

Влияние предварительной биоконверсии пшеничной соломы в модельной природоподобной системе на продуктивность растений

© 2024. Т. И. Зюбанова¹, к. б. н., м. н. с., О. М. Минаева^{1,2}, к. б. н., доцент,
Е. Е. Акимова¹, к. б. н., с. н. с., Е. Б. Дайбова¹, к. х. н., зав. ЛАЦ,

Н. Н. Терещенко^{2,3}, д. б. н., профессор,

¹СибНИИСХиТ-филиал СФНЦА РАН,
634050, Россия, г. Томск, ул. Гагарина, д. 3,

²Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 36,

³Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 40,

e-mail: zyubanovat.i@gmail.com, mom05@mail.ru,
akimovanell@mail.ru, Edaibova@yandex.ru, ternat@mail.ru

Исследования, направленные на поддержание высокой продуктивности и стабильности искусственных экосистем, воспроизводящих процессы естественных ценозов, актуальны и интересны. Эффективным представляется включение в модельные системы, направленные на получение продукции, участвующих в переработке растительных отходов звеньев – редуцентов и детритофагов. В качестве такого звена перспективно использование дождевых червей, которые, наряду с утилизацией органики, обогащают субстраты микробиотой, в том числе с антагонистической и ростостимулирующей активностями. Цель данного исследования – оценка перспективности предварительной биоконверсии пшеничной соломы высшими базидиальными грибами пилолистником тигровым (*Lentinus tigrinus*) и вёшенкой устричной (*Pleurotus ostreatus*) для увеличения продуктивности растений салата. Работа проведена в лабораторных условиях с модельными системами, состоящими из субстрата (торф, навоз крупного рогатого скота и пшеничная солома с биоконверсией и без), дождевых червей (*Eisenia fetida*) и растений салата (*Lactuca sativa* var. *crispa* сорт Кредо). По окончании экспериментов оценивали листовую площадь, массу каждого растения (сырую и сухую), продуктивность растений салата, содержание основных биогенных элементов в растительной ткани и субстрате. Учитывали количество и массу взрослых червей, количество ювенильных червей, количество коконов и выход копролита. Установлено наличие значительного фитотоксичного эффекта при внесении соломы в субстрат. Включение в субстрат переработанной базидиомицетами соломы (10%) оказывало благоприятное действие на состояние популяции червей. Выращивание салата на субстратах с биоконвертированной соломой при интродукции дождевых червей увеличивало содержание основных биогенных элементов в растениях. Интродукция червей способствовала значимому снижению фитотоксичности субстратов. Таким образом, можно рекомендовать включение отходов грибоводства (субстраты после получения плодовых тел), в системы продукции зелёных культур совместно с интродукцией в субстрат червей.

Ключевые слова: *Eisenia fetida*, *Lactuca sativa*, *Lentinus tigrinus*, *Pleurotus ostreatus*, переработка растительных отходов.

Effect of preliminary bioconversion of wheat straw on plant productivity in a model nature-like system

© 2024. T. I. Zyubanova¹ ORCID: 0000-0002-9429-9706, O. M. Minaeva^{1,2} ORCID: 0000-0002-5925-6022,

E. E. Akimova¹ ORCID: 0000-0002-3279-8200, E. B. Daibova¹ ORCID: 0000-0002-6881-9667,

N. N. Tereshchenko^{2,3} ORCID: 0000-0002-3084-6926,

¹Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, Branch of the Federal State Budgetary
Institution of Science, Siberian Federal Scientific Center
of Agrobiotechnologies, Russian Academy of Sciences,

3, Gagarina St., Tomsk, Russia, 634050,

²Tomsk State University,

36, Lenina Pr., Tomsk, Russia, 634050,

³Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
36, Lenina Pr., Tomsk, Russia, 634050,
e-mail: zyubanovat.i@gmail.com, mom05@mail.ru,
akimovanell@mail.ru, Edaibova@yandex.ru, ternat@mail.ru

Studies focused on maintaining high productivity and stability of artificial ecosystems that reproduce the processes of natural cenoses are relevant and interesting. It seems to be effective to include decomposers, detritivores and vegetative waste in model systems aimed at obtaining products. The use of earthworms as detritivores is promising because they utilize the organic matter as well as enrich the substrates with microflora including those with antagonistic and growth-stimulating activities. The aim of this study was to assess the prospects of preliminary bioconversion of wheat straw by basidiomycetes (*Lentinus tigrinus* and *Pleurotus ostreatus*) to increase the productivity of lettuce plants. The work was carried out in laboratory conditions with model systems consisting of a substrate (peat, cattle manure and wheat straw with and without bioconversion), earthworms (*Eisenia fetida*) and lettuce (*Lactuca sativa* var. *crispa* cultivar Credo). The leaf area, the weight of each plant (wet and dry), the productivity of lettuce plants, and the content of the main biogenic elements in the plant tissue and substrate were evaluated. The number and weight of adult worms at the beginning and at the end of the experiment, and the number of juvenile worms at the end of the experiment, the number of cocoons, as well as coprolite weight and yield were considered. A significant phytotoxic effect when straw was added into the substrate was found. The addition of straw processed by basidiomycetes (10%) in the substrate had a favorable effect on the earthworm population. Growing lettuce on substrates with bioconverted straw and with the earthworm introduction increases the content of major macronutrients (nitrogen, phosphorus, potassium) in plants. The introduction of earthworms contributed to a significant decrease in the phytotoxicity of substrates. Thus, it is possible to recommend the inclusion of fungiculture wastes (such as substrates after fruiting bodies obtaining) in green crop production systems together with the introduction of earthworms into substrates.

