

ЭКОЛОГИЯ, ПОЧВОВЕДЕНИЕ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

ECOLOGY, SOIL SCIENCE AND NATURE MANAGEMENT

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-4-1180

EDN: EULRXB

УДК 631.8



Научная статья

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОЧАРА ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА КОМПСТИРОВАНИЯ КУРИНОГО ПОМЕТА

*Н.В. Данилова, Л.Р. Бикташева, П.А. Курынцева,
П.Ю. Галицкая, С.Ю. Селивановская*

Аннотация

Обоснование. Всестороннее изучение факторов, влияющих на оптимизацию процесса компостирования, является крайне важным. Результаты этого исследования будут способствовать более эффективному и устойчивому управлению отходами куриного помета. Оптимизируя процесс компостирования с помощью добавки в виде биочара, можно снизить экологические и санитарные риски, связанные с переработанным навозом. Полученный компост будет представлять собой ценное органическое удобрение. В целом, это исследование может способствовать развитию методов управления органическими отходами животноводства.

Цель. Оценка влияния разных доз биочара на основе куриного помета на физико-химические (температура, влажность, содержание биогенных элементов С, N, P, K) и микробиологические (респираторная активность, метаболическая активность микроорганизмов) параметры компостирования куриного помета, а также на фитотоксичность готового компоста в отношении тест-объекта растений овса *Avena sativa* L.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования использовался подстилочный куриный помет с содержанием опилок менее 25%. Для приго-

товления компостных смесей в исходный куриный помет вносили биочар в дозе 0, 1, 5, 10, 15% (w:w), а также опилки в количестве 33% (w:w). Компостирование осуществляли в течение 150 суток при температуре 20°C. Содержание общего углерода и общего азота оценивали с использованием элементного анализатора по методу Дюма-Прегля. Размер и характер пор биочара определяли методом сканирующей электронной микроскопии. Удельную площадь поверхности биочара оценивали в соответствии с методикой определения удельной площади из изотерм в модели Брунауэра – Эммета – Теллера (БЭТ) и методом лазерной дифракции согласно ГОСТ Р 8.777-2011. Влажность определяли воздушно-тепловым методом в соответствии с ГОСТ 28268-89. Оценку респираторной активности проводили согласно ISO 14240-1. Общую метаболическую активность микробных сообществ компостных смесей определяли с помощью показателя AWCD (средняя окрашенность ячеек) и коммерческих плашек Biolog Ecoplates (Biolog Inc., США). Фитотоксичность компостных смесей оценивали с помощью индекса прорастания (GI) растений овса (*Avena sativa*) в соответствии с ISO 11269.1:2012.

Результаты. Показано, что внесение биочара не оказало значимого влияния на температурный режим компостирования – все исследуемые компостные смеси характеризовались традиционной динамикой температуры. Для поддержания рекомендованного уровня влажности наиболее оптимальными дозами являлись дозы биочара 10 и 15%. Обнаружено положительное влияние на содержание биогенных элементов С, N, Р и К в конечных компостных смесях при использовании 10 и 15% биочара. Отмечено отсутствие влияния биочара на микробиологические параметры компостирования (респираторная активность, метаболическая активность) при сохранении положительной динамики процесса компостирования. Оценка влияния биочара на фитотоксичность компостов показала, что при использовании наибольшей дозы биочара (15%) было обнаружено максимальное значение индекса прорастания GI (118%) для растений овса (*Avena sativa* L.).

Заключение. Таким образом, это исследование подчеркивает потенциал использования биочара, полученного из куриного помета, для улучшения процесса компостирования и повышения качества конечного продукта. Полученные результаты показывают, что включение биочара в процесс компостирования куриного помета не только способствует лучшему сохранению питательных веществ, но и способствует более здоровому росту растений, тем самым предлагая устойчивое решение для управления отходами птицеводства.

Ключевые слова: биочар; куриный помет; компостирование; респираторная активность; микробное сообщество; фитотоксичность

Для цитирования. Данилова, Н. В., Бикташева, Л. Р., Курынцева, П. А., Галицкая, П. Ю., & Селивановская, С. Ю. (2025). Использование биочара для интенсификации процесса компостирования куриного помета. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(4), 64-93. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1180>

Original article

USE OF BIOCHAR TO INTENSIFY THE COMPOSTING PROCESS OF CHICKEN MANURE

*N.V. Danilova, L.R. Biktasheva, P.A. Kuryntseva,
P.Yu. Galitskaya, S.Yu. Selivanovskaya*

Abstract

Background. A comprehensive study of the factors affecting the optimization of the composting process is essential. The results of this study will contribute to a more efficient and sustainable management of chicken manure waste. By optimizing the composting process with a biochar additive, the environmental and sanitary risks associated with unprocessed manure can be reduced. The resulting compost will be a valuable organic fertilizer. Overall, this study can contribute to the development of organic animal waste management practices.

Purpose. Evaluation of the effect of different doses of biochar based on chicken manure on physicochemical (temperature, humidity, content of biogenic elements C, N, P, K) and microbiological (respiration activity, metabolic activity of microorganisms) parameters of chicken manure composting, as well as on the phytotoxicity of the finished compost with respect to the test subject of oat plants (*Avena sativa* L.).

Materials and methods. The object of the study was litter chicken manure with a sawdust content of less than 25%. To prepare compost mixtures, biochar was added to the original chicken manure at a dose of 0, 1, 5, 10, 15% (w:w), as well as sawdust in an amount of 33% (w:w). Composting was carried out for 150 days at a temperature of 20 °C. The content of total carbon and total nitrogen was estimated using an elemental analyzer according to the Dumas-Pregl method. The size and nature of biochar pores were determined by scanning electron microscopy. The specific surface area of biochar was estimated in accordance with the method for determining the specific surface area from isotherms in the Brunauer-Emmett-Teller (BET) model and the laser diffraction method according

to GOST R 8.777-2011. Humidity was determined by the air-thermal method in accordance with GOST 28268-89. Respiration activity was assessed according to ISO 14240-1. The total metabolic activity of microbial communities of compost mixtures was determined using the AWCD (average cell color density) index and Biolog Ecoplates (Biolog Inc., USA). The phytotoxicity of the compost mixtures was assessed using the germination index (GI) of oat (*Avena sativa* L.) plants in accordance with ISO 11269.1:2012.

Results. It was shown that biochar application had no significant effect on the composting temperature regime - all compost mixtures studied were characterized by traditional temperature dynamics. To maintain the recommended moisture level, the most optimal doses were biochar doses of 10 and 15%. A positive effect on the content of nutrients C, N, P and K in the final compost mixtures was found when using 10 and 15% biochar. No influence of biochar on microbiological parameters of composting (respiration activity, metabolic activity) was observed, while maintaining positive dynamics of the composting process. Evaluation of biochar influence on phytotoxicity of composts showed that when using the highest dose of biochar (15%) the maximum value of germination index GI (118%) was found for oat plants (*Avena sativa* L.).

Conclusion. Thus, this study highlights the potential of using biochar derived from chicken manure to improve the composting process and enhance the quality of the final product. The results show that the incorporation of biochar into the composting process of chicken manure not only contributes to better nutrient retention, but also promotes healthier plant growth, thus offering a sustainable solution for poultry waste management.

Keywords: biochar; chicken manure; composting; respiration activity; microbial community; phytotoxicity

For citation. Danilova, N. V., Biktasheva, L. R., Kuryntseva, P. A., Galitskaya, P. Yu., & Selivanovskaya, S. Yu. (2025). Use of biochar to intensify the composting process of chicken manure. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(4), 64-93. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-4-1180>

Введение

Использование компостов на основе навозов и пометов сельскохозяйственных животных для улучшения плодородия почв является традиционной практикой по всему миру [10]. Компостирование является сложным биохимическим процессом. Для получения эффективного и безопасного конечного продукта необходимо контролировать многие параметры, которые напрямую влияют на оптимальность процесса компо-

стирования. Так, на оптимальность компостирования влияют как тип и характеристики исходного сырья (соотношение C/N, pH, наличие/отсутствие структурирующего агента), так и такие параметры, как температура окружающей среды, температура компостируемой массы, влажность и т.д. [8; 10].

