

Экология, почвоведение и природопользование / Ecology, Soil Science and Nature Management

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-1-1369](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1369)EDN: [GYRNUV](https://www.edn.ru/gyrnuv/)

УДК 631.879.42:631.812.12



Оценка углеродного следа компоста из куриного помёта, получаемого с использованием технологии компостирования в буртах

А.Р. Камалова¹, Л.Г. Ахметзянова¹, И.Н. Курицин¹, С.Г. Манишкин²,
П.А. Курынцева¹, С.Ю. Селивановская¹

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Казань, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет»,
Йошкар-Ола, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Компостирование куриного помёта как метод снижения углеродного следа животноводства остаётся недостаточно изученным, особенно в аспекте баланса между эмиссией парниковых газов и долгосрочной стабилизацией углерода в почве. В работе были учтены не только прямые выбросы, но и косвенные, связанные с эксплуатацией автотранспорта и энергозатратными операциями. Полученные данные позволяют оптимизировать процесс с учётом экологической эффективности и соответствия климатическим целям.

Цель. Рассчитать углеродный след компоста, получаемого на модельном предприятии, расположенном в средней полосе России, и использующем технологию компостирования куриного помёта в открытых буртах.

Материалы и методы. В исследовании использовали куриный помёт напольного содержания, полученный с птицефабрики «Атяшево» (Республика Марий Эл). Компостирование осуществляли в двух буртах (24×3×1,1 м, по 28 т сырья) в течение 37 суток, при котором осуществлялся постоянный мониторинг температурного режима и влажности. Прямые выбросы (CO₂, CH₄) определяли газовым хроматографом «ПИА» методом закрытой камеры, косвенные выбросы рассчитывали по данным энергопотребления и топливных затрат согласно GHG-протоколу. Все измерения выполнены в трёхкратной повторности.

Результаты исследований. Было выявлено, что наибольшая интенсивность выделения CO₂ (до 27,17 г C/м²*ч) наблюдалась в начальной фазе из-за активно-

го разложения легкодоступной органики, а к концу процесса эмиссия снизилась до 119,78 г С/м²*ч. Суммарные прямые выбросы за период компостирования составили 1,91 т СО₂. Расчеты согласно Минприроды России №371 показали, что эмиссия СН₄ составила $5,6 \times 10^{-7}$ т, эмиссия N₂O – $3,4 \times 10^{-8}$ т, экспериментально объем эмиссии данных газов установить не удалось, так как концентрация данных газов была на уровне чувствительности прибора. Анализ косвенных выбросов выявил, что транспортировка сырья (0,024 т СО₂), работа ворошителя (0,189 т СО₂) и трактора (0,151 т СО₂) вносили наибольший вклад в углеродный след компоста. Большой вклад вносило гранулирование – 0,72 т СО₂.

Заключение. Расчет по упрощенной методике не учитывает до 63% выбросов: углеродный след компоста составил 0,044 т СО₂/т при расчете по упрощенной методике и 0,117 т СО₂/т при расчете с учетом косвенных выбросов.

Ключевые слова: парниковые газы; компостирование; эмиссия парниковых газов; топливо; углеродный след; куриный помет

Для цитирования. Камалова, А. Р., Ахметзянова, Л. Г., Курицин, И. Н., Ма-нишкин, С. Г., Курынцева, П. А., & Селивановская, С. Ю. (2026). Оценка углеродно-го следа компоста из куриного помета, получаемого с использованием технологии компостирования в буртах. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 115–140. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1369>

Assessment of the carbon footprint of chicken manure compost produced using windrow composting technology

A.R. Kamalova¹, L.G. Akhmetzyanova¹, I.N. Kuritsin¹, S.G. Manishkin²,
P.A. Kuryntseva¹, S.Yu. Selivanovskaya¹

¹Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

²Mari State University, Yoshkar-Ola, Russian Federation

Abstract

Background. The use of chicken manure composting to mitigate livestock carbon footprint remains understudied, particularly regarding the balance between greenhouse gas emissions and long-term carbon stabilization in soil. This study accounted for both direct emissions and indirect emissions from transportation and energy-intensive operations. The findings enable process optimization considering environmental efficiency and climate goals.

The **purpose** of this study was to calculate the carbon footprint of compost produced through open windrow chicken manure composting at a model facility in central Russia.

Materials and methods. The study utilized floor-based chicken manure from “Atyashevo” poultry farm (Republic of Mari El). Composting was conducted in two windrows (24×3×1,1 m, 28 t raw material each) over 37 days, with continuous temperature and

moisture monitoring. Direct emissions (CO_2 , CH_4) were measured using a “PIA” gas chromatograph with a closed chamber method, while indirect emissions were calculated based on energy consumption and fuel costs following GHG Protocol. All measurements were performed in triplicate.

Results. The highest CO_2 emission intensity (up to $27,17 \text{ g C/m}^2\cdot\text{h}$) occurred during the initial phase due to rapid decomposition of labile organic matter, decreasing to $119,78 \text{ g C/m}^2\cdot\text{h}$ by the end. Total direct emissions reached $1,91 \text{ t CO}_2$. According to Russian Ministry of Natural Resources Method №371, CH_4 emissions were $5,6 \times 10^{-7} \text{ t}$ and N_2O emissions $3,4 \times 10^{-8} \text{ t}$, though these values were below instrument detection limits. Indirect emission analysis revealed that feedstock transportation ($0,024 \text{ t CO}_2$), windrow turner operation ($0,189 \text{ t CO}_2$), tractor use ($0,151 \text{ t CO}_2$), and granulation ($0,72 \text{ t CO}_2$) were major contributors.

Conclusion. Simplified calculation methods underestimated emissions by up to 63%: the compost carbon footprint was $0,044 \text{ t CO}_2/\text{t}$ when using simplified methods and $0,117 \text{ t CO}_2/\text{t}$ when accounting for indirect emissions.

Keywords: greenhouse gases; composting; greenhouse gas emissions; fuel; carbon footprint; chicken manure

For citation. Kamalova, A. R., Akhmetzyanova, L. G., Kuritsin, I. N., Manishkin, S. G., Kuryntseva, P. A., & Selivanovskaya, S. Yu. (2026). Assessment of the carbon footprint of chicken manure compost produced using windrow composting technology. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(1), 115–140. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-1-1369>

Введение

Глобальный сельскохозяйственный сектор все больше сталкивается с необходимостью смягчить свое воздействие на окружающую среду, особенно с точки зрения выбросов парниковых газов (ПГ). Животноводство, генерирующее значительные объемы органических отходов, включая навозы и пометы, вносит значительный вклад в сельскохозяйственные выбросы ПГ, который требует эффективного управления для минимизации его углеродного следа [28; 35].