Keywords: *Eisenia fetida*, *Lactuca sativa*, *Lentinus tigrinus*, *Pleurotus ostreatus*, vegetative waste recycling.

Одним из основных источников загрязнения окружающей среды (ОС) является сельское хозяйство, включающее в себя как применение ксенобиотиков (пестицидов и агрохимикатов), так и отходы сельскохозяйственных предприятий (животноводства, растениеводства), которые, при отсутствии переработки или формальном отношении к ней, также оказывают негативное влияние на ОС. При этом в Российской Федерации, как и в других развитых странах, одним из ключевых направлений развития научно-технического комплекса является обеспечение продовольственной безопасности. Данное направление реализуется как путём интенсификации традиционного растениеводства, так и путём создания комплексов производства продукции в условиях природоподобных систем. Исследования, которые определяли бы одновременно высокую продуктивность и стабильность природных экосистем, служат основой для попыток воспроизводства этих процессов в искусственных ценозах и относятся к числу наиболее приоритетных для многих стран.

Деятельность человека сопровождается накоплением различных видов отходов, которые, в большинстве своём, в экосистеме утилизируются гетеротрофным звеном (детритофагами и редуцентами), обеспечивающим не только цикличность процессов включения органики в круговорот веществ, но и стабильность функционирования биосферы, а значит, и биосфероподобных систем [4, 2]. Одними

из таких представителей являются дождевые черви. В природной экосистеме педоценоз представляет собой сложный биологический реактор, который полностью перерабатывает отмершую биомассу в минеральные элементы, необходимые фитоценозу для синтеза новой биомассы [3].

Среди органических остатков искусственных экосистем наибольший объём имеют продуценты (растения), в состав клеточных оболочек которых в наибольшей доле от общего содержания органического вещества входит целлюлоза и лигнин – наиболее труднорастворимые компоненты растительных остатков [4]. Следовательно, от целлюлозолитической активности редуцентов зависят объёмы и скорость включения значительной доли органических компонентов в новый биотический оборот [5]. Разложение данных соединений сопряжено не только с длительным сроком их утилизации редуцирующей микробиотой, но и выделением на протяжении биодеградации фитотоксичных компонентов [6, 7], затрудняющих включение растительных отходов в большом количестве в природоподобные системы. С этой точки зрения особый интерес вызывают высшие базидиальные грибы, являющиеся существенной частью наземных экосистем и важным звеном круговорота углерода в природе. Уникальной особенностью базидиомицетов является способность к синтезу сложного мультиферментного комплекса, обладающего широкой субстратной

специфичностью, что позволяет им разлагать не только органические вещества природного происхождения, но и различные ксенобиотики [4, 8].

В связи со сказанным, искусственные природоподобные системы могут являться не только элементом систем биоконверсии органических отходов, что имеет решающее значение в условиях вечной мерзлоты с замедленным протеканием биогеохимических циклов, но и являться способом получения растительной продукции, такой как зелёные культуры.

Цель работы – оценить влияние предварительной биоконверсии пшеничной соломы базидиомицетами и червями на растения салата и популяцию червей в модельной системе.

Объекты и методы исследования

Основа субстрата в экспериментах – сфагновый торф с рН $7,1 \pm 0,3$ и влажностью $80,0 \pm 1,0\%$, со степенью разложения – 10–15%. Торф получен с Усть-Бакчарского торфоместорождения (Томская обл., Чаинский район).

В исследовании использовали культуры высших базидиальных грибов штамм *Lentinus tigrinus* М-21 ВКПМ F-241 и *Pleurotus ostreatus* 813 ВКПМ F-276 (получены из Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов – ВКПМ), которые в предварительно проведённых лабораторных экспериментах показали эффективность биоконверсии пшеничной соломы. Исследование разложения лигноцеллюлозных материалов базидиомицетами показало возможность их использования в технологиях переработки и утилизации труднодеградируемых отходов за счёт синтеза множества внеклеточных ферментов, принимающих участие в процессе модификации и разрушения лигнина. Солома – ценное органическое удобрение, однако имеет длительный период разложения, поэтому для лучшей утилизации предложено проводить её инокулирование, в том числе базидиальными грибами, обладающими высокой целлюлозолитической активностью [8].