Использование компостов может привести к попаданию в почвы яиц гельминтов, возбудителей инфекционных болезней, остаточных количеств антибиотиков, а также микроорганизмов, обладающих антибиотикорезистентностью. Снизить данные риски возможно при соблюдении строгой технологии и длительности компостирования с достижением температуры компостной смеси не менее 55°C в термофильную фазу компостирования [17; 31; 37].

В качестве агентов, способствующих компостированию и получению более пригодного конечного продукта, предлагается использовать такие высокопористые субстраты, как биочар. Биочар представляет собой твердый продукт пиролиза отходов биомассы в бескислородных условиях при температуре от 300 до 900 °C [30]. Потенциальными преимуществами использования биочара в качестве добавки при компостировании являются: повышение микробной активности за счет улучшения аэрации, повышение температуры компоста, снижение испарения аммиака, повышение водоудерживающей способности, снижение потерь питательных веществ, сокращение выбросов парниковых газов и запахов и повышение степени гумификации [40].

При использовании биочара для улучшения процесса компостирования необходимо учитывать дозу его внесения. В литературе описаны случаи применения широкого диапазона внесения биочара (3–50%) [23; 24; 27]. В качестве оптимальной наиболее часто предлагается использовать дозу биочара около 10%, однако, известно, что низкие дозы (3–5%) также оказывали заметное положительное влияние на производительность компостирования [18; 28]. Применение биочара в дозе выше 20% не рекомендуется вследствие потенциального негативного воздействия на микробную активность и в результате снижения эффективности процесса компостирования [27].

В литературе, в основном, представлены и хорошо описаны случаи применения в качестве добавки для компостирования биочара, изготовленного на основе древесного и растительного лигноцеллюлозного сырья [33]. Однако, представляется потенциально возможным и экономически выгодным производство биочара на основе органических отходов сель-

ского хозяйства, в частности куриного помета. Куриный помет является крупнотоннажным отходом с непригодными для использования в необработанном виде характеристиками [22]. Так, в работе Галиевой Г.Ш. с соавторами была изучена возможность использования биочара на основе куриного помета в качестве полезной добавки в почву для выращивания различных сельскохозяйственных растений, а также его влияние на почвенное микробное сообщество [1]. Кроме того, исследовано влияние на почву компостов, содержащих биочар, а также приведены оптимальные дозы внесения биочара в почву [25]. Однако, свойства биочара напрямую зависят от физико-химических параметров исходного субстрата и, следовательно, ответная реакция микробного сообщества компостов и почв, обрабатываемых таким биочаром, сложно прогнозируема. Поэтому, необходимым является проведение дополнительных исследований для конкретного субстрата (куриный помет, коровий навоз и т.д.), который планируется использовать для изготовления биочара.

Цель исследования. Целью работы являлась оценка влияния разных доз биочара на основе куриного помета на физико-химические (температура, влажность, содержание биогенных элементов С, N, P, K) и микробиологические (респираторная активность, метаболическая активность микроорганизмов) параметры компостирования куриного помета, а также на фитотоксичность готового компоста в отношении тест-объекта растений овса *Avena sativa* L.

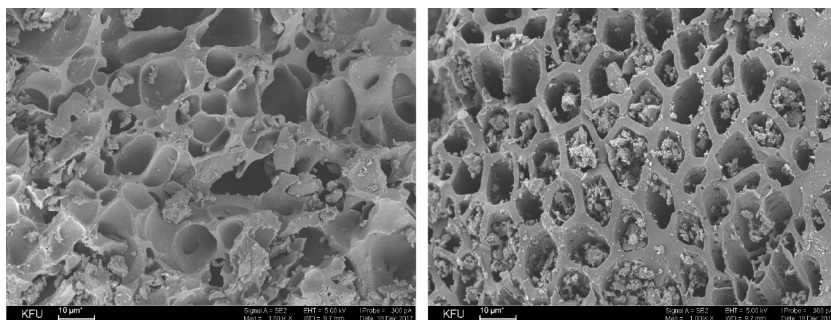
Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования использовался подстилочный куриный помет, полученный с птицефабрики ООО «Челны-Бройлер» (г. Набережные Челны, Татарстан) с содержанием опилок менее 25%. Для приготовления компостных смесей в исходный куриный помет вносили разные дозы биочара (w:w), а также опилки в количестве 33% (w:w). В результате были приготовлены следующие компостные смеси – вариант K0 (контроль, без добавления биочара), вариант B1% (содержание биочара 1%), вариант B5% (содержание биочара 5%), вариант B10% (содержание биочара 10%) и вариант B15% (содержание биочара 15%). Биочар был получен на основе этого же куриного помета с помощью slow-пиролиза при пиковой температуре 400 °С, поддерживаемой в течение 3 часов. Характеристики исходного куриного помета и биочара на его основе представлены в таблице 1. Фотографии поверхности биочара, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии, представлены на рисунке 1.

Таблица 1.

Исходные характеристики куриного помета и биочара на его основе

Характеристика	Куриный помет	Биочар
pH	7,3	7,2
K, мг/кг	9775	25
P, мг/кг	4350	23
C, мг/кг	194	190
N, мг/кг	36	28

**Рис. 1.** Фотографии поверхности биочара, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии

Компостирование осуществляли в течение 150 суток при температуре 20°C в компостерах с вращающимся барабаном объемом 200 л. Все варианты компостирования проводились в 3 повторностях. В течение всего процесса компостирования влажность смесей искусственно поддерживалась на уровне 55-60%. В течение первого месяца перемешивание компостов осуществляли три раза в сутки на протяжении 1 часа со скоростью 40 об/мин, далее проводили дозревание в буртах с перемешиванием дважды в неделю.

Температуру и влажность компостов измеряли ежедневно в течение всего процесса компостирования. Для измерения респираторной и метаболической активности микробных сообществ компостных смесей образцы отбирали на 1, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 70, 84 и 150 сутки. Содержание биогенных элементов (C, N, K и P) измеряли на 1 и 150 сутки компостирования. Фитотоксичность компостных смесей оценивали на 150 сутки компостирования.

Содержание общего углерода и общего азота оценивали с использованием элементного анализатора по методу Дюма-Прегля, основанного на сжигании образца в кислородной среде при температуре до 1100°C [2].

Содержание калия и фосфора измеряли методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой по ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 [5].

Размер и характер пор биочара определяли методом сканирующей электронной микроскопии на автоэмиссионном высокоразрешающем сканирующем электронном микроскопе Merlin (Carl Zeiss) с помощью программного обеспечения ImageJ (www.imagej.net). Удельную площадь поверхности биочара оценивали в соответствии с методикой определения удельной площади поверхности пироугля из изотерм в модели Брунауэра – Эммета – Теллера (БЭТ) [5] и методом лазерной дифракции согласно ГОСТ Р 8.777-2011 [4].

Влажность определяли воздушно-тепловым методом в соответствии с ГОСТ 28268-89 [3].

Оценку респираторной активности проводили согласно ISO 14240-1 [19]. 0,02 г образца помещали в три марлевых мешочка. В лабораторную колбу наливали 20 мл раствора гидроксида натрия (0,05 М), внутрь помещали мешочек с образцом. Колбу закрывали и инкубировали в течение 24 часов при 25 °С. Через 24 часа мешочек осторожно удаляли и добавляли 2 мл раствора хлорида бария (0,05 М) для осаждения адсорбированного CO₂ в виде карбоната бария. Добавляли три-четыре капли раствора индикатора (фенолфталеин) и остаточное содержание гидроксида натрия титровали разбавленной соляной кислотой (0,1 М).

Общую метаболическую активность микробных сообществ компостных смесей определяли с помощью показателя AWCD (средняя окрашенность ячеек) и коммерческих плашек Biolog Ecoplates (Biolog Inc., США). В каждую лунку 96-тилуночной планшеты, содержащей субстрат и индикатор окислительно-восстановительного процесса, раскапывали по 180 мкл исследуемых образцов (1:10). Планшеты инкубировали при 25 °С в течение 120 часов. Результаты оценивали фотометрически на Multiskan FC (Thermo Fisher Scientific) при длине волны 595 нм. Индекс разнообразия Шеннона (H) рассчитывали согласно Beisel et al. [9].