Одним из методов переработки куриного помета в полезный продукт, не требующий высоких капитальных вложений, высокотехнологичного оборудования, является компостирование. Продуктом компостирования является компост, который может быть использован в качестве органического удобрения для повышения урожайности сельскохозяйственной продукции, увеличения разнообразия почвенного микробного сообщества и подавления почвенных фитопатогенов [3; 14; 34; 44]. В процессе

компостирования происходят два процесса - минерализация и синтез органических соединений. Наиболее эффективным с точки зрения снижения углеродного следа считается компостирование, в котором преобладают процессы деструкции сложных органических соединений до прекурсоров гуминовых и фульвокислот с последующим их синтезом [10; 31; 32]. Таким образом, компостирование не только способствует утилизации биомассы, но и позволяет сохранить углерод в стабильных формах, который в последствии будет внесен в почву.

Хотя процесс сопровождается эмиссией CO_2 , связанной с микробной деградацией органического вещества, сам компост как продукт обладает потенциалом для снижения углеродного следа за счет долгосрочного связывания углерода в почве. Птичий помет является богатым источником питательных веществ, таких как углерод и азот, которые могут оказать значительное влияние на общий углеродный след процесса компостирования [5; 41]. В неоптимальных условиях, таких как недостаточная аэрация или избыточная влажность, могут развиваться анаэробные зоны, что приводит к образованию CH_4 , парникового газа с потенциалом глобального потепления (ПГП) в 28-34 раза выше, чем у CO_2 в течение 100 лет [16]. Кроме того, микробная трансформация азотсодержащих соединений во время компостирования может привести к эмиссии N_2O , парникового газа с ПГП в 265-298 раз выше, чем у CO_2 [25; 34]. Эти выбросы в совокупности вносят вклад в углеродный след компостирования, а именно являются прямыми выбросами (сфера охвата 1 / Scope 1), за которые предприятия обязаны отчитываться и тщательно контролировать, чтобы соответствовать глобальным климатическим целям [9; 24; 45].

Углеродный след каждого процесса может варьироваться в зависимости от конкретных используемых методов и технологий [41]. Выбор метода компостирования – бурты, аэрируемые статические кучи, реакторы или вермикомпостирование – может значительно влиять на состав и объем выбросов. Например, валковое компостирование часто связано с более высокими выбросами CH_4 из-за менее последовательной аэрации, в то время как компостирование в аэрируемых кучах позволяет обеспечивать более эффективный контроль над уровнем кислорода и температурой, потенциально снижая выбросы парниковых газов [33].

Согласно законодательству Российской Федерации углеродный след определяется как «общий объем выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов, образующихся в ходе производства продукции либо в ходе оказания услуг, который включает в себя прямые выбросы парниковых газов (образуемые в результате осуществления хозяйственной

и иной деятельности), косвенные выбросы парниковых газов (связанные с потреблением электрической, тепловой энергии, иных ресурсов, используемых для обеспечения хозяйственной и иной деятельности и полученных от внешних объектов), поглощения парниковых газов в результате осуществления хозяйственной и иной деятельности, с учетом углеродных единиц, в отношении которых произведен зачет» [7].

Расчет углеродного следа учитывает различные факторы, включая потребление энергии, использование сырья, транспортировку и образование отходов на протяжении всего жизненного цикла продукта или услуги [42]. В этом контексте углеродный след компостирования куриного помета также зависит от множества факторов, таких как потребление энергии во время процесса компостирования, условия хранения и транспортировки самого помета, а также возможные выбросы парниковых газов из конечного продукта компоста [29]. Сам процесс компостирования вносит значительный вклад в выбросы парниковых газов, в первую очередь из-за разложения органического вещества, которое выделяет углекислый газ (CO_2), метан (CH_4) и закись азота (N_2O) [1; 29].

Перспективным направлением дальнейших исследований является изучение динамики углерода при внесении компоста в почву. Это позволит оценить, какая часть углерода стабилизируется в форме гумуса, а какая подвергается минерализации, и определить реальный вклад компостирования в секвестрацию углерода и устойчивое землепользование.

Целью настоящего исследования был расчет углеродного следа компоста, получаемого на модельном предприятии, располагающемся в средней полосе России, и осуществляющем технологию компостирования куриного помета в открытых буртах.

Материалы и методы

Компостирование производили на производственной площадке Медведевского р-на Республики Марий-Эл в закрытом неотапливаемом помещении (720 м²). В качестве сырья для компостирования использовали куриный помет напольного содержания с птицефабрики «Атяшево» Республики Марий Эл. Для осуществления процесса компостирования было заложено два одинаковых бурта длиной 24 м, высотой 1,1 м и шириной 3 м. Масса помета, сформированного в один бурт, составила 28 т. Общая продолжительность цикла компостирования составила 37 дней. На 1, 3, 7 сутки и далее каждые три дня бурты ворошили с помощью самоходного ворошителя Backhus 16.30. Исходная влажность подстилочного помета со-

ставляла 52,8% и поддерживалась на уровне 50–60%. К концу эксперимента влажность компоста составила 44,5%, потеря массы - 2,32 т. Измерения температуры проводились на глубине 0,6 м с помощью цифрового измерителя КС-300 (точность $\pm 1,0$ °C), влажности - измерителем влажности Moisture Analyzer типа «Эвлас-2М». Термофильная фаза (>50 °C) поддерживалась не менее 21 дня, в соответствии с рекомендациями по снижению патогенов и стабилизации органического вещества [23].

Расчет углеродного следа

Существует несколько способов определения углеродного следа, среди которых ключевым является анализ источников выбросов и их доли в общем объеме выбросов при осуществлении контроля. При этом источники выбросов принято делить на две основные категории: прямые и косвенные [19].

1. Прямые выбросы от процессов минерализации органического вещества

Прямые выбросы могут интерпретироваться как первичный углеродный след. В данном эксперименте источником прямых выбросов являются бурты компостирования. Концентрация углекислого газа (CO_2), а также метана (CH_4) в отходящем воздухе из компостных буртов была количественно определена методом закрытой камеры с использованием портативного газового хроматографа «ПИА» (240x160x90мм). Экспозиционную камеру (пластиковая полусфера объемом 22,3 см³) на время измерения устанавливали на поверхность бурта (боковая часть) открытым нижним основанием. Герметизация системы достигалась за счет закапывания основания камеры, а также закрепления на ней силиконовой трубки длиной до 50 см. Поток CO_2 и CH_4 из компоста определялся по скорости изменения концентрации этого газа внутри камеры после выхода хроматографа на рабочий режим. Время экспозиции составляло 4 минуты, после чего осуществляли серию замеров с интервалом 3 сек. Градуировка CO_2 и CH_4 осуществлялась по поверочной газовой смеси производства ООО «ПГС-Сервис», с содержанием CO_2 и CH_4 0,0519 об. и 0,00112 % об., соответственно. Аналогично измерялись пробы окружающего воздуха в рабочей зоне для учета фоновых концентраций парниковых газов. Измерения эмиссии CO_2 , CH_4 , N_2O проводились еженедельно на протяжении 37 дней.