Пшеничную солому собирали после уборки урожая, высушивали в естественных условиях, измельчали (2 см), промывали и проваривали в водопроводной воде (при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 ч), смешивали с карбонатом кальция (7 г/кг соломы), раскладывали (20 г) по стеклянным чашкам Петри и стерилизовали (при $127\text{--}128\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 60 мин) дважды в автоклаве (Sanyo MLS-3020U, Panasonic). Агаровый блок (10 × 10 мм) с мицелием гриба (одного

из двух видов) помещали на подготовленный субстрат в чашку Петри. Срок биоконверсии соломы – 2 месяца при температуре $26\text{--}27\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ТСО-1/80 СПУ).

Звено детритофагов было представлено эпигейными червями *Eisenia fetida*. По плодovitости они существенно превосходят другие виды дождевых червей, а также хорошо поддаются выращиванию в искусственных условиях. Полноценную среду обитания для них легко можно смоделировать в лабораторных условиях [9]. В начале эксперимента проводили отбор червей из маточной лабораторной культуры и их взвешивание.

Растительное звено было представлено листовым салатом (*Lactuca sativa* var. *crispa* сорт Кредо).

Субстраты готовили из торфа (80%), свежего бесподстильного навоза крупного рогатого скота (КРС) (10%) и распаренной стерильной пшеничной соломы (10%), прошедшей предварительную биоконверсию базидиомицетами, или без неё. Контроль – субстраты без добавления пшеничной соломы (торф/навоз в соотношении 9/1). Замешанные субстраты (800 г) помещали в непрозрачные полиэтиленовые контейнеры (2 л), в течение недели субстраты перемешивали, увлажняли при необходимости (по массе), выдерживали в темноте при комнатной температуре в целях улучшения процессов аэробной ферментации [10].

Спустя семь дней проводили перемешивание субстратов и в варианты с «вермикультивированием» интродуцировали дождевых червей (10 половозрелых особей/контейнер). Спустя семь дней после запуска червей (время акклиматизации червей) в субстраты высаживали пророщенные (4-дневные) семена салата (4 шт./контейнер).

Эксперименты проводили в климатической камере при интенсивности освещения – 8 кЛк (110 мкмоль квантов/(м² сек) ФАР), источник света – люминесцентные лампы (белый тёплый свет), с 12-часовым фото-периодом при $20\text{--}22/15\text{--}17\text{ }^{\circ}\text{C}$. На протяжении эксперимента поддерживали влажность субстрата 80–85% путём периодического увлажнения (по массе).

По окончании экспериментов у каждого растения измеряли высоту растений, количество листьев и рассчитывали площадь всех листьев (с помощью программы с открытым исходным кодом, распространяемой без лицензионных ограничений, ImageJ <https://imagej.nih.gov/ij/>), учитывали массу каждого

растения (сырую и сухую), рассчитывали продуктивность растений. После изъятия растений из субстрата, подсушивания в комнатных условиях и просева субстрата, проводили учёт количества и массы взрослых и ювенильных червей, количества коконов; рассчитывали массу и выход копролита в процентах к общей массе субстрата.

Агрохимический анализ субстрата включал определение обменного аммония (ГОСТ 27894.3-88) и нитратов (ГОСТ 27894.4-88), подвижных соединений фосфора (ГОСТ 27894.5-88) и калия (ГОСТ 27894.6-88), рН солевой вытяжки (ГОСТ 11623-89). Проводили анализ общего азота в растениях (ГОСТ 13496.4-2019), общего фосфора (ГОСТ 26657-97) и общего калия (ГОСТ 30504-97). Агрохимические анализы выполнены сотрудниками ЛАЦ (СибНИИСХИТ-филиал СФНЦА РАН, г. Томск).

Все эксперименты проводили в трёх независимых биологических повторностях. Данные, полученные в ходе экспериментов, представлены в виде средней арифметической величины с доверительным интервалом ($M \pm 95\% ДИ$) с учётом t -критерия Стьюдента для 95% уровня значимости для равномерно распределённых выборок и медианы ($M\tilde{e}$) для неравномерно распределённых или малочисленных выборок. Оценку статистической значимости различий полученных результатов проводили с учётом параметрического t -критерия Стьюдента ($p < 0,05$) для равномерных и непараметрического критерия Манна-Уитни ($p < 0,05$) для неравномерных выборок.

Результаты и обсуждение

В ходе модельного лабораторного эксперимента установлено, что наилучшие условия при культивировании растений салата обеспечивает торфонавозный субстрат (контроль): в системе без червей и с червями растения на торфонавозном субстрате были выше, имели большее количество листьев, большую сырую и сухую массу, продуктивность растений на данном субстрате выше по сравнению со всеми субстратами в эксперименте (табл. 1). В системах без интродукции червей отмечено увеличение продуктивности на торфонавозном субстрате в 1,5 раза по сравнению с субстратом, содержащим распаренную солому, а также в 6,9 раза и в 9,8 раза выше по сравнению с субстратами, содержащими биоконвертированную солому вёшенкой и пиллолистником, соответственно.