Фитотоксичность компостных смесей оценивали с помощью индекса прорастания (GI) растений овса (*Avena sativa* L.) в соответствии с ISO 11269.1:2012 [20].

Все измерения проводились не менее чем в трехкратной повторности. Статистическую обработку полученных результатов проводили с помощью Microsoft Office Excel 2010 (Редмонд, Вашингтон, США). Все графические данные содержат средние значения и стандартные ошибки. Для оценки значимости различий использовали критерий Фишера при $\alpha = 0,05$.

Результаты исследования и обсуждение

1. Влияние разных доз биочара на физико-химические параметры компостных смесей

Температурный баланс играет решающую роль при компостировании, он является результатом комплекса сложных процессов разложения и синтеза органического вещества, происходящих при компостировании. Поэтому температура компостной смеси в тот или иной момент компостирования является важным показателем его эффективности [10]. Высокая температура компостов в первые дни компостирования, вызванная экзотермическими процессами разложения органического вещества, способствуют удалению из компостов клеток, спор и цист патогенных и паразитических видов: в качестве оптимальной, с данной точки зрения, рекомендуется температура от 55°C, которая поддерживается в компостной смеси в течение 3 суток [38]. Показано, что использование биочара при компостировании может продлевать продолжительность термофильной фазы и улучшать санитарные характеристики готового продукта, в том числе и при относительно низкой температуре окружающей среды [7].

Результаты измерения температуры компостов с разными дозами биочара представлены на рисунке 2. Обнаружено, что в контрольной компостной смеси без биочара термофильная стадия началась на 2 сутки компостирования, при этом максимальная температура составила 53-56 °C. Далее наблюдалось постепенное снижение температуры во всех вариантах компостов, которая после 16 суток и до конца процесса компостирования оставалась на уровне температуры окружающей среды.

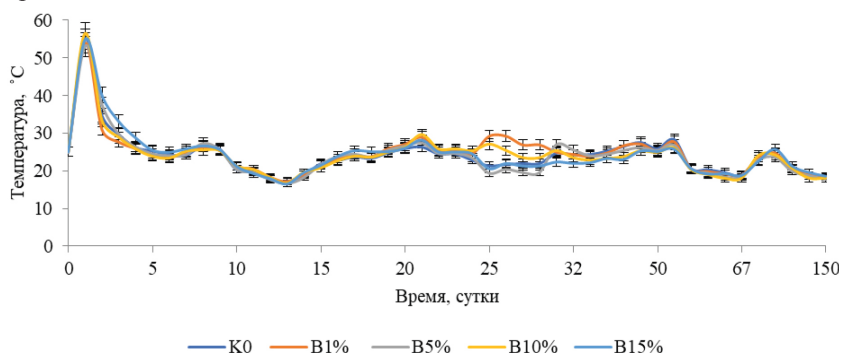


Рис. 2. Температура компостных смесей, содержащих разные дозы биочара

Внесение биочара не привело к изменению температуры смесей относительно контроля. Кроме того, не было выявлено достоверно значимых различий в температурном режиме и продолжительности термофильной фазы между смесями, обработанными разными дозами биочара. Вероятно, в нашем случае отсутствие влияния было вызвано оптимальными для компостирования температурами окружающей среды, а также благоприятном составе использованной для компостирования смеси (куриный помет и входящий в его состав подстилочный материал), которая перемешивалась и увлажнялась должным образом. Действительно, особая эффективность внесения биочара в компосты наблюдалась другими авторами при пониженных температурах окружающей среды, либо в случаях, когда пометы и навозы были полужидкими, без структурирующих элементов, что приводило к недостаточной аэрации компостов [26].

Несмотря на то, что температура, как результирующий параметр процесса компостирования, не подверглась влиянию биочара, нами были проанализированы и другие важные параметры компостирования, в частности, влажность и содержание биогенных элементов.

Для оптимизации разложения органического вещества во время компостирования требуется уровень влажности в диапазоне 40–60%. При более высокой влажности процесс компостирования становится анаэробным, а при более низкой – происходит ингибирование микробного сообщества компоста. Внесение биочара в компосты как агента с высокими адсорбирующими свойствами способствует регулированию изменения влажности в компостной куче, поскольку он увеличивает водоудерживающую способность смеси [33].

Результаты оценки влажности компостных смесей с разным содержанием биочара представлены на рисунке 3. Видно, что контрольный вариант К0 характеризовался самой высокой влажностью по сравнению с компостами с биочаром. Ее значения составляли в среднем 85%. В вариантах компостов с наименьшим содержанием биочара В1% и В5% также было обнаружено содержание влаги более 60%, в среднем оно составило 63 и 74%. Наиболее оптимальными для поддержания рекомендуемого уровня влажности оказались дозы биочара 10 и 15%. В данных вариантах компоста влажность составляла в среднем 52 и 50%.

Положительное влияние на уровень влажности от внесения биочара в компосты также было отмечено в литературе [32]. Однако, в литературе описан и противоположный эффект, когда добавление более высоких доз биочара (более 20%) вызывало пересушивание компостных смесей и

снижение микробной активности в результате повышенной аэрации из-за высокой пористости субстрата [27].

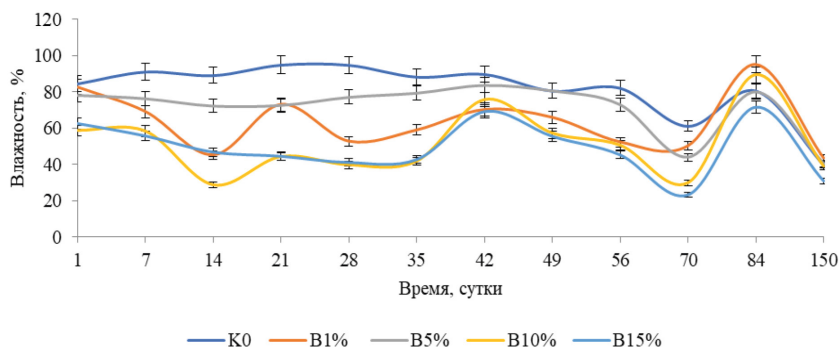


Рис. 3. Влажность компостных смесей, содержащих разные дозы биочара

Биочар на основе растительного сырья обычно характеризуется стойкой структурой, состоящей из углеродных колец, которая практически не разрушается в процессе компостирования. Биочар же, приготовленный из пометов и навозов, не имеет такой упорядоченной структуры, кроме того, он содержит большее количество биогенных элементов, в частности азот. Эти элементы могут попадать в компостные смеси и влиять на процессы разложения и синтеза органических веществ в процессе компостирования [16]. Таким образом, использование биочара при компостировании может влиять на соотношение C/N, которое является одним из ключевых параметров, влияющих на микробиологию компоста [39]. Большая площадь поверхности биочара способствует удерживанию питательных веществ, что позволяет избежать их потерь в результате выщелачивания или улетучивания и увеличить доступность питательных веществ для микроорганизмов. Это особенно важно для удержания азота и органического углерода, который может быть использован микроорганизмами в качестве питания [33].

Результаты оценки содержания биогенных элементов (C, N, P и K) в компостных смесях с разным содержанием биочара представлены на рисунке 4а-г. Содержание C, N, P и K в контрольном компосте K0 на 1 сутки компостирования составило 39,2%, 20,8%, 4729 мг/кг и 11565 мг/кг, соответственно, а на 150 сутки – 37,6%, 26,3%, 4928,5 мг/кг и 21329,5 мг/кг, соответственно. Полученные данные согласуются с данными, представленными в литературе, о содержании биогенных элементов при компостировании куриного помета [42]. Во время термофильной фазы содержание

С в материале активно снижается за счет разложения органического вещества микроорганизмами. В результате потери органического вещества и воды уменьшается вес компостируемой массы и снижается соотношение C/N. По мере сокращения доступных источников углерода, скорость деградации органического вещества постепенно снижается. В результате потери сухой массы компостного материала увеличивается концентрация различных элементов, в том числе N, P и K [10].

