0,3 до 1,7 г; после компостирования – от 0,4 до 1,09 г. Наибольшая длина особей наблюдалась в ОГС до вермикомпостирования (от 3 до 5 см), в отличие от других объектов. В ОГС после компостирования и с добавлением добавки длина червей варьировалась от 2,1 до 3,1 см соответственно.

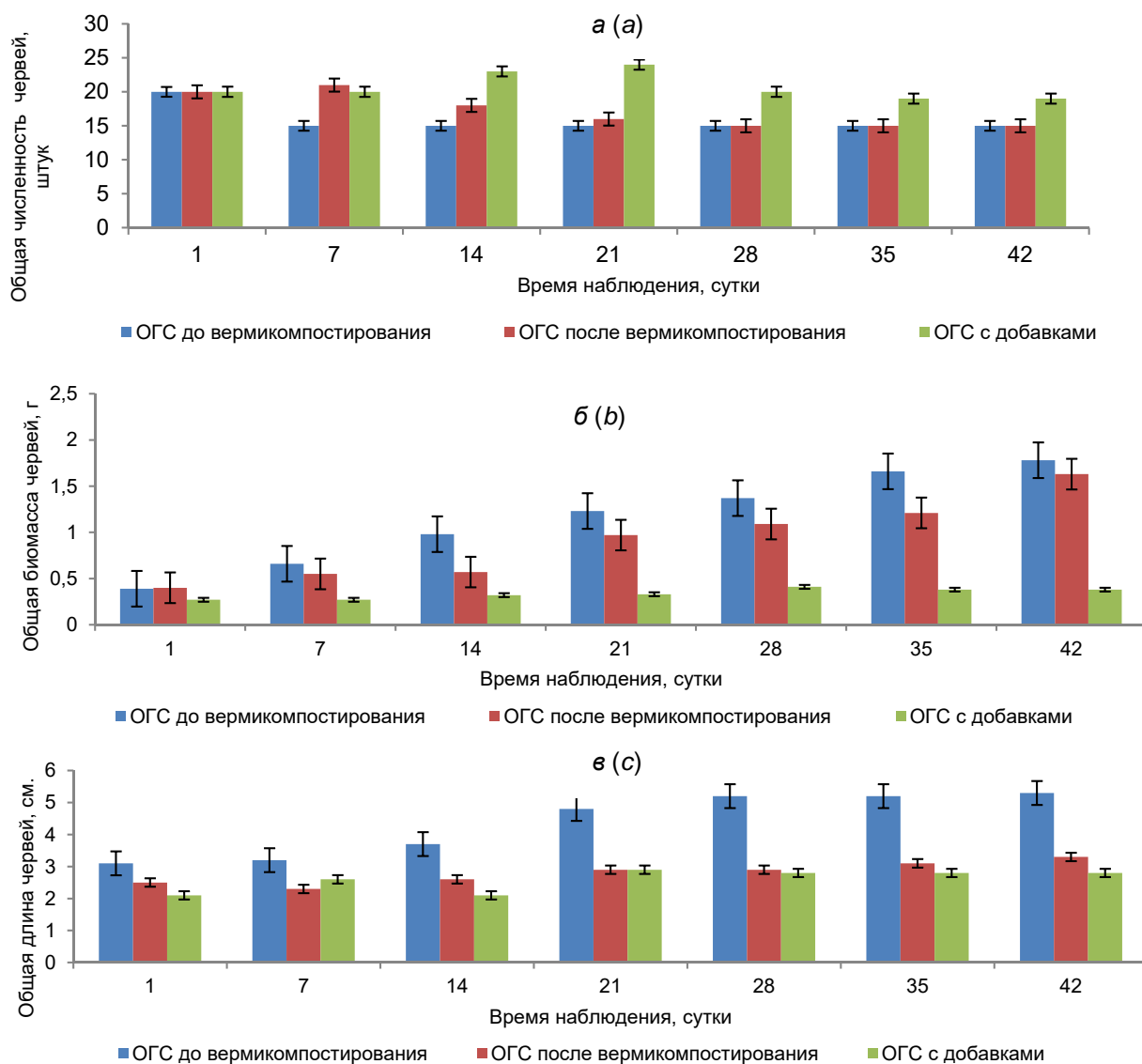


Рис. 1. Динамика изменения общих показателей червей во время вермикомпостирования: а – численность особей; б – биомасса особей; в – длина особей