Известно, что продукты разложения соломы обладают значительной фитотоксичностью [6, 9], поэтому введение соломы в субстрат, особенно биоконвертированной, даже в количестве 10%, отрицательно сказалось на состоянии растений и их продуктивности. Возможно, подобное проявление негативных свойств связано как с более быстрым высвобождением фитотоксичных продуктов разложения соломы: в первую очередь, органических кислот, а также продуктов брожения, аммиака, солей, чья концентрация в процессе биодеградации сначала увеличивается, затем снижается [11], так и наличием, и накоплением в субстрате продуктов переработки и разложения мицелия гриба [12].

Введение в систему червей положительно влияло на рост и развитие растений, культивируемых на субстратах с внесением соломы: наличие червей в этих субстратах способствовало увеличению всех показателей почти в 2 раза, по сравнению с аналогичными показателями в системе без червей для субстратов, содержащих переработанную грибами солому. В то же время, введение червей в контрольный субстрат снижало продуктивность растений по сравнению с тем же субстратом без червей.

Интродукция червей в систему с ограниченным количеством питательных компонентов субстрата могла создать ситуацию, в которой черви вступали в конкурентные взаимоотношения с растениями, как поглощая и фиксируя минеральные компоненты в собственной биомассе, так и увеличивая численность и активность сопутствующей микробиоты, которая, наряду с вовлечённостью в процессы биотрансформации органических соединений, могла также конкурировать за их содержание с другими компонентами модельной системы, и способствовать увеличению количества промежуточных токсичных соединений деструкции соломы [13].

Известно, что дождевые черви оказывают комплексное положительное влияние на рост и развитие растений. В работе [14] описано влияние дождевых червей на урожайность, надземную и подземную биомассу различных растений: в среднем присутствие дождевых червей в агроэкосистемах приводит к увеличению урожайности на 25% и увеличению надземной биомассы на 23%. При этом эффект был вызван как прямым наличием дождевых червей в субстратах, на которых выращивали растения [15, 16], так и наличием в субстрате только производимого ими вермикомпоста [17, 18]. Известно стимулирующее влияние

Таблица 1 / Table 1

Параметры развития растений салата в лабораторном эксперименте при росте на торфонавозном субстрате (ТН) с внесением непереработанной и биоconverted соломы высшими базидиальными грибами и интродукцией червей *Eisenia fetida* (*Mē*) / Vegetative growth parameters of lettuce plants in a laboratory experiment when growing on a peat and manure substrate (PM) with unprocessed straw bioconverted by basidiomycetes and introducing *Eisenia fetida* earthworms (*Mē*)

Субстрат Substrate	Высота, см Height, cm	Количество листьев, шт. Number of leaves, psc.	Площадь лиственной поверхности, см ² Leaf surface area, cm ²	Масса сырая, г Fresh weight, g	Масса сухая, г Dry weight, g	Продуктивность, кг/м ² Productivity, kg/m ²
Без интродукции червей в субстраты / Without earthworms in substrates						
ТН / PM	25,075	18,0	513,45	13,15	0,56	3,25
ТН и солома (10%) PM and straw	21,012	15,5	358,84*	7,54	0,33	2,21*
ТН и вёшенка на соломе (10%) PM and <i>Pleurotus ostreatus</i> on straw	12,637*	10,0*	86,83*	1,908*	0,084*	0,47*
ТН и пилолистник на соломе (10%) PM and <i>Lentinus tigrinus</i> on straw	8,275*	10,5*	63,99*	1,34*	0,084*	0,33*
С интродукцией червей в субстраты / With introduction of earthworms in substrates						
ТН / PM	24,975	16,9	375,94	8,89 [^]	0,38 [^]	2,19 [^]
ТН и солома (10%) PM and straw	23,19	15,1	334,98	7,54	0,33	1,86
ТН и вёшенка на соломе (10%) PM and <i>Pleurotus ostreatus</i> on straw	19,24* [^]	12,3* [^]	163,09* [^]	3,40*	0,15* [^]	0,84* [^]
ТН и пило- листник на соломе (10%) PM and <i>Lentinus tigrinus</i> on straw	13,275* [^]	11,0*	106,00* [^]	2,16*	0,10*	0,53*

Примечание (здесь и далее в таблицах 2, 3, 4): * – статистическая значимость различий от торфонавозного субстрата (контроля) при $p < 0,05$; [^] – статистическая значимость различий от соответствующего субстрата без червей при $p < 0,05$.

Note (here and further in tables 2, 3, 4): * – differences with control (peat and manure substrate) are significant at $p < 0.05$; [^] – differences with the substrate without earthworms at $p < 0.05$.

продуктов жизнедеятельности дождевых червей и на пигментный состав растений. В работе [19] показано, что наличие в субстратах копролитов и экскретов дождевых червей *Aporrectodea caliginosa*, *E. fetida*, *Lumbricus rubellus* увеличивает содержание пигментов в листьях огурцов и кукурузы. В работе [20]

отмечено положительное влияние червей *E. fetida* на биомассу горчицы *Brassica juncea* и содержание хлорофиллов и каротиноидов. В работе [17] показано, что присутствие червей *E. fetida* в субстрате способствовало значимому увеличению высоты и биомассы растений фасоли и содержанию хлорофилла *a*

и *b*. Таким образом, увеличение высоты, массы, площади листовой поверхности растений приводит к увеличению и фотосинтетической активности, следовательно, и к увеличению качества и количества продукции.