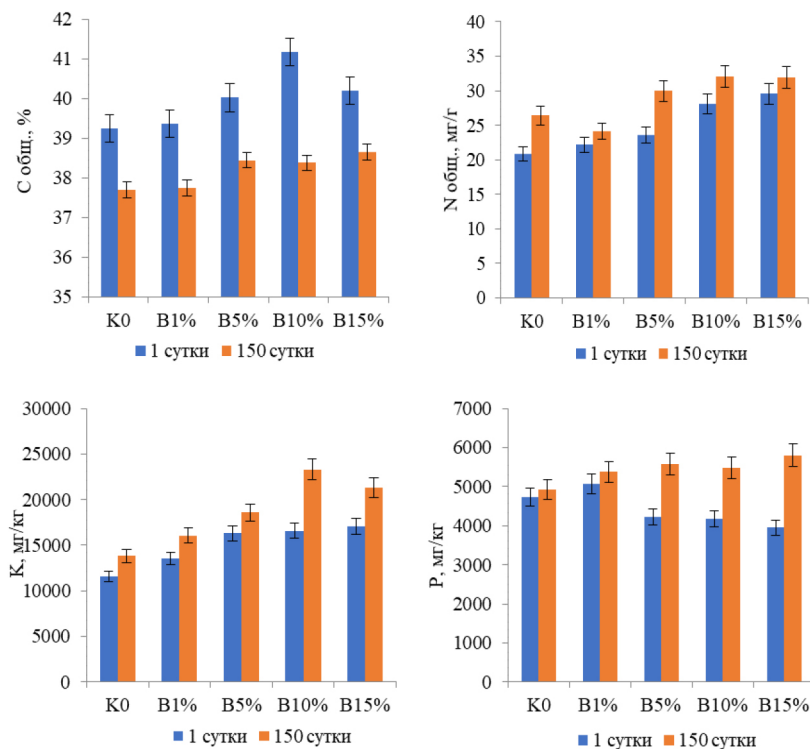


Рис. 4. Содержание общего углерода (а), общего азота (б), калия (в) и фосфора (г) в компостных смесях, содержащих разные дозы биочара

При внесении биочара было обнаружено увеличение содержания С в компостах относительно контроля как на 1 сутки, так и на 150 суток, причем в компостной смеси с наименьшей дозой биочара (вариант В1%) уровень содержания С остался сопоставимым с таковым в контрольном

образце. Увеличение содержания С в компостах при добавлении биочара связано с тем, что биочар является углеродсодержащим субстратом, что позволяет использовать его в целях компенсации естественных потерь углерода в результате минерализации в течение процесса компостирования [15].

В компостных смесях с биочаром было выявлено увеличение содержания N по сравнению с контролем как на 1 сутки, так и на 150 суток, причем наибольшие отличия от контроля были обнаружены для образцов компостов, обработанных большей дозой биочара (варианты В10% и В15%). При компостировании обычно наблюдаются значительные потери азота, снизить которые успешно помогает добавление биочара в исходные смеси [12].

Внесение биочара способствовало увеличению содержания К в компостах относительно контроля, причем был обнаружен дозозависимый эффект на 150 суток компостирования. Поскольку биочар изначально содержал в себе К, то при добавлении различных его доз наблюдался эффект в аккумуляции К в конечных компостах в результате растворения и выщелачивания калиевых солей [41].

На 1 сутки содержание Р в компостах с добавлением более высоких доз биочара (5, 10 и 15%) было значительно ниже, чем в контроле. На 150 суток наблюдалось увеличение содержания Р в этих вариантах компостных смесей. Вероятно, вначале биочар сорбировал растворимые соединения фосфора, а далее произошло постепенное их высвобождение. Кроме того, фосфорсодержащие соединения могли поступать в компост и из самого биочара [35].

Полученные данные подтверждаются результатами другим авторов о том, что использование биочара во время компостирования навозов и пометов способствует накоплению в конечном продукте углерода, азота, а также других биогенных элементов, таких как фосфор и калий, тем самым повышая удобрительные характеристики таких компостов [35, 41].

2. Влияние разных доз биочара на микробиологические параметры компостных смесей

Потенциальное влияние биочара на процесс компостирования может быть не только прямым (как результат сорбции, десорбции влаги и элементов), но и опосредованным, через основной драйвер процесса компостирования – бактерии и грибы. Сообщается, что поры биочара могут становиться местами повышенного концентрирования микроорганизмов

из-за создания для них благоприятных условий. Кроме того, биочар может изменять pH и влажность компостов, что так же может приводить к повышению микробной активности [11].

Респираторная активность является показателем стабильности компостов, поскольку отражает интенсивность процесса минерализации органического вещества. При его активной деградации происходит перераспределение количества выделяемого углекислого газа: при эффективном процессе в начале оно больше, чем при неэффективном, а в конце – наоборот, ниже [14].

Результаты оценки респираторной активности микробного сообщества компостов с разными дозами биочара представлены на рисунке 5. В контрольном варианте максимальная респираторная активность была обнаружена на 1 сутки процесса компостирования и составила 215,9 мг CO_2 – С/г*ч. Далее она постепенно снижалась, однако было зафиксировано еще два пика респираторной активности на 14 и 42 сутки – 165,3 и 192,6 мг CO_2 – С/г*ч, соответственно. Начиная с 49 суток, ее значения снизились и до конца процесса компостирования составляли 50,2–85,5 мг CO_2 – С/г*ч. Полученные результаты согласуются с литературными данными и отражают традиционный характер динамики уровня респираторной активности при компостировании куриного помета [34].

Наибольшее значение респираторной активности для всех образцов компостов с биочаром зафиксировано на 1 сутки компостирования, оно находилось в пределах 160 (образец В10%) – 280 мг CO_2 – С/г*ч (образец В5%). Далее уровень респираторной активности в целом снижался во всех компостных смесях с биочаром, однако характеризовался значительными флуктуациями. Так, на 21 и 28 сутки были отмечены пики респираторной активности для образцов В1% (174,1 и 166 мг CO_2 – С/г*ч) и В10% (138,3 и 149,8 мг CO_2 – С/г*ч). После 49 суток респираторная активность компостов с биочаром находилась на уровне 28–66 мг CO_2 – С/г*ч и существенно не изменялась, как и в контрольном образце, что свидетельствует о достижении стабильности исследуемыми компостными смесями.

Отмеченные пики респираторной активности компостов с биочаром связаны с тем, что внесение биочара изменяет условия функционирования микробного сообщества компостов (аэрация, влажность, высокая пористость, доступность питательных веществ), что влияет на интенсивность деградации органического вещества и выделение углекислого газа [14].

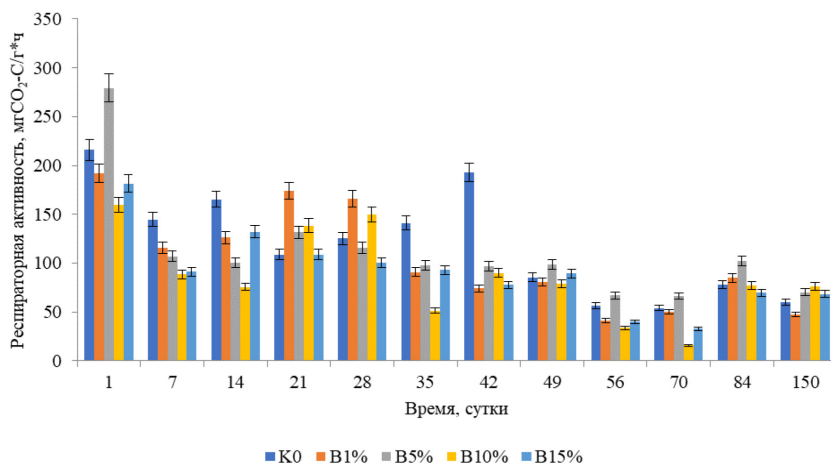


Рис. 5. Респираторная активность микробного сообщества компостных смесей, содержащих разные дозы биочара

Кроме респираторной активности, нами была оценена общая метаболическая активность микроорганизмов компостных смесей с использованием метода Biolog Ecolpate (позволяющего проанализировать способность микроорганизмов разлагать различные углеродные субстраты). Установлено, что метаболическая активность контрольного образца K0 была высокой на 1 сутки процесса компостирования, затем наблюдалось ее снижение. Начиная с 42 суток, метаболическая активность увеличилась и оставалась на таком уровне до 150 суток. В образцах компостов, содержащих биочар, метаболическая активность была также высокой на 1 сутки и в целом на последующие сутки характер ее изменения был схожим с таковым в контрольном компосте.