Fig. 1. Dynamics of change in general indicators of worms during vermicomposting: а – number of individuals; б – total weight; в – length of individuals

Фитотоксические исследования. Фитотестирование как метод оценки почв используется издавна для определения качества семян, плодородия почв сельскохозяйственных культур, в биомедицинских исследованиях и относительно недавно – в природоохранной сфере для оценки экологического качества природных сред (вод, почв). Для проведения опыта готовили вытяжки из ОГС, на которых высевали семена тест-культуры (редька масличная) и инкубировали при температуре 23–24 °С. Оценка результатов исследований проводили на 3-и сутки по таким показателям, как энергия прорастания семян, длина побегов и корней, биомасса (см. таблицу). На основании имеющихся показателей рассчитывали индекс токсичности (ИТФ_{общ}) для определения класса опасности:

$$\text{ИТФ}_{\text{общ}} = \frac{T_1 / T_{K_1} + T_2 / T_{K_2} + T_3 / T_{K_3}}{3},$$

где T_1 , T_2 и T_3 – значения опыта первого (например, длина корневой части), второго и третьего показателей соответственно, T_{K_1} , T_{K_2} и T_{K_3} – значения контроля первого, второго и третьего показателей соответственно.

Результаты фитотоксических исследований с отработанным грибным субстратом

Results of phytotoxic studies with a spent fungal substrate

Объект	Длина, см		Энергия прорастания, %	Биомасса надземной части, г	ИТФ			Класс токсичности (ИТФ _{общ})
	корень	побеги			по корешковой части	по наземной части	по биомассе	
Контроль	1,73	0,85	80	1,101	—	—	—	—
ОГС до вермикомпостирования	2,305	0,91	85	1,136	1,33	1,07	1,101	V
ОГС после вермикомпостирования	2,52	0,89	90	1,12	1,45	1,04	1,02	VI
ОГС с добавками	2,65	0,84	90	1,211	1,53	0,98	1,10	VI

Примечание: VI класс – ИТФ > 1,10 – фактор, оказывает стимулирующее действие на тест-объект; V класс – ИТФ = 0,91–1,10 – фактор не оказывает существенного влияния на развитие тест-объекта, т. е. величина тест-функции находится на уровне контроля; IV класс – ИТФ = 0,71–0,90 – низкая токсичность; III класс – ИТФ = 0,50–0,70 – средняя токсичность; II класс – ИТФ < 0,50 – высокая токсичность фактора; I класс – сверхвысокая токсичность, вызывает гибель тест-объекта.

На основе фитотоксических исследований установлено, что ОГС до вермикомпостирования относится к V классу опасности (т. е. фактор не оказывает существенного влияния на развитие тест-объекта), а ОГС после вермикомпостирования, как с добавками, так и без них, – к VI классу опасности (т. е. фактор оказывает стимулирующее действие на тест-объект). Полученные результаты свидетельствуют, что переработанный ОГС вермикультурой, не только не проявляет токсическую активность в отношении растений, но и оказывает стимулирующее действие, что согласуется с литературными данными о действии на растения [19].

Вегетационные опыты. Оценку результатов проводили на 14-е сутки по таким показателям, как энергия прорастания семян, длина побегов и корней, биомасса надземной части растений. Результаты экспериментов представлены на рис. 2–4, из которых видно, как происходят изменения ОГС до и после вермикомпостирования. Энергия прорастания для всех образцов составила 80 % и выше. В образцах с ОГС до и после вермикомпостирования установлено преобладание длины корней над побегами – в случае овса. И наоборот, преобладание длины побегов над корнями – в случае редьки и газонной травы. Доминирование длины побегов над корнями может возникать как адаптивная реакция на конкуренцию с другими растениями за свет. Доминирование длины корней над побегами можно объяснить их увеличением с целью лучшего поглощения веществ и воды из отработанного субстрата. Причем происходило не только увеличение главного корня, но и образование мелких придаточных корней. Наибольшая длина корней и побегов отмечалась для ОГС после вермикомпостирования (в среднем для корней от 4,1 до 5,65 (овес); от 2,9 до 5,1 (редька, газонная трава), побегов – от 3,2 до 4,7 (овес); от 4,1 до 5,4 (редька, газонная трава)). Для ОГС до вермикомпостирования результаты были ниже: для корней – от 2,9 до 4,2 (овес); побегов – от 2,93 до 4,0 (овес); от 2,9 до 3,78 (редька, газонная трава). Биомасса надземной части во все образцах по мере переработки отхода незначительно увеличивалась.