Присутствие червей в модельных системах с соломой, прошедшей биоконверсию макромицетами, оказало положительный эффект на растения. По-видимому, это связано с ускорением поглощения или разложения фитотоксичных компонентов биодegradации соломы и мицелия гриба.

Негативное влияние продуктов распада пшеничной соломы (соли уксусной, пропионовой и масляной кислот, накопление жирных кислот) известно достаточно давно и широко описано в литературе [6, 7, 11]. Уменьшение токсичности соломы для растений салата по нашему мнению связано как с непосредственным ускорением биодegradации соломы под действием пищевых ферментов червей, так и с возможным изменением видового состава микробиоты субстрата, способствующей более быстрой утилизации накапливающихся неорганических и органических кислот.

Внесение в торфоनावозный субстрат соломы оказало положительное влияние на червей (табл. 2): увеличилась плодовитость половозрелых особей, возросла численность коконов и ювенильных червей.

Внесение переработанной вёшенкой соломы способствовало наименьшей прибавке массы взрослых червей, при этом выход копролита был статистически значимо выше, чем во всех остальных субстратах. Внесение в субстрат распаренной соломы без предварительной биоконверсии способствовало интенсивной прибавке массы взрослых червей, значимому увеличению всех продукционных характеристик популяций червей, но выход копролита был ниже, чем в других субстратах (от 1,4 до 1,8 раза).

Исследования влияния различных отходов сельского хозяйства на популяции червей представлены в ряде работ [5, 21, 22]. В подавляющем числе работ приведена информация о выживаемости и изменении репродуктивной активности червей в экотоксикологических исследованиях. При этом данные о совместном культивировании растений с червями в условиях искусственных агроэкосистем опубликованы в небольшом количестве работ с достаточно противоречивыми результатами: в одних сообщается о повреждении корневой системы растений червями, а в других показаны положительные результаты взаимодействия червей и растений в условиях модельных систем [14, 16].

Использование отходов грибоводства в процессах вермикультивирования и вермикомпостирования *Eisenia fetida* показало

Таблица 2 / Table 2

Основные продукционные характеристики популяции дождевых червей *Eisenia fetida* в лабораторном эксперименте с растениями салата на торфоनावозном субстрате (ТН) с внесением непереработанной и биоконвертированной соломы высшими базидиальными грибами и интродукцией червей (*Mē*)
The main characteristics of *Eisenia fetida* population in a laboratory experiment with lettuce plants on a peat and manure substrate (PM) with unprocessed straw bioconverted by basidiomycetes and introducing earthworms (*Mē*)

Субстрат Substrate	Прибавка массы взрослых, г Weight gain in adults, g	Численность ювенильных особей червей, шт. Number of juvenile worms, psc.	Численность коконов, шт. Number of cocoons, psc.	Плодовитость взрослых особей, шт./взрослого червя Fecundity of adults, psc./adult worm	Выход копролита, % Worm casts, %
ТН / PM	0,031	33,0	35,5	6,85	14,5
ТН и солома (10%) PM and straw	0,040	57,5*	52,0*	11,0*	10,7
ТН и вёшенка на соломе (10%) PM and <i>Pleurotus ostreatus</i> on straw	0,019*	47,5*	45,0*	9,25*	19,4*
ТН и пилолистник на соломе (10%) PM and <i>Lentinus tigrinus</i> on straw	0,042*	66,0*	44,5	11,1*	14,0

Таблица 3 / Table 3

Содержание подвижных форм основных элементов питания в торфонавозном субстрате (ТН) в лабораторном эксперименте с внесением непереработанной и биоконвертированной соломы высшими базидиальными грибами до и после культивирования салата и интродукции червей *Eisenia fetida* ($M \pm 95\%$ ДИ) / The content of mobile forms of the nutrients in the peat and manure substrate (PM) in a laboratory experiment with unprocessed straw bioconverted by basidiomycetes before and after lettuce cultivation and introducing *Eisenia fetida* earthworms ($M \pm 95\%$ CI)