Результаты оценки биоразнообразия микробного сообщества исследуемых компостов с помощью индекса Шеннона представлены на рисунке 7. В целом, динамика изменения биоразнообразия как в контроле, так и в образцах с биочаром сопоставима с изменением уровня метаболической активности в процессе компостирования. На 1 сутки отмечено высокое биоразнообразие для всех вариантов компостных смесей, далее наблюдалось его снижение и затем, начиная с 42 суток, биоразнообразие вновь увеличилось.

Во время термофильной фазы происходит разложение легкодоступных растворимых соединений углерода, кроме того, происходит самора-

зогрев компстных смесей. Все это приводит к значительному снижению разнообразия микроорганизмов в эту фазу. Именно таким снижением разнообразия, и соответственно, узким диапазоном субстратов, которые немногочисленные виды микроорганизмов способны разлагать, и обусловлены низкие показатели AWCD и индекса Шеннона в данной фазе компстирования. Далее, вероятно, в микробном сообществе появились виды, способные к деградации сложных органических соединений, что привело к расширению спектра потребляемых субстратов и увеличению показателя AWCD.

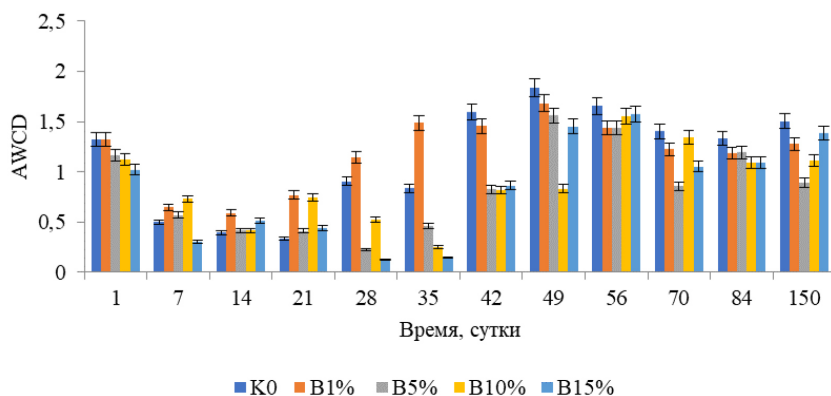


Рис. 6. Степень потребления субстратов микробным сообществом компстных смесей, содержащих разные дозы биочара

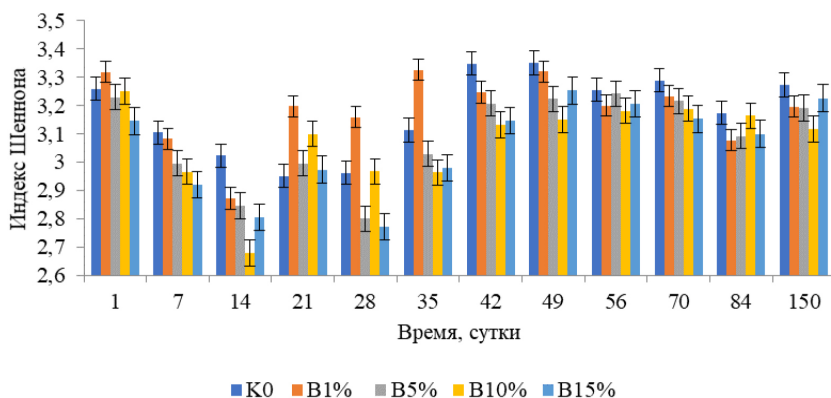


Рис. 7. Индекс биоразнообразия микробного сообщества компстных смесей, содержащих разные дозы биочара

Биочар оказывает положительное влияние на микробное сообщество компостов, стимулирует размножение микроорганизмов и метаболическую активность [6]. Было выявлено увеличение активности ключевых ферментов (уреазы, фосфатазы и полифенолоксидазы) на 30–40% в компосте, смешанном с биочаром [21]. Было также обнаружено обогащение разнообразия бактериального сообщества в компостах, смешанных с биочаром, что отражалось в увеличении индекса Шеннона на всех этапах компостирования [36].

В нашем случае, внесение разных доз биочара не оказало значимого влияния на метаболическую активность и биоразнообразие микробного сообщества, вероятно, по той причине, что компостные смеси изначально содержали все необходимые для микроорганизмов питательные вещества, а также в процессе компостирования строго регулировались параметры компостирования, такие как влажность, аэрация и т.д.

3. Влияние разных доз биочара на фитотоксичность компостных смесей

Фитотоксичность является важным показателем, характеризующим достижение компостом стадии зрелости. Совместное компостирование навоза с биочаром способствует увеличению всхожести семян и урожайности растений, так как он, обладая высокой емкостью катионного обмена, снижает выщелачивание питательных веществ. Кроме того, биочар снижает биодоступность тяжелых металлов и фитотоксичных соединений, в значительном количестве содержащихся в навозах и пометах [29].

Фитотоксичность компостных смесей оценивалась на 150 сутки с помощью индекса прорастания GI на растениях овса (*Avena sativa* L.) (рисунок 8). Уровень GI менее 50% указывает на сильную фитотоксичность компоста, 50–80% — на умеренную фитотоксичность и более 80 % — на отсутствие фитотоксичности [29]. Согласно полученным результатам, все исследуемые компостные смеси обладали индексом прорастания более 80%, что указывает на отсутствие фитотоксичности. В контрольном компосте индекс прорастания составил 90%. В вариантах с добавлением 1, 5 и 10% биочара индекс прорастания был сопоставимым с контролем — 88, 87 и 89 %, соответственно. Наиболее оптимальной с точки зрения снижения фитотоксичности оказалась доза биочара 15%. В данном образце было выявлено максимальное значение индекса прорастания, которое составило 118%. Вероятно, использование биочара в большей дозе, с одной стороны, позволило наиболее эффективно сорбировать токсичные для растения соединения в компосте, а с другой стороны, способствовало снабжению растений необходимыми питательными элементами.

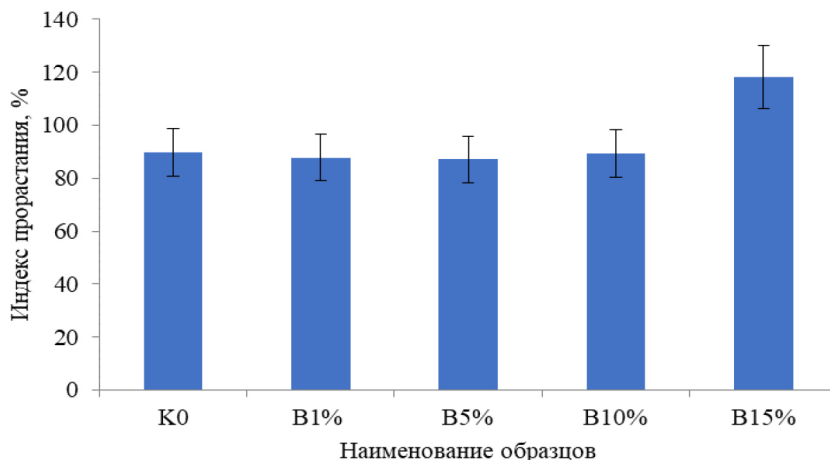


Рис. 8. Индекс прорастания тест-объекта растений овса (*Avena sativa* L.) в компостных смесях, содержащих разные дозы биочара

В литературе также указывается на снижение фитотоксичных свойств компостов, предварительно обработанных биочаром. Так, было выявлено максимальное значение GI 120% для компоста, смешанного с биочаром в дозе 10%, GI 110% – для компоста с 5% биочара и GI 90% – для компоста с 3% биочара [13]. В другом исследовании самое высокое значение GI было обнаружено при использовании биочара в дозе 10% [29].