2. Косвенные выбросы от потребления энергоресурсов

Согласно GHG протоколу и стандарту ГОСТ Р ИСО 14064-1-2021 для продукции определяются косвенные выбросы, относящиеся к сфере охвата 2 (Score 2) и сфере охвата 3 (Score 3) [2, 21]. В процессе производства компоста на модельном предприятии к косвенным выбросам относились:

1. Выбросы от использования электроэнергии на освещение, грануляцию и сушку - сфера охвата 2 (Score 2);

2. Выбросы от сжигания топлива при доставке сырья, работе ворошителя - сфера охвата 3 (Score3).

Косвенные выбросы были рассчитаны на основании данных предприятия по потреблению электроэнергии, списанию дизельного топлива согласно рекомендациям [6; 40].

Все измерения выполняли в трёхкратной повторности. Статистическую обработку данных проводили с использованием программы Microsoft Office Excel 2019 (США).-

Результаты и обсуждение

Компостирование – это биологический процесс конверсии органического вещества в продукт, обладающий удобрительными свойствами, который осуществляется микробным сообществом. При этом значительная часть углерода исходной органики выделяется в виде диоксида углерода (CO_2) за счет микробного дыхания в ходе аэробного разложения [15; 21].

1. Количественное определение прямых выбросов от процессов минерализации органического вещества

1.1 Количественное определение прямых выбросов от процессов минерализации органического вещества на основании экспериментальных данных.

Производственный цикл для получения компоста из куриного помета на модельном предприятии составляет 35-40 суток, процесс останавливается, когда температура компостного бурта снижается, а значит и замедляется микробное разложение органического субстрата. На основании экспериментальных данных эмиссии ПГ построена кумулятивная кривая (рис. 1).

В начальный период (28 декабря 2024 – 6 января 2025) наблюдается резкий рост респираторной активности с выделением углекислого газа, что характерно для активной фазы компостирования. Кумулятивная эмиссия CO_2 увеличилась с 2,48 до 27,17 г $\text{C}/\text{м}^2 \cdot \text{час}^{-1}$, что указывает на быстрое разложение легкодоступных органических соединений. Далее (6–14 января 2025) скорость выделения CO_2 оставалась высокой, но постепенно замедлялась: по прошествии десяти дней с начала эксперимента (к 14 января 2025) суммарная эмиссия достигла 60,43 г $\text{C}/\text{м}^2 \cdot \text{час}^{-1}$. В последующие дни (14–30 января 2025) процесс стабилизировался, прирост эмиссии снижался, что, вероятно, связано с истощением легкодоступного субстрата и переходом к более медленному разложению устойчивых фракций орга-

нического вещества. К концу эксперимента (30 января 2025) кумулятивная эмиссия CO_2 составила $119,78 \text{ г С/м}^2\cdot\text{час}^{-1}$.

Такая динамика является типичной для компостных смесей: существенное выделение CO_2 в активной фазе с последующим замедлением по мере стабилизации процесса [13; 33]. На основе полученных экспериментальных кумулятивной эмиссии, данных активной площади и массы буртов была определена эмиссия CO_2 за 37 суток процесса компостирования - $1,91 \text{ т CO}_2$.

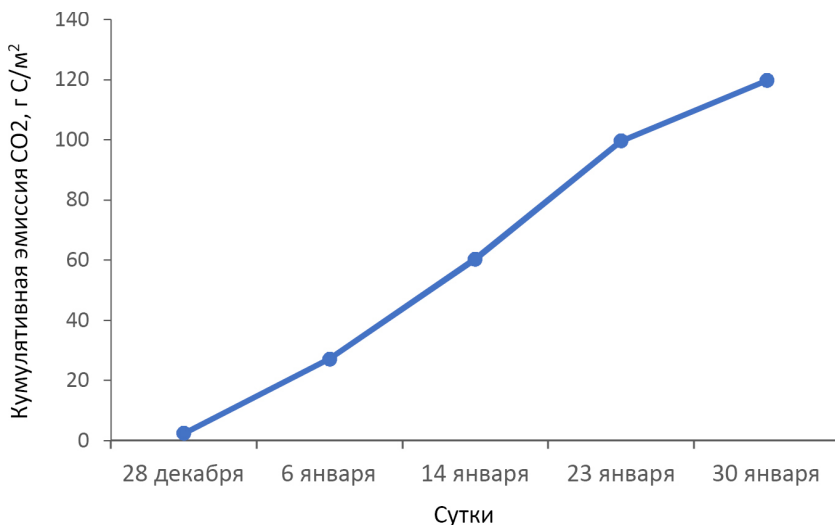


Рис. 1. Кумулятивная эмиссия CO_2 от компостных буртов за период компостирования

Fig. 1. Cumulative CO_2 emissions from compost piles during the composting period

1.2 Количественное определение объема прямых выбросов от процессов минерализации органического вещества расчетным методом

Основными парниковыми газами, которые способствуют глобальному потеплению, являются CH_4 и N_2O . Выброс этих газов зависит от технологии внесения отходов и, прежде всего, от управления процессом [12]. Экспериментальным методом содержание CH_4 и N_2O не были установлены, либо они имели значения сопоставимые с порогом чувствительности прибора (Приложение 1).

Анализ выбросов этих газов при биологической переработке отходов, полученных расчетным методом согласно Приказу Минприроды России

от 27.05.2022 N 371, выявил, что масса образующегося CH_4 составил $5,6 \times 10^{-7}\text{т}$, масса N_2O - $3,4 \times 10^{-8}\text{т}$ (табл. 1) [6]. Это связано с тем, что CH_4 преимущественно выделяется при анаэробном разложении органики [11], тогда как закись азота образуется в процессах нитрификации и денитрификации, интенсивность которых зависит от параметров аэрации и содержания азота в субстрате [15]. Режим ворошения в данном эксперименте был направлен на предотвращение формирования анаэробных зон в теле буртов.

Таблица 1.

Выбросы CH_4 и N_2O при биологической переработке отходов, полученные расчетным методом [6, 27]

Table 1. CH_4 and N_2O emissions from biological waste treatment, calculated using the method described in [6, 27]

Парниковый газ	Масса отходов, Гг	EF, г/кг	R, рекуперированный CH_4 , Гг	Выбросы при биологической переработке отходов, т
CH_4	0,056	10	$1,014 \times 10^{-9}$	$5,6 \times 10^{-7}$
N_2O	0,056	0,6	-	$3,4 \times 10^{-8}$

2. Расчет косвенных выбросов от потребления энергоресурсов

2.1 Расчет выбросов ПГ от сжигания дизельного топлива

Выбросы от сжигания топлива возникают не непосредственно в процессе его использования, а на других этапах жизненного цикла – от добычи и переработки сырья до транспортировки и утилизации отходов. Например, при добыче угля или нефти выделяется метан, а при их перевозке – парниковые газы от работы транспорта. Эти выбросы часто не учитываются в прямых отчётах, но их вклад в общий углеродный след может быть значительным, особенно для ископаемых видов топлива [22; 38]. В национальном стандарте ГОСТ Р ИСО 14064-1-2021, вступившем в действие 1 января 2022 г., выделено пять категорий источников косвенных выбросов ПГ: от импортированной энергии, от транспорта; от продукции, используемой организацией; выбросы ПГ, связанные с использованием продукции, выпускаемой организацией [4]. В России доля различных отраслей энергетики и транспорта в общем вкладе в выбросы ПГ составляет примерно 60%, что в основном является результатом сжигания органического топлива [28; 35; 44].