Субстрат Substrate	pH _{KCl}	Содержание подвижных форм элементов, мг/ 100 г а.с.в. субстрата The content of mobile forms of elements, mg per 100 g of substrate absolutely dry matter			
		N-NH ₄	N-NO ₃	P ₂ O	K ₂ O
Исходные показатели субстратов / Initial substrate parameters					
ТН / РМ	6,9±0,1	278±29	71±7	450±70	152±31
ТН и солома (10%) PM and straw	7,1±0,1	151±16	77±8	370±60	153±32
ТН и вёшенка на соломе (10%) PM and <i>Pleurotus ostreatus</i> on straw	7,1±0,1	220±23	61±6	350±50	167±35
ТН и пилолистник на соломе (10%) PM and <i>Lentinus tigrinus</i> l on straw	7,1±0,1	199±21	80±8	300±40	133±28
Показатели субстратов после культивирования салата без добавления в систему червей Substrate parameters after lettuce cultivation without earthworms					
ТН / РМ	7,2±0,1	56±10	222±28	475±90	59±16
ТН и солома (10%) PM and straw	7,1±0,1	63±9	124±19*	360±70*	101±21*
ТН и вёшенка на соломе (10%) PM and <i>Pleurotus ostreatus</i> on straw	7,1±0,1	68±10	184±33	480±80	200±40*
ТН и пилолистник на соломе (10%) PM and <i>Lentinus tigrinus</i> on straw	7,2±0,1	48±11	240±40	450±60	240±50*
Показатели субстратов после культивирования салата с введением в систему червей Substrate parameters after lettuce cultivation with introduction of earthworms					
ТН / РМ	7,1±0,1	64±12	267±27 [^]	400±50	99±16 [^]
ТН и солома (10%) PM and straw	7,3±0,1	91±17* [^]	153±14* [^]	430±60	121±22
ТН и вёшенка на соломе (10%) PM and <i>Pleurotus ostreatus</i> on straw	7,2±0,1	53±10 [^]	239±23 [^]	440±50	178±29*
ТН и пилолистник на соломе (10%) PM and <i>Lentinus tigrinus</i> on straw	7,2±0,1	65±11 [^]	236±25	410±50	200±40*

их высокую эффективность [22]. В субстрате из мульчи от шампиньонов наблюдалась устойчивая динамика количественного роста червей. В субстрате из отходов от производства вешенок количество червей снижалось, и авторы предположили, что такой вид субстрата

должен разбавляться перегнившим навозом КРС или торфом.

Анализ подготовленных нами для экспериментов субстратов показал, что добавление соломы практически не изменяет содержание в субстратах нитрат-иона и калия, снижает со-

держание фосфора (почти в 1,5 раза) и ионов аммония (в 1,8 раз) (табл. 3). При биоконверсии соломы вёшенкой и пилолистником количество аммония увеличивается, однако остаётся ниже показателей торфонавозного субстрата (в 1,3–1,4 раза).

Анализируя субстраты после культивирования растений, обнаружено значительное снижение во всех субстратах аммиачного азота, что является естественным, поскольку данная форма азота как легко улетучивается из субстрата, так и переходит в органическое вещество первичных продуцентов [13]. Отмечено также увеличение нитратного азота в субстратах (почти в три раза), что может являться следствием процессов трансформации органического вещества, содержащегося в субстрате навоза [23]. Обнаружено незначительное увеличение фосфора в торфонавозной смеси и с добавлением в субстрат распаренной соломы, и значительное (в 1,3–1,4 раза) его увеличение в субстратах с внесением биоконвертированной грибами соломы по сравнению с исходным субстратом. Содержание калия в торфонавозном субстрате упало в 2,6 раза, в субстрате с введением распаренной соломы – в 1,5 раза, в субстрате с вёшенкой оно незначительно повысилось по сравнению с исходными показателями, а в субстрате с пилолистником увеличилось почти в 2,1 раза.

Интродукция червей в модельные экосистемы показала схожее содержание подвижных форм основных элементов в субстрате, что и в системах без червей. Содержание аммиачного азота уменьшилось, нитратного – увеличилось ещё более значимо. Содержание фосфора в торфонавозном субстрате снизилось по сравнению с содержанием в исходном субстрате, а в субстратах с внесением соломы – увеличилось. Содержание калия в субстрате с переработкой соломы пилолистником статистически значимо ($p < 0,05$) увеличилось по сравнению с содержанием в исходном субстрате, и было в 2 раза выше, чем в торфонавозном субстрате.

В исследовании [22] также показано, что вермикюльтивирование *E. fetida* на отходах грибоводства увеличило массовую долю азота практически в 2 раза, массовая доля золы в субстрате от производства вёшенки увеличилась в 3 раза, а в субстрате от производства шампиньонов – в 6,6 раза.

Анализ содержания в биомассе растений основных биогенных элементов показал, что у растений, выращенных на субстратах с соломой, отмечается более высокое содержание общего азота в листовой пластине (табл. 4). Наибольшее содержание азота отмечено для растений в вариантах с соломой, прошедшей биоконверсию вёшенкой (в 1,3 раза выше содержания данного элемента в растениях в вариантах без внесения соломы). В данном

Таблица 4 / Table 4

Содержание в биомассе растений салата основных элементов питания в лабораторном эксперименте на торфонавозном субстрате (ТН) с внесением непереработанной и биоконвертированной соломы высшими базидиальными грибами и интродукцией червей *Eisenia fetida* ($M \pm 95\%$ ДИ)
 The content of the main nutrients in the lettuce biomass in a laboratory experiment on a peat and manure substrate (PM) with unprocessed straw bioconverted by basidiomycetes and introducing *Eisenia fetida* earthworms ($M \pm 95\%$ CI)