Заключение

В данной работе было исследовано влияние разных доз биочара на основе куриного помета (0, 1, 5, 10, 15%) на эффективность процесса компостирования куриного помета. Показано, что внесение биочара не оказало значимого влияния на температурный режим компостирования – все исследуемые компостные смеси характеризовались традиционной динамикой температуры. Для поддержания рекомендованного уровня влажности наиболее оптимальными дозами являлись дозы биочара 10 и 15%. Обнаружено положительное влияние на содержание биогенных элементов C, N, P и K в конечных компостных смесях при использовании 10 и 15% биочара. Отмечено отсутствие влияния биочара на микробиологические параметры компостирования (респираторная активность, метаболическая активность) при сохранении положительной динамики процесса компостирования. Оценка влияния биочара на фитотоксичность компостов по-

казала, что при использовании наибольшей дозы биочара (15%) было обнаружено максимальное значение индекса прорастания GI (118%) для растений овса (*Avena sativa* L.).

Заключение комитета по этике. Неприменимо.

Информированное согласие. Не применимо.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

Список литературы

1. Галиева, Г. Ш., Курынцева, П. А., & Галицкая, П. Ю. (2021). Влияние биочара из куриного помёта на микроорганизмы и растения. *Учёные записки Казанского университета. Серия: Естественные науки*, 163(2), 221–237. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2021.2.221-237>. EDN: <https://elibrary.ru/MDQGQM>
2. Гельман, Е. А., Терентьева, Т. М., & Шанина, Н. Э. (1987). *Методы количественного органического элементного микроанализа* (292 с.). Москва: Химия.
3. ГОСТ 28268-89. *Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений* (с. 1–8). Москва: Стандартинформ, 2006.
4. ГОСТ Р 8.777-2011. *Государственная система обеспечения единства измерений. Дисперсный состав аэрозолей и взвесей. Определение размеров частиц по дифракции лазерного излучения* (с. 1–11). Москва: Стандартинформ, 2019.
5. *Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания металлов в твёрдых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой* (ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98, с. 1–31). Москва, 2005.
6. Amoakwah, E., Frimpong, K., & Arthur, E. A. (2022). Biochar amendment impacts on microbial community structures and biological and enzyme activities in a weathered tropical sandy loam. *Applied Soil Ecology*, 172(12), 104364. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104364>. EDN: <https://elibrary.ru/PHGMGW>

7. Antonangelo, J. A., Sun, X., & Zhang, H. (2021). The roles of co-composted biochar (COMBI) in improving soil quality, crop productivity, and toxic metal amelioration. *Journal of Environmental Management*, 277, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111443>. EDN: <https://elibrary.ru/LRXGZL>
8. Arikan, O., Mulbry, W., Ingram, D., & Millner, P. (2009). Minimally managed composting of beef manure at the pilot scale: Effect of manure pile construction on pile temperature profiles and on the fate of oxytetracycline and chlortetracycline. *Bioresource Technology*, 100(19), 4447–4453. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.063>
9. Beisel, J. N., & Moreteau, J. C. (1997). A simple formula for calculating the lower limit of Shannon's diversity index. *Ecological Modelling*, 99(2), 289–292. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(97\)01954-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(97)01954-6). EDN: <https://elibrary.ru/AIRYOV>
10. Bernal, M. P., Albuquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology*, 100(22), 5444–5453. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>
11. Bolan, S., Hou, D., & Wang, L. (2023). The potential of biochar as a microbial carrier for agricultural and environmental applications. *Science of the Total Environment*, 886(2), 163968. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163968>. EDN: <https://elibrary.ru/SLCEUD>
12. Chen, Y. X., Huang, X. D., & Han, Z. Y. (2010). Effects of bamboo charcoal and bamboo vinegar on nitrogen conservation and heavy metals immobility during pig manure composting. *Chemosphere*, 78(9), 1177–1181. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.12.029>
13. Chung, W. J., Chang, S. W., & Chaudhary, D. K. (2021). Effect of biochar amendment on compost quality, gaseous emissions and pathogen reduction during in-vessel composting of chicken manure. *Chemosphere*, 283, 131129. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131129>. EDN: <https://elibrary.ru/KLKBCN>
14. Czekala, W., Malińska, K., & Cáceres, R. (2016). Co-composting of poultry manure mixtures amended with biochar — The effect of biochar on temperature and C-CO₂ emission. *Bioresource Technology*, 200, 921–927. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.11.019>
15. Ding, Y., Liu, Y., & Liu, S. (2017). Potential benefits of biochar in agricultural soils: A review. *Pedosphere*, 27(4), 645–661. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60375-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60375-8)
16. Domingues, R. R., Trugilho, P. F., & Silva, C. A. (2017). Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and

- environmental benefits. *PLoS ONE*, 12(5), 1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176884>
17. Ezzariai, A., Hafidi, M., & Khadra, A. (2018). Human and veterinary antibiotics during composting of sludge or manure: Global perspectives on persistence, degradation, and resistance genes. *Journal of Hazardous Materials*, 359(4), 465–481. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.07.092>
 18. Hua, L., Wu, W., & Liu, Y. (2009). Reduction of nitrogen loss and Cu and Zn mobility during sludge composting with bamboo charcoal amendment. *Environmental Science and Pollution Research*, 16, 1–9. <https://doi.org/10.1007/s11356-008-0041-0>. EDN: <https://elibrary.ru/LYQDYL>
 19. ISO 14240-1:1997. *Soil quality — Determination of soil microbial biomass. Part 1: Substrate-induced respiration method* (vol. 1, pp. 1–5), 1997.
 20. ISO 11269-1. (2012). *Soil quality — Determination of the effects of pollutants on soil flora — Part 1: Method for the measurement of inhibition of root growth* (pp. 1–6).
 21. Jindo, K., Suto, K., & Matsumoto, K. (2012). Chemical and biochemical characterisation of biochar-blended composts prepared from poultry manure. *Bioresource Technology*, 110(3), 396–404. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.120>
 22. Kacprzak, M., Malińska, K., & Grosser, A. (2022). Cycles of carbon, nitrogen and phosphorus in poultry manure management technologies — environmental aspects. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 10(2), 1–25. <https://doi.org/10.1080/10643389.2022.2096983>. EDN: <https://elibrary.ru/RLDFQT>
 23. Khan, N., Clark, I., & Sánchez-Monedero, M. A. (2014). Maturity indices in co-composting of chicken manure and sawdust with biochar. *Bioresource Technology*, 168, 245–251. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.123>
 24. Kumar, M., Zhang, Z., & Wang, Q. (2017). New insight with the effects of biochar amendment on bacterial diversity as indicators of biomarkers support the thermophilic phase during sewage sludge composting. *Bioresource Technology*, 238, 589–601. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.04.100>
 25. Lehmann, J., Rillig, M. C., & Thies, J. (2011). Biochar effects on soil biota – A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(9), 1812–1836. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>. EDN: <https://elibrary.ru/OLCSUJ>
 26. Liu, H., Wang, L., & Lei, M. (2019). Positive impact of biochar amendment on thermal balance during swine manure composting at relatively low ambient temperature. *Bioresource Technology*, 273(10), 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.033>