Использование топлива для сельскохозяйственной техники из-за интенсивной обработки почвы часто считается одним из главных источников выброса CO_2 . Когда дизельный двигатель сжигает 1 кг топлива, то в атмосферу выбрасывается 15-16 кг различных газов с температурой на выходе

из выхлопной трубы двигателя 150-300°C в зависимости от режимов работы двигателя. Состав этих газов зависит от характеристик применяемого топлива, режимов работы двигателя внутреннего сгорания, типа конструкции и состояния системы питания двигателя, конструкции и состояния системы управления двигателем, но всегда включает в себя токсичные вещества как монооксид углерода, оксиды азота, углеводороды и сажу [7].

На данном модельном предприятии осуществляются следующие операции, сопровождающиеся сжиганием дизельного топлива, а значит и выбросами ПГ:

1. Доставка куриного помета
2. Размещение
3. Компостирование

Таблица 2.

**Расчет эмиссии CO₂ от сжигания топлива автотранспортом
при разных технологических операциях**

Table 2. Calculation of CO₂ Emissions from Fuel Combustion in Motor Vehicles
During Various Operational Activities

Технологическая операция	ТС и единицы	Расход топлива, л/км	Расход топлива, л	Эмиссия CO ₂ от сжигания топлива, тCO ₂
Доставка куриного помета	КАМАЗ, л/км	0,292	8,76	0,024
Размещение	Трактор Беларус 82.1, л/ч	3,5	56,00	0,151
Компостирование	Ворошитель BACKHUS 16.30, л/ч	7	70	0,189
			Итого:	0,3639

В таблице 2 приведены данные о расчете эмиссии углекислого газа (CO₂) от сжигания топлива автотранспортом при различных технологических операциях, связанных с обработкой куриного помета. Наибольший вклад в эмиссию CO₂ вносит работа ворошителя Backhus 16.30, при эксплуатации которого выделяется 0,189 т CO₂, за счет высокого удельного расхода дизельного топлива (7 л/ч). Коэффициент выбросов CO₂ при сжигании дизельного топлива (летнее) составляет 2,7 кг CO₂-экв./л, что объясняет значительные выбросы при длительной работе оборудования [12; 20]. Существенный уровень эмиссии наблюдается также и при разме-

щении куриного помета с использованием трактора Беларус 82.1. В этом случае сжигание топлива приводит к выбросу 0,151 т CO_2 , что соответствует среднему расходу 5,5 л/ч (с учетом типичной нагрузки на двигатель и продолжительности операции). Наименьшие выбросы зафиксированы при транспортировке помета автомобилем КАМАЗ, где удельный расход топлива составляет всего 0,292 л/км. Благодаря высокой топливной эффективности и оптимизации логистических маршрутов, совокупная эмиссия CO_2 не превышает 0,024 т. Это согласуется с данными о том, что грузовые перевозки на средние дистанции при частичной загрузке могут демонстрировать относительно низкую углеродоемкость [37].

2.2 Расчет выбросов ПГ от потребления электроэнергии

Косвенные выбросы ПГ, связанные с использованием электроэнергии, представляют собой значительную часть общего углеродного следа организаций и домохозяйств. Эти выбросы формируются на этапе производства электрической энергии, используемой конечными потребителями, и классифицируются как выбросы второго уровня (Scope 2) в соответствии с международными стандартами, такими как Greenhouse Gas Protocol. Косвенные выбросы включают углекислый газ (CO_2), метан (CH_4) и закись азота (N_2O), выделяющиеся при сжигании топлива для производства электроэнергии. Их объем зависит от количества потребляемой энергии, источника энергии (уголь, газ, атомная энергия или возобновляемые ресурсы) и региональных коэффициентов выбросов энергосистемы. Для расчета косвенных выбросов используются различные методы. Региональный метод предполагает распределение выбросов между всеми потребителями в пределах расчетной зоны пропорционально их энергопотреблению. В рамках Greenhouse Gas Protocol применяются локационный и рыночный подходы [22]. Локационный метод основывается на среднем коэффициенте выбросов для региона, тогда как рыночный метод учитывает конкретные источники энергии, если они сертифицированы. Это позволяет более точно оценить воздействие на окружающую среду от использования электроэнергии.

Факторы, влияющие на величину косвенных выбросов, включают энергодоланс, технологии производства и региональные особенности. Выбросы зависят от доли ископаемого топлива в производстве электроэнергии. В России коэффициенты выбросов зависят от структуры энергосистемы в разных зонах и уровня использования ископаемого топлива.

На модельном предприятии электроэнергия используется в технологических операциях (сушка и грануляция готового продукта), а также поддержание функционирования производственных помещений (освещение).

Наибольший вклад в эмиссию CO₂ вносит гранулирование – на эту операцию приходится 0,72 т CO₂, что составляет 93% от общего объема выбросов (табл. 3). Столь высокая углеродоемкость обусловлена значительным энергопотреблением (1500 кВт·ч), что характерно для процессов механического прессования и термической обработки биомассы [30]. Согласно данным Международного энергетического агентства при среднем углеродоемкости электроэнергии в РФ 0,48 кг CO₂/кВт·ч (декабрь 2024 – февраль 2025) подобные энергозатратные процессы становятся ключевым источником парниковых газов в производственной цепочке [12; 17; 18].

Остальные технологические операции оказывают существенно меньшее влияние на углеродный след: сушка приводит к выбросу 0,031 т CO₂ при расходе 65 кВт·ч, что соответствует типичным значениям для конвективных сушильных установок малой мощности [36]. Освещение генерирует всего 0,022 т CO₂ (45 кВт·ч), что согласуется с современными оценками энергоэффективности LED-систем в промышленных помещениях [43].

Таблица 3.

Расчет эмиссии CO₂ при использовании электроэнергии для разных технологических операций

Table 3. Calculation of CO₂ Emissions from Electricity Use in Various Process Operations

Технологическая операция	Расход электроэнергии, кВт·ч	CO ₂ в кг	Эмиссия CO ₂ от сжигания топлива, тCO ₂
Сушка	65	31,2	0,031
Гранулирование	1500	720	0,72
Освещение	45	21,6	0,022
		Итого:	0,773

3. Сравнение данных экспериментального и расчетного определения выбросов ПГ при компостировании куриного помета

Сравнение двух подходов к расчету углеродного следа от компостирования выявил существенные расхождения в оценках эмиссии парниковых газов (табл. 4). Упрощенная методика [6], учитывающая лишь базовые выбросы от биологического разложения отходов (0,044 т CO₂), демонстрирует почти четырехкратное занижение показателей по сравнению с расширенным расчетом (0,117 т CO₂), включающим все значимые источники эмиссии CO₂. Согласно исследованиям IPCC [26], подобные расхождения характерны для многих биологических процессов переработки отходов, где косвенные выбросы (энергопотребление, работа техники) могут составлять до 75% от общего углеродного следа.