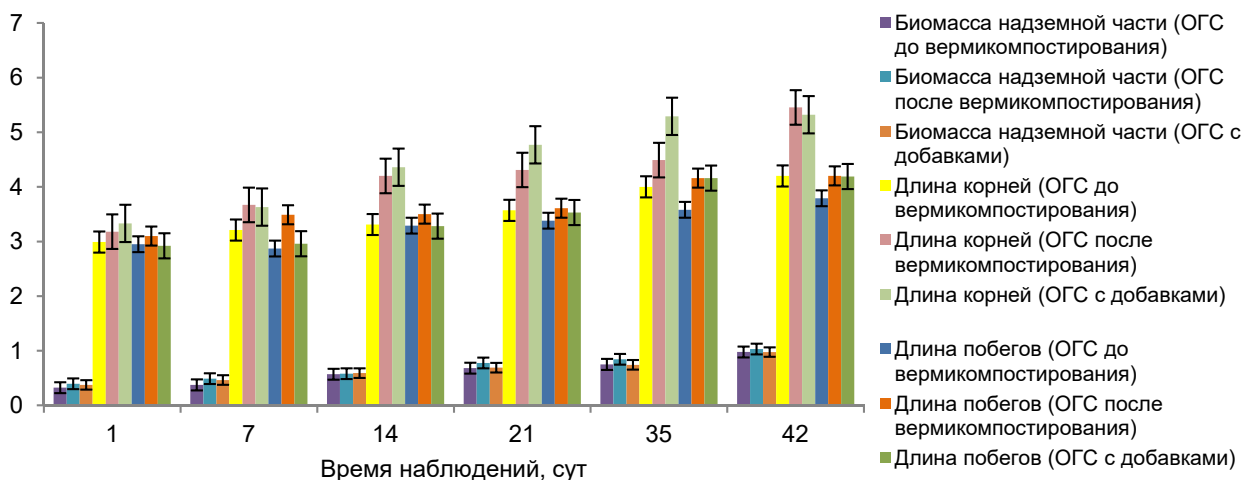


Рис. 2. Результаты вегетационных опытов с ОГС (редька)

Fig. 2. Results of vegetation experiments with SMS (radish)

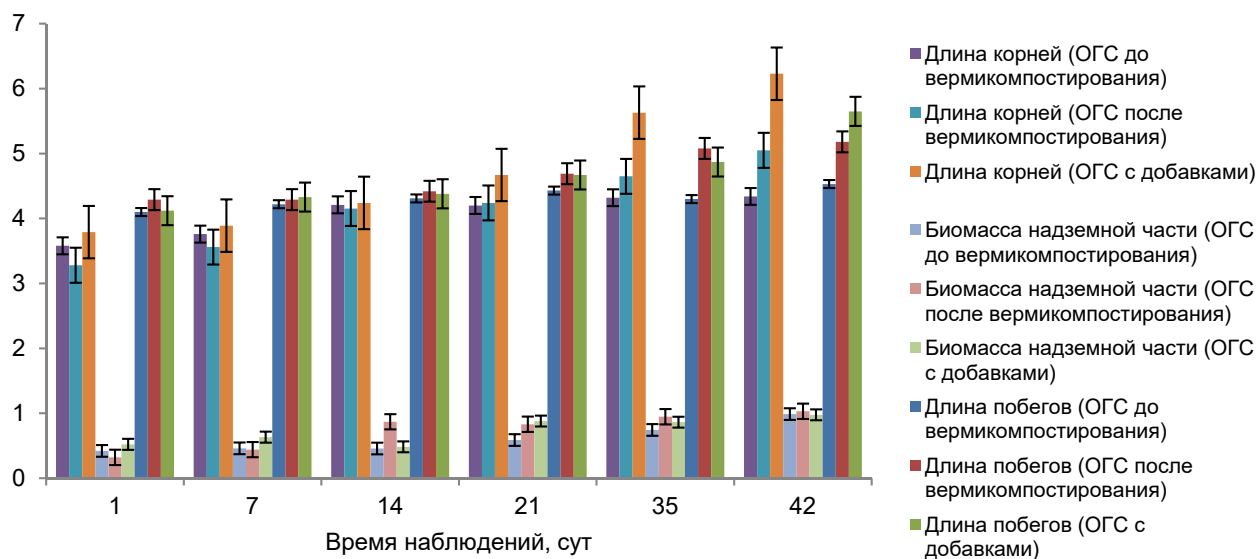


Рис. 3. Результаты вегетационных опытов с ОГС (овес)