27. Liu, N., Zhou, J., & Han, L. (2017). Role and multi-scale characterization of bamboo biochar during poultry manure aerobic composting. *Bioresource Technology*, 241, 190–199. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.144>
28. López-Cano, I., Roig, A., & Cayuela, M. L. (2016). Biochar improves N cycling during composting of olive mill wastes and sheep manure. *Waste Management*, 49, 553–559. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.031>
29. Milon, A. R., Chang, S. W., & Ravindran, B. (2022). Biochar amended compost maturity evaluation using commercial vegetable crops seedlings through phytotoxicity germination bioassay. *Journal of King Saud University — Science*, 34(2), 101770. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101770>. EDN: <https://elibrary.ru/JIDZSG>
30. Nidheesh, P. V., Gopinath, A., & Ranjith, N. (2021). Potential role of biochar in advanced oxidation processes: A sustainable approach. *Chemical Engineering Journal*, 405(5), 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126582>. EDN: <https://elibrary.ru/MEDBXU>
31. Qasim, W., Lee, M. H., & Moon, B. E. (2018). Composting of chicken manure with a mixture of sawdust and wood shavings under forced aeration in a closed reactor system. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 7(3), 261–267. <https://doi.org/10.1007/s40093-018-0212-z>. EDN: <https://elibrary.ru/SPIOIU>
32. Qian, S., Fu, Y., & Zhou, X. (2023). Biochar-compost as a new option for soil improvement: Application in various problem soils. *Science of the Total Environment*, 870(9), 162024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162024>. EDN: <https://elibrary.ru/RCBIVG>
33. Sanchez-Monedero, M. A., Cayuela, M. L., & Roig, A. (2018). Role of biochar as an additive in organic waste composting. *Bioresource Technology*, 247(9), 1155–1164. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.193>
34. Sánchez, A. (2023). A perspective on the use of respiration indices beyond the measurement of the stability of compost. *Waste Management Bulletin*, 1(2), 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2023.05.003>. EDN: <https://elibrary.ru/YPBHPA>
35. Sulemana, N., Nartey, E. K., & Abekoe, M. K. (2021). Use of biochar-compost for phosphorus availability to maize in a concretionary ferric lixisol in northern Ghana. *Agronomy*, 11(2), 1–11. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020359>. EDN: <https://elibrary.ru/XIXBNS>
36. Sun, D., Lan, Y., & Xu, E. G. (2016). Biochar as a novel niche for culturing microbial communities in composting. *Waste Management*, 54(2), 93–100. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.004>
37. Sun, P., Liu, B., & Ahmed, I. (2022). Composting effect and antibiotic removal under a new temperature control strategy. *Waste Management*, 153(7), 89–

98. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.08.025>. EDN: <https://elibrary.ru/LSVZCX>
38. Wang, M., Lv, H., & Xu, L. (2023). Screening of cold-adapted strains and its effects on physicochemical properties and microbiota structure of mushroom residue composting. *Fermentation*, 9(4), 1–19. <https://doi.org/10.3390/fermentation9040354>. EDN: <https://elibrary.ru/CJDACD>
39. Wang, X., Cui, H., & Shi, J. (2015). Relationship between bacterial diversity and environmental parameters during composting of different raw materials. *Bioresource Technology*, 198, 395–402. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.041>
40. Wang, Y., Akdeniz, N., & Yi, S. (2021). Biochar-amended poultry mortality composting to increase compost temperatures, reduce ammonia emissions, and decrease leachate's chemical oxygen demand. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 315(3), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107451>. EDN: <https://elibrary.ru/GIZTJS>
41. Widowati, A. (2014). Biochar effect on potassium fertilizer and leaching potassium dosage for two corn planting seasons. *Agrivita*, 36(1), 65–71.
42. Zhou, Z., & Yao, H. (2020). Effects of composting different types of organic fertilizer on the microbial community structure and antibiotic resistance genes. *Microorganisms*, 8(2), 1–20. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8020268>. EDN: <https://elibrary.ru/LMLATS>

References

- Galieva, G. Sh., Kuryntseva, P. A., & Galitskaya, P. Yu. (2021). Effect of biochar from chicken manure on microorganisms and plants. *Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series*, 163(2), 221–237. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2021.2.221-237>. EDN: <https://elibrary.ru/MDQGQM>
- Gelman, E. A., Terentieva, T. M., & Shanina, N. E. (1987). *Methods of quantitative organic elemental microanalysis* (292 pp.). Moscow: Khimiya.
- GOST 28268-89. *Soils. Methods for determining moisture content, maximum hygroscopic moisture, and permanent wilting point moisture* (pp. 1–8). Moscow: Standartinform, 2006.
- GOST R 8.777-2011. *State system for ensuring the uniformity of measurements. Disperse composition of aerosols and suspensions. Determination of particle sizes by laser light diffraction* (pp. 1–11). Moscow: Standartinform, 2019.
- Quantitative chemical analysis of soils. Method for measuring metal content in solid samples using inductively coupled plasma spectrometry* (PND F 16.1:2.3:3.11-98, pp. 1–31). Moscow, 2005.

6. Amoakwah, E., Frimpong, K., & Arthur, E. A. (2022). Biochar amendment impacts on microbial community structures and biological and enzyme activities in a weathered tropical sandy loam. *Applied Soil Ecology*, 172(12), 104364. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104364>. EDN: <https://elibrary.ru/PHGMGW>
7. Antonangelo, J. A., Sun, X., & Zhang, H. (2021). The roles of co-composted biochar (COMBI) in improving soil quality, crop productivity, and toxic metal amelioration. *Journal of Environmental Management*, 277, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111443>. EDN: <https://elibrary.ru/LRXGZL>
8. Arikan, O., Mulbry, W., Ingram, D., & Millner, P. (2009). Minimally managed composting of beef manure at the pilot scale: Effect of manure pile construction on pile temperature profiles and on the fate of oxytetracycline and chlortetracycline. *Bioresource Technology*, 100(19), 4447–4453. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.063>
9. Beisel, J. N., & Moreteau, J. C. (1997). A simple formula for calculating the lower limit of Shannon's diversity index. *Ecological Modelling*, 99(2), 289–292. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(97\)01954-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(97)01954-6). EDN: <https://elibrary.ru/AIRYOV>
10. Bernal, M. P., Albuquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology*, 100(22), 5444–5453. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>
11. Bolan, S., Hou, D., & Wang, L. (2023). The potential of biochar as a microbial carrier for agricultural and environmental applications. *Science of the Total Environment*, 886(2), 163968. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163968>. EDN: <https://elibrary.ru/SLCEUD>
12. Chen, Y. X., Huang, X. D., & Han, Z. Y. (2010). Effects of bamboo charcoal and bamboo vinegar on nitrogen conservation and heavy metals immobility during pig manure composting. *Chemosphere*, 78(9), 1177–1181. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.12.029>
13. Chung, W. J., Chang, S. W., & Chaudhary, D. K. (2021). Effect of biochar amendment on compost quality, gaseous emissions and pathogen reduction during in-vessel composting of chicken manure. *Chemosphere*, 283, 131129. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131129>. EDN: <https://elibrary.ru/CLKBCN>
14. Czekala, W., Malińska, K., & Cáceres, R. (2016). Co-composting of poultry manure mixtures amended with biochar — The effect of biochar on temperature and C-CO₂ emission. *Bioresource Technology*, 200, 921–927. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.11.019>

15. Ding, Y., Liu, Y., & Liu, S. (2017). Potential benefits of biochar in agricultural soils: A review. *Pedosphere*, 27(4), 645–661. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60375-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60375-8)
16. Domingues, R. R., Trugilho, P. F., & Silva, C. A. (2017). Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. *PLoS ONE*, 12(5), 1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176884>
17. Ezzariai, A., Hafidi, M., & Khadra, A. (2018). Human and veterinary antibiotics during composting of sludge or manure: Global perspectives on persistence, degradation, and resistance genes. *Journal of Hazardous Materials*, 359(4), 465–481. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.07.092>
18. Hua, L., Wu, W., & Liu, Y. (2009). Reduction of nitrogen loss and Cu and Zn mobility during sludge composting with bamboo charcoal amendment. *Environmental Science and Pollution Research*, 16, 1–9. <https://doi.org/10.1007/s11356-008-0041-0>. EDN: <https://elibrary.ru/LYQDYL>
19. ISO 14240-1:1997. *Soil quality — Determination of soil microbial biomass. Part 1: Substrate-induced respiration method* (vol. 1, pp. 1–5), 1997.
20. ISO 11269-1. (2012). *Soil quality — Determination of the effects of pollutants on soil flora — Part 1: Method for the measurement of inhibition of root growth* (pp. 1–6).
21. Jindo, K., Suto, K., & Matsumoto, K. (2012). Chemical and biochemical characterisation of biochar-blended composts prepared from poultry manure. *Bioresource Technology*, 110(3), 396–404. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.120>
22. Kacprzak, M., Malińska, K., & Grosser, A. (2022). Cycles of carbon, nitrogen and phosphorus in poultry manure management technologies — environmental aspects. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 10(2), 1–25. <https://doi.org/10.1080/10643389.2022.2096983>. EDN: <https://elibrary.ru/RLDFQT>
23. Khan, N., Clark, I., & Sánchez-Monedero, M. A. (2014). Maturity indices in co-composting of chicken manure and sawdust with biochar. *Bioresource Technology*, 168, 245–251. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.123>
24. Kumar, M., Zhang, Z., & Wang, Q. (2017). New insight with the effects of biochar amendment on bacterial diversity as indicators of biomarkers support the thermophilic phase during sewage sludge composting. *Bioresource Technology*, 238, 589–601. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.04.100>
25. Lehmann, J., Rillig, M. C., & Thies, J. (2011). Biochar effects on soil biota – A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(9), 1812–1836. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>. EDN: <https://elibrary.ru/OLCSUJ>