Основное различие между методиками заключается в учете дополнительных факторов эмиссии. Как показано в работах Boldrin et al. (2009), прямое окисление органики при аэробном компостировании способно генерировать до 1,2 т CO₂ на тонну перерабатываемых отходов. При этом энергозатратные операции (ворошение, аэрация, измельчение) с использованием дизельной техники и электрооборудования добавляют еще 0,9-1,5 т CO₂ в зависимости от технологических параметров [12].

Таблица 4.

**Расчет углеродного следа от компостирования по данным [6, 27]
и экспериментальным измерениям**

Table 4. Calculation of the carbon footprint of composting based
on data from [6, 27] and experimental measurements

Показатель	Углеродный след, т CO ₂ готового компоста
Компостирование (без учета прямых выбросов CO ₂ и энергозатрат)	0,044
Компостирование (с учетом прямых выбросов CO ₂ , сжигания топлива и использования электроэнергии)	0,117

Заключение

В исследовании проведено сравнение двух методов расчета углеродного следа компостирования: расчетного (на основании Приказ Минприроды России от 27.05.2022 N 371) и экспериментального. Установлено, что расчетный метод, учитывает эмиссию CO₂ и N₂O от компостирования, но не включает прямые выбросы CO₂ (1,137 т CO₂). Экспериментальная методика, основанная на данных газового хроматографа, учитывает не только прямые выбросы CO₂ от компостных буртов, но и косвенные - от сжигания топлива и потребления электроэнергии. Это позволило получить более полную оценку – 3,047 т CO₂, что значительно выше расчетного значения. Для достоверной оценки воздействия и разработки эффективных мер снижения эмиссии парниковых газов, рекомендуется применение комплексных методик учета, сочетающие инструментальные измерения и расчет косвенных выбросов.

Приложение 1

Дата	Наименование пробы	Количество выделенного газа, ppm		
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O
21.12.2024	1	57132,8	ND	ND
21.12.2024	1	56890,75	ND	ND

21.12.2024	1	57210,81	ND	ND
21.12.2024	2	59876,54	ND	ND
21.12.2024	2	58723,89	ND	ND
21.12.2024	2	60123,46	ND	ND
21.12.2024	3	4737,75	ND	ND
21.12.2024	3	4815,33	ND	ND
21.12.2024	3	4693,57	ND	ND
21.12.2024	4	86697,12	ND	ND
21.12.2024	4	85492,47	ND	ND
21.12.2024	4	98055,82	ND	ND
06.01.2025	1	111241,1	1,39	ND
06.01.2025	1	64281,08	1,65	ND
06.01.2025	1	84506,2	3,95	ND
06.01.2025	2	25657,22	2,96	ND
06.01.2025	2	25429,46	1,80	ND
06.01.2025	2	37051,86	ND	ND
06.01.2025	3	54206,3	ND	ND
06.01.2025	3	43044,85	ND	ND
06.01.2025	3	100429,5	ND	ND
06.01.2025	4	81223,43	ND	ND
06.01.2025	4	81240,64	ND	ND
06.01.2025	4	82162,01	ND	ND
14.01.2025	1	89962,87	ND	ND
14.01.2025	1	86366,63	ND	ND
14.01.2025	1	114309,7	ND	ND
14.01.2025	2	115205,7	ND	ND
14.01.2025	2	80888,85	ND	ND
14.01.2025	2	79227,98	ND	ND
14.01.2025	3	92016,19	ND	ND
14.01.2025	3	63182,33	ND	ND
14.01.2025	3	59800,3	ND	ND
14.01.2025	4	58604,53	ND	ND
14.01.2025	4	60328,02	ND	ND
14.01.2025	4	59742,52	ND	ND
23.01.2025	1	38065,33	ND	ND
23.01.2025	1	48511,22	ND	ND
23.01.2025	1	48913,71	ND	ND
23.01.2025	2	52176,99	1,57	ND

23.01.2025	2	56523,81	1,63	ND
23.01.2025	2	47925,86	1,87	ND
23.01.2025	3	59641,16	ND	ND
23.01.2025	3	44979,16	ND	ND
23.01.2025	3	45615,53	ND	ND
23.01.2025	4	37944,62	ND	ND
23.01.2025	4	45221,67	ND	ND
23.01.2025	4	50863,84	ND	ND
30.01.2025	1	29752,63	ND	ND
30.01.2025	1	32653,37	ND	ND
30.01.2025	1	46481,72	ND	ND
30.01.2025	2	21391,72	ND	ND
30.01.2025	2	47526,28	ND	ND
30.01.2025	2	42634,66	ND	ND
30.01.2025	3	34694,67	ND	ND
30.01.2025	3	38314,58	ND	ND
30.01.2025	3	33500,28	ND	ND
30.01.2025	4	31025,51	ND	ND
30.01.2025	4	31602,65	ND	ND
30.01.2025	4	28616,59	ND	ND

Список литературы

1. Брюханов, А. Ю., Романовская, А. А., Шалавина, Е. В., Васильев, Э. В., & Вертянкина, В. Ю. (2024). Влияние технологий переработки навоза и помета на эмиссии парниковых газов. *Engineering Technologies and Systems*, 34(4), 563–583. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.563-583>. EDN: <https://elibrary.ru/FXVRMF>
2. ГОСТ Р ИСО 14064-1-2021. Газы парниковые. Часть 1. Требования и руководство по количественному определению и отчетности о выбросах и поглощении парниковых газов на уровне организации. Москва: Стандартинформ, 2021. 23 с.
3. Семенов, М. В., Железова, А. Д., Ксенофонтова, Н. А., Иванова, Е. А., & Никитин, Д. А. (2023). Куриный помет как органическое удобрение: технологии компостирования и влияние на почвенные свойства (обзор). *Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева*, (115), 160–198. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-115-160-198>. EDN: <https://elibrary.ru/YTVVZW>
4. Морозова, И. А. (2022). Современные требования к учету косвенных выбросов парниковых газов организации. *Стандарты и качество*, (8), 22–27. EDN: <https://elibrary.ru/QVUWEF>