Fig. 3. Results of vegetation experiments with SMS (oat)

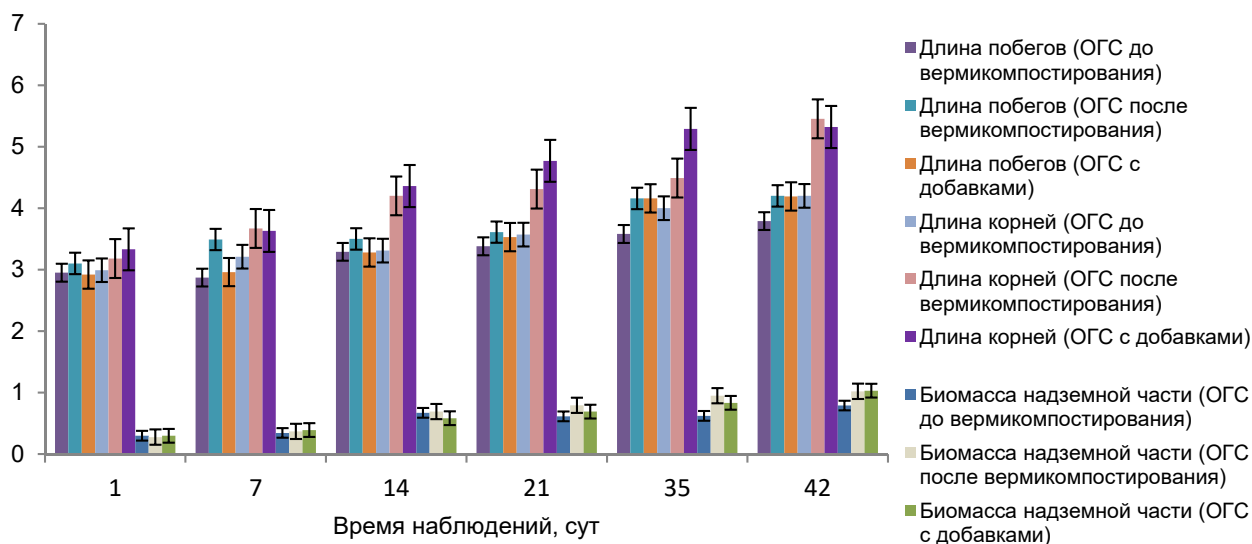


Рис. 4. Результаты вегетационных опытов с ОГС (газонная трава)

Fig. 4. Results of vegetation experiments with SMS (lawn grass)