26. Liu, H., Wang, L., & Lei, M. (2019). Positive impact of biochar amendment on thermal balance during swine manure composting at relatively low ambient temperature. *Bioresource Technology*, 273(10), 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.033>
27. Liu, N., Zhou, J., & Han, L. (2017). Role and multi-scale characterization of bamboo biochar during poultry manure aerobic composting. *Bioresource Technology*, 241, 190–199. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.144>
28. López-Cano, I., Roig, A., & Cayuela, M. L. (2016). Biochar improves N cycling during composting of olive mill wastes and sheep manure. *Waste Management*, 49, 553–559. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.031>
29. Milon, A. R., Chang, S. W., & Ravindran, B. (2022). Biochar amended compost maturity evaluation using commercial vegetable crops seedlings through phytotoxicity germination bioassay. *Journal of King Saud University — Science*, 34(2), 101770. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101770>. EDN: <https://elibrary.ru/JIDZSG>
30. Nidheesh, P. V., Gopinath, A., & Ranjith, N. (2021). Potential role of biochar in advanced oxidation processes: A sustainable approach. *Chemical Engineering Journal*, 405(5), 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126582>. EDN: <https://elibrary.ru/MEDBXU>
31. Qasim, W., Lee, M. H., & Moon, B. E. (2018). Composting of chicken manure with a mixture of sawdust and wood shavings under forced aeration in a closed reactor system. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 7(3), 261–267. <https://doi.org/10.1007/s40093-018-0212-z>. EDN: <https://elibrary.ru/SPIOIU>
32. Qian, S., Fu, Y., & Zhou, X. (2023). Biochar-compost as a new option for soil improvement: Application in various problem soils. *Science of the Total Environment*, 870(9), 162024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162024>. EDN: <https://elibrary.ru/RCBIVG>
33. Sanchez-Monedero, M. A., Cayuela, M. L., & Roig, A. (2018). Role of biochar as an additive in organic waste composting. *Bioresource Technology*, 247(9), 1155–1164. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.193>
34. Sánchez, A. (2023). A perspective on the use of respiration indices beyond the measurement of the stability of compost. *Waste Management Bulletin*, 1(2), 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2023.05.003>. EDN: <https://elibrary.ru/YPBHPA>
35. Sulemana, N., Nartey, E. K., & Abekoe, M. K. (2021). Use of biochar-compost for phosphorus availability to maize in a concretionary ferric lixisol in north-

- ern Ghana. *Agronomy*, 11(2), 1–11. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020359>. EDN: <https://elibrary.ru/XIXBNS>
36. Sun, D., Lan, Y., & Xu, E. G. (2016). Biochar as a novel niche for culturing microbial communities in composting. *Waste Management*, 54(2), 93–100. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.004>
37. Sun, P., Liu, B., & Ahmed, I. (2022). Composting effect and antibiotic removal under a new temperature control strategy. *Waste Management*, 153(7), 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.08.025>. EDN: <https://elibrary.ru/LSVZCX>
38. Wang, M., Lv, H., & Xu, L. (2023). Screening of cold-adapted strains and its effects on physicochemical properties and microbiota structure of mushroom residue composting. *Fermentation*, 9(4), 1–19. <https://doi.org/10.3390/fermentation9040354>. EDN: <https://elibrary.ru/CJDACD>
39. Wang, X., Cui, H., & Shi, J. (2015). Relationship between bacterial diversity and environmental parameters during composting of different raw materials. *Bioresource Technology*, 198, 395–402. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.041>
40. Wang, Y., Akdeniz, N., & Yi, S. (2021). Biochar-amended poultry mortality composting to increase compost temperatures, reduce ammonia emissions, and decrease leachate's chemical oxygen demand. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 315(3), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107451>. EDN: <https://elibrary.ru/GIZTJS>
41. Widowati, A. (2014). Biochar effect on potassium fertilizer and leaching potassium dosage for two corn planting seasons. *Agrivita*, 36(1), 65–71.
42. Zhou, Z., & Yao, H. (2020). Effects of composting different types of organic fertilizer on the microbial community structure and antibiotic resistance genes. *Microorganisms*, 8(2), 1–20. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8020268>. EDN: <https://elibrary.ru/LMLATS>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Данилова Наталья Викторовна, к-т биол. наук, старший преподаватель кафедры биотехнологии

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

*ул. Кремлевская, 18, г. Казань, 420008, Российская Федерация
natasha-danilova91@mail.ru*

Бикташева Лилия Рамилевна, к-т биол. наук, старший преподаватель кафедры биотехнологии

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

*ул. Кремлевская, 18, г. Казань, 420008, Российская Федерация
biktasheval@mail.ru*

Курынцева Полина Александровна, к-т биол. наук, доцент кафедры биотехнологии

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

*ул. Кремлевская, 18, г. Казань, 420008, Российская Федерация
polinazwerewa@yandex.ru*

Галицкая Полина Юрьевна, доктор биол. наук, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории OpenLab «Био-контроль»

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

*ул. Кремлевская, 18, г. Казань, 420008, Российская Федерация
gpolina33@yandex.ru*

Селивановская Светлана Юрьевна, доктор биол. наук, профессор кафедры биотехнологии

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

*ул. Кремлевская, 18, г. Казань, 420008, Российская Федерация
Svetlana.Selivanovskaya@kpfu.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Natalia V. Danilova, PhD (Biology), Senior Lecturer, Department of Biotechnology

*Kazan (Volga Region) Federal University
18, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Russian Federation
natasha-danilova91@mail.ru
SPIN-code: 5696-2506
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8750-0929>
ResearcherID: AAI-8891-2020
Scopus Author ID: 57200701116*

Liliya R. Biktasheva, PhD (Biology), Senior Lecturer, Department of Biotechnology

*Kazan (Volga Region) Federal University
18, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Russian Federation
biktasheval@mail.ru
SPIN-code: 2867-4922
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1133-444X>
ResearcherID: N-3675-2016
Scopus Author ID: 56358635400*

Polina A. Kuryntseva, PhD (Biology), associate professor, Department of Biotechnology

*Kazan (Volga Region) Federal University
18, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Russian Federation
polinazwerewa@yandex.ru
SPIN-code: 7028-8557
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9274-7077>
ResearcherID: M-3407-2016
Scopus Author ID: 56069925000*

Polina Yu. Galitskaya, Doctor of Biological Sciences, Chief Scientist of the OpenLab “Biocontrol” research laboratory

*Kazan (Volga Region) Federal University
18, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Russian Federation
gpolina33@yandex.ru
SPIN-code: 5429-0714
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5070-786X>*

ResearcherID: L-8847-2013

Scopus Author ID: 36165160200

Svetlana Yu. Selivanovskaya, Doctor of Biological Sciences, Professor, Department of Biotechnology

Kazan (Volga Region) Federal University

18, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Russian Federation

Svetlana.Selivanovskaya@kpfu.ru

SPIN-code: 4867-6900

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6379-7166>

ResearcherID: L-8851-2013

Scopus Author ID: 6603604965

Поступила 21.10.2024

После рецензирования 14.12.2024

Принята 30.01.2025

Received 21.10.2024

Revised 14.12.2024

Accepted 30.01.2025