5. Потапов, М. А. (2024). Перспективы применения птичьего помета в виде органического удобрения в сельском хозяйстве. *Инновационная техника и технология*, 11(2), 34–38. EDN: <https://elibrary.ru/IXOZXD>
6. Приказ Минприроды России от 27.05.2022 № 371 «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов». Зарегистрировано в Минюсте России 29.07.2022 № 69451. 257 с.
7. Хафизов, Р. Н., Халиуллин, Ф. Х., Хафизов, К. А., Нурмиев, А. А., Синицкий, С. А., & Галлямов, Э. А. (2021). Пути снижения выброса в атмосферу диоксида углерода. *Вестник Казанского ГАУ*, 3(63), 38–42. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2021-38-42>. EDN: <https://elibrary.ru/DIBZCJ>
8. Федеральный закон от 02.07.2021 № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов». Получено 5 марта 2025 г. из <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107020031>
9. Andersen, J. K. (2010). Quantification of greenhouse gas emissions from windrow composting of garden waste. *Journal of Environmental Quality*, 39(2), 713–724. <https://doi.org/10.2134/jeq2009.0329>
10. Bera, R., Saha, S., Datta, A., Mukhopadhyay, K., Barik, A. K., Bhattacharya, P., Mallick, R., Ganguli, M., Narasimhan, V. L., & Quah, E. (2024). Review of different composting methods towards end product quality, cost of production, process adoptability potential, post soil application efficacy and GHG mitigation potential: Fundamental factors behind attending objectivities of any regenerative farming program. *Asian Journal of Environment & Ecology*, 23(12), 23–46. <https://doi.org/10.9734/ajee/2024/v23i12633>. EDN: <https://elibrary.ru/RBCPTR>
11. Bogner, J., Riitta, P., Seiji, H., Diaz, C., Mareckova, K., & Diaz, L. (2008). Mitigation of global greenhouse gas emissions from waste: Conclusions and strategies from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report. Working Group III (Mitigation). *Waste Management and Research*, 26, 11–32. <https://doi.org/10.1177/0734242X07088433>. EDN: <https://elibrary.ru/XWZZSA>
12. Boldrin, A., Andersen, J. K., Möller, J., Favoino, E., & Christensen, T. H. (2009). Composting and compost utilization: Accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management and Research*, 27(8), 800–812. <https://doi.org/10.1177/0734242X09345275>
13. Boudihi, E. H., Kifani, F. S., Wahby, I., & Tagne, M. S. (2022). Mathematical modeling and simulation of the stabilization of organic matter during the composting process. *Compost Science & Utilization*, 30, 62–73. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2023.2292568>. EDN: <https://elibrary.ru/HIZVWJ>
14. Chung, W. J., Chang, S. W., Chaudhary, D. K., Shin, J. D., & Kim, H. (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>
15. Davidson, E. A., Carvalho, C. J. R., Vieira, I. C. G., Figueiredo, R. D. O., Moutinho, P., & Yoko Ishida, F. O. (2004). Nitrogen and phosphorus limitation of biomass growth in a tropical secondary forest. *Ecological Applications*, 14(4), S160–S163. <https://doi.org/10.1890/01-6006>
16. de Richter, R., Ming, T., Davies, P., Wei, L., & Caillol, S. (2017). Removal of non-CO₂ greenhouse gases by large-scale atmospheric solar photocatalysis. *Progress in Energy and Combustion Science*, 60, 68–96. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2017.01.001>. EDN: <https://elibrary.ru/VCQYXY>
17. Electricity Data Explorer. (2024). Получено 6 марта 2025 г. из <https://ember-energy.org/data/electricity-data-explorer/>
18. International Energy Agency. (2023). *CO₂ Emissions in 2022*. 23 p.
19. The Carbon Trust. Footprinting and reporting. Получено 7 марта 2025 г. из <https://www.carbontrust.com/en-as/what-we-do/net-zero-transition-planning-and-delivery/footprinting-and-reporting>
20. Fruergaard, T. (2009). Energy use and recovery in waste management and implications for accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management and Research*, 27(8), 724–737. <https://doi.org/10.1177/0734242X09345276>
21. Garcia, C. (1991). Changes in carbon fractions during composting and maturation of organic wastes. *Environmental Management*, 15(3), 433–439. <https://doi.org/10.1007/BF02393889>. EDN: <https://elibrary.ru/HQSQVG>
22. World Resources Institute. *Greenhouse Gas Protocol*. Получено 7 марта 2025 г. из <https://ghgprotocol.org/>
23. Haug, R. T. (1993). *The Practical Handbook of Compost Engineering*. New York. 752 p.
24. Hellebrand, H. J. (1998). Emission of nitrous oxide and other trace gases during composting of grass and green waste. *Journal of Agricultural and Engineering Research*, 69(4), 365–375. <https://doi.org/10.1006/jaer.1997.0257>
25. International Energy Agency. (2024). *Methane and Climate Change*. Получено 6 марта 2025 г. из <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2022/methane-and-climate-change>
26. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate Change 2022 — Mitigation of Climate Change. Full Report*. Получено 6 марта 2025 г. из <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
27. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *Volume 5: Waste. Chapter 4: Biological Treatment of Solid Waste*. Получено 6 марта 2025 г. из https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V5_4_Ch4_Bio_Treat.pdf

28. Kabange, N. R., Kwon, Y., Lee, S.-M., Kang, J.-W., Cha, J.-K., & Park, H. (2023). Mitigating greenhouse gas emissions from crop production and management practices, and livestock: A review. *Sustainability*, 15(22). <https://doi.org/10.3390/su152215889>. EDN: <https://elibrary.ru/WMNJAY>
29. Kang, H.-Y., Lee, J. Y., Kim, G. Y., Hwang, Y. W., Park, K. H., & Lee, D. J. (2024). Analyzing the environmental impact of livestock manure recycling process using life cycle assessment. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 46(10), 582–591. <https://doi.org/10.4491/KSEE.2024.46.10.582>. EDN: <https://elibrary.ru/RSEAOF>
30. Kumar, D. (2020). Energy and exergy analysis of a natural convection dryer with and without sensible heat storage medium. *Journal of Energy Storage*, 29, 101481. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101481>. EDN: <https://elibrary.ru/IAPKKD>
31. Kusum, A. (2024). Composting: A sustainable approach to waste management. B *Futuristic Trends in Agriculture Engineering & Food Sciences: Book 8, Part 4, Chapter 1* (IIP Series) (Vol. 3, pp. 59–69). India. <https://doi.org/10.58532/V3BCAG8P4CH1>
32. Li, G., Li, X., Yang, Y., Hong, J., Huang, C., & He, D. (2024). Effects of a nanobio-film-covered echelon oxygen-controlled composting process on carbon and nitrogen conversion and emission reduction efficiency. *Environmental Technology and Innovation*, 35, 103669. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103669>. EDN: <https://elibrary.ru/NFOVCM>
33. Pennell, T., Comeau, L., MacKinley, K., Hann, S., Heung, B., & Kiely, B. (2024). Characterization of carbon dioxide emissions from late-stage windrow composting. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1453306>. EDN: <https://elibrary.ru/CVHSBW>
34. Min, H., Huang, X., Xu, D., Shao, Q., Li, Q., & Wang, H. (2022). Determining the effects of compost substitution on carbon sequestration, greenhouse gas emission, soil microbial community changes, and crop yield in a wheat field. *Life*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/life12091382>. EDN: <https://elibrary.ru/FCTOZS>
35. Mulrow, J., Machaj, K., Deanes, J., & Derrible, S. (2019). The state of carbon footprint calculators: An evaluation of calculator design and user interaction features. *Sustainable Production and Consumption*, 18, 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2018.12.001>
36. Mujumdar, A. S. (2014). *Handbook of Industrial Drying*. CRC Press. 1348 p. <https://doi.org/10.1201/b17208>
37. European Environment Agency. (n.d.). *Rail and waterborne — best for low-carbon motorized transport*. Получено 6 марта 2025 г. из <https://www.eea.europa.eu/publications/rail-and-waterborne-transport>
38. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Получено 7 марта