Заключение. Вермикомпостирование имеет большой потенциал как направление для переработки широкого спектра отходов, производимых в различных областях деятельности человека, и получения высококачественных продуктов, которые могут иметь многоцелевое применение. Установлено, что ОГС как отход производства поддается переработке и на выходе можно получить новый продукт (вермикомпост) с новыми характеристиками. Для ОГС, переработанного вермикультурой, наблюдается стимулирующий эффект по отношению к растениям, который по мере переработки только усиливается. Кроме получения основных конечных продуктов переработки (вермикомпост и биомассы червей) есть возможность получения вермикуки как кормового белка или вермичая как удобрения в жидком виде. Есть направление, в котором ОГС смешивают с неперерабатываемыми отходами промышленности и получают сырье для дальнейшего разведения червей (отходы энергетических, целлюлозно-бумажных, пищевых предприятий и др.). На выходе полученный вермикомпост способен повышать урожайность почвы, улучшать плодородие почвы, физико-химические и биологические показатели в материале, обеспечивать получение скороспелой, высококачественной и экологически чистой продукции в экстремальных условиях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Reno, J. Waste and Waste Management / J. Reno // *Annual review of anthropology*. – 2015. – Vol. 44. – P. 557–572.
2. Recent advances and future directions on the valorization of spent mushroom substrate (SMS): a review / Yoong Kit Leong [ets.] // *Bioresource Technology*. – 2022. – Vol. 344. – P. 1–10.
3. Environmentally sustainable applications of agro-based spent mushroom substrate / F. Hanafi [et al.] // *J. of Material cycles and Waste Management*. – 2018. – Vol. 20, № 8. – P. 1383–1396.
4. Лиштван, И. И. Основные свойства торфа и методы их определения / И. И. Лиштван, Н. Т. Король. – Минск : Наука и техника, 1975. – 320 с.
5. Максимова, С. Л. Развитие технологии вермикомпостирования и вермикультивирования в Беларуси / С. Л. Максимова, Т. М. Шабанова, Ю. Ф. Мухин // *Вестник Полесского гос. ун-та. Сер. природовед. наук*. – 2008. – С. 44–47.
6. Kumar, S. *Integrated Waste Management* / S. Kumar. – India : National Environmental Engineering Research Institute, 2011. – Vol. II. – 484 p.
7. Титов, И. Н. Дождевые черви : руководство по вермикюльтуре : в 2 ч. / И. Н. Титов. – Иркутск : МФК Точка опоры, 2012. – Ч. 1 : Компостные черви. – 424 с.
8. Adhikary, S. Vermicompost, the story of organic gold : A review / S. Adhikary // *Agricultural Sciences*. – 2012. – Vol. 3, № 7. – P. 1–13.
9. Ahmad, A. Vermicomposting by bio-recycling of animal and plant waste : a review on the miracle of nature / A. Ahmad [et al.] // *Journal of Innovative Sciences*. – 2022. – Vol. 8, № 2. – P. 175–187.
10. Kertesz, M. A. Compost bacteria and fungi that influence growth and development of *Agaricus bisporus* and other commercial mushrooms / M. A. Kertesz, M. Thai // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2018. – Vol. 102, № 4. – P. 1639–1650.
11. Лысак, В. В. Микробиология. Практикум : пособие / В. В. Лысак, Р. А. Желдакова, О. В. Фомина. – Минск : Изд-во БГУ, 2015. – 115 с.
12. Bhattacharya, S. S. Effect of vermicomposting on the transformation of some trace elements in fly ash / S. S. Bhattacharya, G. N. Chattopadhyay // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. – 2006. – Vol. 75. – P. 223–231.
13. Comparing the nutrient changes, heavy metals, and genotoxicity assessment before and after vermicomposting of thermal fly ash using *Eisenia fetida* / B. Sohail [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2021. – Vol. 28. – P. 48154–48170.
14. Vermicomposting – facts, benefits and knowledge gaps / A. Vuković [et al.] // *Agronomy*. – 2021. – Vol. 11, № 10. – P. 1–20.
15. Changes in biochemical properties of cow manure during processing by earthworms (*Eisenia andrei*, Bouché) and the effects on seedling growth / R. M. Atiyeh [et al.] // *Pedobiologia*. – 2000. – Vol. 44, № 6. – P. 709–724.
16. Scheuerell, S. Compost tea: principles and prospects for plant disease control / S. Scheuerell, W. Mahaffee // *Compost science and utilization*. – 2002. – Vol. 10, № 4. – P. 313–338.
17. Sengupta, S. Enrichment of vermicompost for improving soil quality and ensuring Zn and Fe bioavailability through rice grain / S. Sengupta, S. Mukherjee, S. Halder // *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. – 2020. – Vol. 9. – P. 246–254.
18. Юрин, В. М. Минеральное питание растений : учеб. пособие / В. М. Юрин, С. Н. Найдун. – Минск : Изд-во БГУ, 2004. – 234 с.
19. Nik Nor Izyan, N. A. Potential of Spent Mushroom Substrate in Vermicomposting / N. A. Nik Norizyan, A. A. Jamaludin, N. Z. Mahmood // *Dynamic Soil, Dynamic Plant*. – Vol. 3, № 2. – P. 87–90.