Субстрат Substrate	Содержание элементов, % / Content of elements, %		
	Общий азот Total nitrogen	Общий фосфор Total phosphorus	Общий калий Total potassium
Без интродукции червей в субстрат / Without earthworms in substrates			
ТН / PM	0,57±0,05	1,25±0,14	7,78±0,48
ТН и солома (10%) / PM and straw	0,66±0,06*	1,16±0,15	8,00±0,32
ТН и вёшенка на соломе (10%) PM and <i>Pleurotus ostreatus</i> on straw	0,74±0,03*	1,40±0,06*	8,14±0,19
ТН и пилолистник на соломе (10%) PM and <i>Lentinus tigrinus</i> on straw	0,62±0,03	1,19±0,07	7,71±0,21
С интродукцией червей в субстрат / With introduction of earthworms in substrates			
ТН / PM	0,63±0,06	1,26±0,16	8,45±0,33^
ТН и солома (10%) / PM and straw	0,68±0,03	1,19±0,13	8,27±0,25
ТН и вёшенка на соломе (10%) PM and <i>Pleurotus ostreatus</i> on straw	0,74±0,03*	1,04±0,08*^	8,50±0,20^
ТН и пилолистник на соломе (10%) PM and <i>Lentinus tigrinus</i> on straw	0,78±0,03*^	1,41±0,08^	8,60±0,23^

варианте выращивания также отмечено увеличение содержания в растениях фосфора. Имелась тенденция к увеличению содержания калия в растениях при их культивировании на субстратах, содержащих солому.

Интродукция червей оказала влияние на процессы накопления основных биогенных элементов в растениях. Содержание общего азота увеличилось по сравнению с системами без червей, содержание фосфора в торфяно-возном субстрате и с внесением соломы осталось на таком же уровне, а вот выращенных на субстрате с вёшенкой было статистически значимо ($p < 0,05$) ниже по сравнению с тем же субстратом, но без червей, и статистически значимо ниже, чем в аналогичной системе в торфяно-возном субстрате. Содержание фосфора у растений на субстрате с соломой, прошедшей биоконверсию пилолистником, статистически значимо увеличилось в присутствии червей. В растениях в системах с интродукцией дождевых червей также отмечено большее содержание ионов калия.

Заключение

Таким образом, в ходе модельных экспериментов отмечено наличие фитотоксичного эффекта продуктов разложения пшеничной соломы на растения салата. Предварительная переработка соломы в вариантах без дождевых червей не оказала положительного эффекта на продуктивность растений, но при этом оказала благоприятное действие на популяционные характеристики червей. Несмотря на неэффективность самого приёма предварительной биоконверсии пшеничной соломы мицелием базидиомицетов для повышения продуктивности растений в модельной системе, можно рекомендовать включение отходов грибоводства, например, субстратов после получения плодовых тел вёшенки [24], в системы продукции зелёных культур в случае присутствия в них дождевых червей, значительно снижающих фитотоксичность таких субстратов. Выращивание растений салата на субстратах, содержащих солому, прошедшую биоконверсию пилолистником тигровым и вёшенкой устричной, в модельных системах с дождевыми червями благоприятно сказывается на минеральном составе растений: увеличивается содержание основных биогенных элементов в растительной ткани.

Исследование выполнено в рамках госада-ния FNUU-2021-0005.

References

1. Nelson M., Pechurkin N.S., Allen J.P., Somova L.A., Gitelson J.I. Closed ecological systems, space life support and biospherics // *Environmental Biotechnology. Handbook of Environmental Engineering*. V. 10 / Eds. L.K. Wang, V. Ivanov, J.-H. Tay. New York: Humana Press, 2009. P. 517–565. doi: 10.1007/978-1-60327-140-0_11
2. Somova L.A., Pisman T.I., Pechurkin N.S. Simple artificial ecosystems for environmental objectives // *Vestnik Rossijskoj akademii nauk*. 2018. V. 88. No. 1. P. 72–78 (in Russian). doi: 10.7868/S0869587318010097
3. Braga L.P., Yoshiura C.A., Borges C.D., Horn M.A., Brown G.G., Drake H.L., Tsai S.M. Disentangling the influence of earthworms in sugarcane rhizosphere // *Sci. Rep.* 2016. No. 6. Article No. 38923. doi: 10.1038/srep38923
4. Shirokikh A.A., Zlobina Yu.A., Shirokikh I.G. Biodegradation of vegetable waste and obtaining fruit bodies in cultivation of *Hericium erinaceus* // *Theoretical and Applied Ecology*. 2018. No. 3. P. 86–92 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-3-086-092
5. Tereshchenko N.N. Ecological and microbiological aspects of vermicultivation. Novosibirsk: Publishing House of SB RAAS, 2003. 113 p. (in Russian).
6. Harper S.H.T., Lynch J.M. The role of water-soluble components in phytotoxicity from decomposing straw // *Plant and Soil*. 1982. No. 65. P. 11–17. doi: 0032-079X/82/010011-7500.20/0
7. Bi Y.M., Tian G.L., Wang C., Feng C.L., Zhang Y., Zhang L.S., Sun Z.J. Application of leaves to induce earthworms to reduce phenolic compounds released by decomposing plants // *Eur. J. Soil Biol.* 2016. No. 75. P. 31–37. doi: 10.1016/j.ejsobi.2016.04.007
8. Kulikova N.A., Klein O.I., Stepanova E.V., Koroleva O.V. Use of basidiomycetes in industrial waste processing and utilization technologies: fundamental and applied aspects (Review) // *Prikladnaya Biokhimiya i Mikrobiologiya*. 2011. V. 47. No. 6. P. 619–634 (in Russian).
9. Shashurina E.A., Pominchuk Y.A., Redkova L.A. A bioassay in determining the suitability of silt substrate for use as fertilizer // *Vestnik RGATU*. 2019. No. 2 (42). P. 52–57 (in Russian).
10. Lyashchev A.A., Prok I.A. Effect of vermicompost extract on preparation of substrate from horse manure for vermiculture // *Agro-Food Policy in Russia*. 2018. No. 5 (77). P. 36–41 (in Russian).
11. Jagadabhi P.S., Wani S.P., Kaushal M., Patil M., Vemula A.K., Rathore A. Physico-chemical, microbial and phytotoxicity evaluation of composts from sorghum, finger millet and soybean straws // *Int. J. Recycl. Org. Waste in Agricult.* 2019. V. 8. P. 279–293. doi: 10.1007/s40093-018-0240-8
12. Liu Q., Kong W., Cui X., Hu S., Shi Z., Wu J., Zhang Y., Qiu L. Dynamic succession of microbial compost communities and functions during *Pleurotus ostreatus* mushroom cropping on a short composting substrate //