- 2025 г. из <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
39. Sánchez, A., Artola, A., Font, X., Gea, T., Barrena, R., Gabriel, D., & Sánchez-Monedero, M. (2015). Greenhouse gas emissions from organic waste composting. *Environmental Chemistry Letters*, 13(3), 223–238. <https://doi.org/10.1007/s10311-015-0507-5>. EDN: <https://elibrary.ru/UVWRQX>
 40. Schwarz, M. (2018). Carbon footprint of a university compost facility: Case study of Cornell Farm Services. *Compost Science and Utilization*, 26(2), 128–143. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2018.1438934>
 41. Seidavi, A. R. (2019). Present and potential impacts of waste from poultry production on the environment. *World's Poultry Science Journal*, 75(1), 29–42. <https://doi.org/10.1017/S0043933918000922>
 42. Stodt, F., Maisch, N., Ruf, P., Lechler, A., Riedel, O., & Reich, C. (2024). *Collaborative Smart Production Supply Chains with Blockchain Based Digital Product Passports*. Preprints. <https://doi.org/10.20944/preprints202402.1194.v1>
 43. Tsao, J. Y., Saunders, H. D., Creighton, J. R., Coltrin, M. E., & Simmons, J. A. (2010). Solid-state lighting: An energy-economics perspective. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43(35). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/35/354001>
 44. Wang, N., He, Y., Zhao, K., Lin, X., He, X., & Chen, A. (2024). Greenhouse gas emission characteristics and influencing factors of agricultural waste composting process: A review. *Journal of Environmental Management*, 354, 120337. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120337>. EDN: <https://elibrary.ru/NUCKBU>
 45. Zhu-Barker, X., Bailey, S. K., Paw, U. K. T., Burger, M., & Horwath, W. R. (2017). Greenhouse gas emissions from green waste composting windrow. *Waste Management*, 59, 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.004>

References

1. Bryukhanov, A. Yu., Romanovskaya, A. A., Shalavina, E. V., Vasiliev, E. V., & Verityankina, V. Yu. (2024). The impact of manure and litter processing technologies on greenhouse gas emissions. *Engineering Technologies and Systems*, 34(4), 563–583. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.563-583>. EDN: <https://elibrary.ru/FXVRMF>
2. GOST R ISO 14064-1-2021. *Greenhouse gases. Part 1. Requirements and guidance for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals at the organizational level*. Moscow: Standartinform. 23 p.
3. Semenov, M. V., Zhelezova, A. D., Ksenofontova, N. A., Ivanova, E. A., & Nikitin, D. A. (2023). Chicken manure as an organic fertilizer: Composting technologies and impact on soil properties (review). *Byulleten Pochvennogo instituta imeni V. V. Do-*

- kuchaeva*, (115), 160–198. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-115-160-198>. EDN: <https://elibrary.ru/YTVVZW>
4. Morozova, I. A. (2022). Modern requirements for accounting for indirect greenhouse gas emissions of an organization. *Standarty i kachestvo*, (8), 22–27. EDN: <https://elibrary.ru/QVUWEF>
 5. Potapov, M. A. (2024). Prospects for the use of poultry manure as an organic fertilizer in agriculture. *Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya*, 11(2), 34–38. EDN: <https://elibrary.ru/IXOZXD>
 6. Ministry of Natural Resources of Russia. (2022). *Order No. 371 dated May 27, 2022 "On approval of methods for quantitative determination of greenhouse gas emission and removal volumes"*. Registered with the Ministry of Justice of Russia on July 29, 2022, No. 69451. 257 p.
 7. Khafizov, R. N., Khaliullin, F. Kh., Khafizov, K. A., Nurmiev, A. A., Sinitskiy, S. A., & Gallyamov, E. A. (2021). Ways to reduce carbon dioxide emissions into the atmosphere. *Vestnik Kazanskogo GAU*, 3(63), 38–42. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2021-38-42>. EDN: <https://elibrary.ru/DIBZCJ>
 8. Federal Law No. 296-FZ dated July 2, 2021 "On limiting greenhouse gas emissions". Retrieved March 5, 2025, from <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107020031>
 9. Andersen, J. K. (2010). Quantification of greenhouse gas emissions from windrow composting of garden waste. *Journal of Environmental Quality*, 39(2), 713–724. <https://doi.org/10.2134/jeq2009.0329>
 10. Bera, R., Saha, S., Datta, A., Mukhopadhyay, K., Barik, A. K., Bhattacharya, P., Mallick, R., Ganguli, M., Narasimhan, V. L., & Quah, E. (2024). Review of different composting methods towards end product quality, cost of production, process adoptability potential, post soil application efficacy and GHG mitigation potential: Fundamental factors behind attending objectivities of any regenerative farming program. *Asian Journal of Environment & Ecology*, 23(12), 23–46. <https://doi.org/10.9734/ajee/2024/v23i12633>. EDN: <https://elibrary.ru/RBCPTR>
 11. Bogner, J., Riitta, P., Seiji, H., Diaz, C., Mareckova, K., & Diaz, L. (2008). Mitigation of global greenhouse gas emissions from waste: Conclusions and strategies from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report. Working Group III (Mitigation). *Waste Management and Research*, 26, 11–32. <https://doi.org/10.1177/0734242X07088433>. EDN: <https://elibrary.ru/XWZZSA>
 12. Boldrin, A., Andersen, J. K., Möller, J., Favoino, E., & Christensen, T. H. (2009). Composting and compost utilization: Accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management and Research*, 27(8), 800–812. <https://doi.org/10.1177/0734242X09345275>