References

1. Reno J. Waste and Waste Management. *Annual review of anthropology*, 2015, vol. 44, pp. 557–572.
2. Leong Y. K., Ma T. W., Chang J. S., Yang F. C. Recent advances and future directions on the valorization of spent mushroom substrate (SMS): a review. *Bioresource Technology*, 2022, vol. 344, pp.1–10.
3. Hanafi F., e. a. Environmentally sustainable applications of agro-based spent mushroom substrate. *J. of Material cycles and Waste Management*, 2018, vol. 20, no. 8, pp. 1383 –1396.
4. Lishtvan I. I., Korol N. T. *Osnovnye svoystva torfa i metody ih opredeleniya* [Basic properties of peat and methods for their determination]. Minsk, Science and Technology Publ., 1975, 320 p. (in Russian)
5. Maksimova S. L., Shabanova T. M., Muhin Yu. F. *Razvitie tekhnologii vermikompostirovaniya i vermikul'tivirovaniya v Belarusi* [Development of vermicomposting and vermiculture technology in Belarus]. *Vestnik Poleskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya prirodovedcheskih nauk = Bulletin of Polesie State University. Series of Natural Sciences*, 2008, pp. 44–47. (in Russian)
6. Kumar, S. *Integrated Waste Management*. Vol. II. India, National Environmental Engineering Research Institute, 2011, 484 p.
7. Titov I. N. *Dozhdevye chervi. Rukovodstvo po vermikul'ture v 2 chastyah. Chast' 1 Kompostnye chervi* [Earthworms. Vermiculture guide in 2 parts. Part 1 Compost worms]. Irkutsk, 2012, 424 p. (in Russian)
8. Adhikary S. Vermicompost, the story of organic gold: a review. *Agricultural Sciences*, 2012, vol. 3, no. 7, pp.1–13.
9. Ahmad A., Aslam Z., Bellitürk K., Ullah E., Raza A., Asif M. Vermicomposting by bio-recycling of animal and plant waste : a review on the miracle of nature. *J. of Innovative Sci.*, 2022, vol. 8, no. 2, pp. 175–187.

10. Kertesz M. A., Thai M. Compost bacteria and fungi that influence growth and development of *Agaricus bisporus* and other commercial mushrooms. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2018, vol. 102, no. 4, pp. 1639–1650.
11. Lysak V. V., Zheldakova R. A., Fomina O. V. *Mikrobiologiya. Praktikum* [Microbiology. Workshop]. Minsk, 2015, 115 p. (in Russian)
12. Bhattacharya S. S., Chattopadhyay G. N. Effect of vermicomposting on the transformation of some trace elements in fly ash. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, vol. 75, pp. 223–231.
13. Sohal B., Singh S., Kumar Singh S. I., Bhat S. A., Kaur J., Singh J., Vig A. P. Comparing the nutrient changes, heavy metals, and genotoxicity assessment before and after vermicomposting of thermal fly ash using *Eisenia fetida*. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, pp. 48154–48170.
14. Vuković A., Velki M., Ečimović S., Vuković R., Čamagajevac I. Š., Lončarić Z. Vermicomposting – Facts, Benefits and Knowledge Gaps. *Agronomy*, 2021, vol.11, no. 10, pp. 1–20.
15. Atiyeh R. M., Domínguez J., Subler S., Edwards C. A. Changes in biochemical properties of cow manure during processing by earthworms (*Eisenia andrei*, Bouché) and the effects on seedling growth. *Pedobiologia*, 2000, vol. 44, no. 6, pp. 709–724.
16. Scheuerell S., Mahaffee W. Compost tea: principles and prospects for plant disease control. *Compost science and utilization*, 2002, vol.10, no. 4, pp. 313–338.
17. Sengupta S., Mukherjee S., Halder S. Enrichment of vermicompost for improving soil quality and ensuring Zn and Fe bioavailability through rice grain. *J. of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 2020, vol. 9, pp. 246–254.
18. Yurin V. M., Najdun S. N. *Mineral'noe pitanie rastenij. Uchebnoe posobie* [Mineral nutrition of plants. Study guide]. Minsk, 2004, 234 p. (in Russian)
19. Nik Nor Izyan N. A., Jamaludin A. A., Mahmood N. Z. Potential of Spent Mushroom Substrate in Vermicomposting. *Dynamic Soil, Dynamic Plant*, vol. 3, no. 2, pp. 87–90.

Информация об авторах

Янута Григорий Григорьевич – кандидат биологических наук, доцент, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: yanutag@rumbler.ru

Шелоник Мария Александровна – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: maria.shelonik006@gmail.com

Information about authors

Grigoriy G. Yanuta – Ph. D. (Biological), Assistant Professor, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: yanutag@rumbler.ru

Mariya A. Shelonik – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: maria.shelonik006@gmail.com