Front. Microbiol. 2022. V. 13. Article No. 946777. doi: 10.3389/fmicb.2022.946777

13. Zheng Y., Wang S., Bonkowski M., Chen X., Griffiths B., Hu F., Liu M. Litter chemistry influences earthworm effects on soil carbon loss and microbial carbon acquisition // Soil Biol. Biochem. 2018. V. 123. P. 105–114. doi: 10.1016/j.soilbio.2018.05.012

14. Van Groenigen J., Lubbers I., Vos H.M.J., Brown G.G., De Deyn G.B., van Groenigen K.J. Earthworms increase plant production: a meta-analysis // Sci. Rep. 2014. No. 4. Article No. 6365. doi: 10.1038/srep06365

15. Blouin M. Chemical communication: An evidence for co-evolution between plants and soil organisms // Appl. Soil Ecol. 2018. V. 123. P. 409–415. doi: 10.1016/j.apsoil.2017.10.028

16. Jana U., Barot S., Blouin M., Lavelle P., Laffray D., Repellin A. Earthworms influence the production of above- and belowground biomass and the expression of genes involved in cell proliferation and stress responses in *Arabidopsis thaliana* // Soil Biol. Biochem. 2010. V. 42. P. 244–252. doi: 10.1016/j.soilbio.2009.10.022

17. Belmeskine H., Ouameur W.A., Dilmi N., Aouabed A. The vermicomposting for agricultural valorization of sludge from Algerian wastewater treatment plant: impact on growth of snap bean *Phaseolus vulgaris* L. // Heliyon. 2020. V. 6. No. 8. Article No. e04679. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04679

18. Djajadi D., Syaputra R., Hidayati S.N., Khairiyah Y. Effect of vermicompost and nitrogen on N, K, Na uptakes and growth of sugarcane in saline soil // AGRIVITA. Jour-

nal of Agricultural Science. 2020. V. 42. No. 1. P. 110–119. doi: 10.17503/agrivita.v41i0.2364

19. Bityutskii N.P., Kaidun P.I. The influence of earthworms on the mobility of microelements in soil and their availability for plants // Pochvovedenie. 2008. V. 41. No. 12. P. 1479–1486 (in Russian).

20. Kaur P., Bali S., Sharma A., Vig A.P., Bhardwaj R. Effect of earthworms on growth, photosynthetic efficiency and metal uptake in *Brassica juncea* L. plants grown in cadmium-polluted soils // Environ. Sci. Pollut. Res. 2017. V. 24. P. 13452–13465. doi: 10.1007/s11356-017-8947-z

21. Biabani A., Carpenter-Boggs L., Gholizadeh A., Vafaie-Tabar M., Omara M.O. Reproduction efficiency of *Eisenia foetida* and substrate changes during vermicomposting of organic materials // Compost Sci. Util. 2018. V. 26. No. 3. P. 209–215. doi: 10.1080/1065657X.2018.1463877

22. Sazonova I.A., Azizov I.R., Yakovleva N.A. Estimation of the efficiency of use of waste from mushroom in the processes of vermiculturation and vermicomposting // Agrarnyy nauchnyy zhurnal. 2022. No. 4. P. 44–47 (in Russian). doi: 10.28983/asj.y2022i4pp44-47

23. Na L., Abail A., Whalen J.K., Liang B., Hu C., Hu R., Wu Y. Earthworms increase nitrogen uptake by lettuce and change short-term soil nitrogen dynamics // Appl. Soil Ecol. 2022. V. 176. Article No. 104488. doi: 10.1016/j.apsoil.2022.104488

24. Ivanov A.I. Environmental aspects of the development of mushroom production in Russia // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 3. P. 6–12 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-006-012