13. Boudihi, E. H., Kifani, F. S., Wahby, I., & Tagne, M. S. (2022). Mathematical modeling and simulation of the stabilization of organic matter during the composting process. *Compost Science & Utilization*, 30, 62–73. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2023.2292568>. EDN: <https://elibrary.ru/HIZVWJ>
14. Chung, W. J., Chang, S. W., Chaudhary, D. K., Shin, J. D., & Kim, H. (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>
15. Davidson, E. A., Carvalho, C. J. R., Vieira, I. C. G., Figueiredo, R. D. O., Moutinho, P., & Yoko Ishida, F. O. (2004). Nitrogen and phosphorus limitation of biomass growth in a tropical secondary forest. *Ecological Applications*, 14(4), S160–S163. <https://doi.org/10.1890/01-6006>
16. de Richter, R., Ming, T., Davies, P., Wei, L., & Caillol, S. (2017). Removal of non-CO₂ greenhouse gases by large-scale atmospheric solar photocatalysis. *Progress in Energy and Combustion Science*, 60, 68–96. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2017.01.001>. EDN: <https://elibrary.ru/VCQYXY>
17. Electricity Data Explorer. (2024). Получено 6 марта 2025 г. из <https://ember-energy.org/data/electricity-data-explorer/>
18. International Energy Agency. (2023). *CO₂ Emissions in 2022*. 23 p.
19. The Carbon Trust. Footprinting and reporting. Получено 7 марта 2025 г. из <https://www.carbontrust.com/en-as/what-we-do/net-zero-transition-planning-and-delivery/footprinting-and-reporting>
20. Fruergaard, T. (2009). Energy use and recovery in waste management and implications for accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management and Research*, 27(8), 724–737. <https://doi.org/10.1177/0734242X09345276>
21. Garcia, C. (1991). Changes in carbon fractions during composting and maturation of organic wastes. *Environmental Management*, 15(3), 433–439. <https://doi.org/10.1007/BF02393889>. EDN: <https://elibrary.ru/HQSQVG>
22. World Resources Institute. *Greenhouse Gas Protocol*. Получено 7 марта 2025 г. из <https://ghgprotocol.org/>
23. Haug, R. T. (1993). *The Practical Handbook of Compost Engineering*. New York. 752 p.
24. Hellebrand, H. J. (1998). Emission of nitrous oxide and other trace gases during composting of grass and green waste. *Journal of Agricultural and Engineering Research*, 69(4), 365–375. <https://doi.org/10.1006/jaer.1997.0257>
25. International Energy Agency. (2024). *Methane and Climate Change*. Получено 6 марта 2025 г. из <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2022/methane-and-climate-change>

26. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate Change 2022 — Mitigation of Climate Change. Full Report*. Получено 6 марта 2025 г. из <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
27. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *Volume 5: Waste. Chapter 4: Biological Treatment of Solid Waste*. Получено 6 марта 2025 г. из https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V5_4_Ch4_Bio_Treat.pdf
28. Kabange, N. R., Kwon, Y., Lee, S.-M., Kang, J.-W., Cha, J.-K., & Park, H. (2023). Mitigating greenhouse gas emissions from crop production and management practices, and livestock: A review. *Sustainability*, 15(22). <https://doi.org/10.3390/su152215889>. EDN: <https://elibrary.ru/WMNJAY>
29. Kang, H.-Y., Lee, J. Y., Kim, G. Y., Hwang, Y. W., Park, K. H., & Lee, D. J. (2024). Analyzing the environmental impact of livestock manure recycling process using life cycle assessment. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 46(10), 582–591. <https://doi.org/10.4491/KSEE.2024.46.10.582>. EDN: <https://elibrary.ru/RSEAOF>
30. Kumar, D. (2020). Energy and exergy analysis of a natural convection dryer with and without sensible heat storage medium. *Journal of Energy Storage*, 29, 101481. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101481>. EDN: <https://elibrary.ru/IAPKKD>
31. Kusum, A. (2024). Composting: A sustainable approach to waste management. B *Futuristic Trends in Agriculture Engineering & Food Sciences: Book 8, Part 4, Chapter 1* (IIP Series) (Vol. 3, pp. 59–69). India. <https://doi.org/10.58532/V3BCAG8P4CH1>
32. Li, G., Li, X., Yang, Y., Hong, J., Huang, C., & He, D. (2024). Effects of a nanobio-film-covered echelon oxygen-controlled composting process on carbon and nitrogen conversion and emission reduction efficiency. *Environmental Technology and Innovation*, 35, 103669. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103669>. EDN: <https://elibrary.ru/NFOVCM>
33. Pennell, T., Comeau, L., MacKinley, K., Hann, S., Heung, B., & Kiely, B. (2024). Characterization of carbon dioxide emissions from late-stage windrow composting. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1453306>. EDN: <https://elibrary.ru/CVHSBW>
34. Min, H., Huang, X., Xu, D., Shao, Q., Li, Q., & Wang, H. (2022). Determining the effects of compost substitution on carbon sequestration, greenhouse gas emission, soil microbial community changes, and crop yield in a wheat field. *Life*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/life12091382>. EDN: <https://elibrary.ru/FCTOZS>
35. Mulrow, J., Machaj, K., Deanes, J., & Derrible, S. (2019). The state of carbon footprint calculators: An evaluation of calculator design and user interaction features. *Sustainable Production and Consumption*, 18, 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2018.12.001>
36. Mujumdar, A. S. (2014). *Handbook of Industrial Drying*. CRC Press. 1348 p. <https://doi.org/10.1201/b17208>

37. European Environment Agency. (n.d.). *Rail and waterborne — best for low-carbon motorized transport*. Получено 6 марта 2025 г. из <https://www.eea.europa.eu/publications/rail-and-waterborne-transport>
38. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Получено 7 марта 2025 г. из <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
39. Sánchez, A., Artola, A., Font, X., Gea, T., Barrena, R., Gabriel, D., & Sánchez-Monedero, M. (2015). Greenhouse gas emissions from organic waste composting. *Environmental Chemistry Letters*, 13(3), 223–238. <https://doi.org/10.1007/s10311-015-0507-5>. EDN: <https://elibrary.ru/UVWRQX>
40. Schwarz, M. (2018). Carbon footprint of a university compost facility: Case study of Cornell Farm Services. *Compost Science and Utilization*, 26(2), 128–143. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2018.1438934>
41. Seidavi, A. R. (2019). Present and potential impacts of waste from poultry production on the environment. *World's Poultry Science Journal*, 75(1), 29–42. <https://doi.org/10.1017/S0043933918000922>
42. Stodt, F., Maisch, N., Ruf, P., Lechler, A., Riedel, O., & Reich, C. (2024). *Collaborative Smart Production Supply Chains with Blockchain Based Digital Product Passports*. Preprints. <https://doi.org/10.20944/preprints202402.1194.v1>
43. Tsao, J. Y., Saunders, H. D., Creighton, J. R., Coltrin, M. E., & Simmons, J. A. (2010). Solid-state lighting: An energy-economics perspective. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43(35). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/35/354001>
44. Wang, N., He, Y., Zhao, K., Lin, X., He, X., & Chen, A. (2024). Greenhouse gas emission characteristics and influencing factors of agricultural waste composting process: A review. *Journal of Environmental Management*, 354, 120337. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120337>. EDN: <https://elibrary.ru/NUCKBU>
45. Zhu-Barker, X., Bailey, S. K., Paw, U. K. T., Burger, M., & Horwath, W. R. (2017). Greenhouse gas emissions from green waste composting windrow. *Waste Management*, 59, 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.004>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Камалова Алина Ринатовна, младший научный сотрудник учебно-научной лаборатории Центра агро- и экобиотехнологий, Институт экологии, биотехнологии и природопользования
Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, 18, г. Казань, Республика Татарстан, 420008, Российская Федерация
akhtjamovaalina07@gmail.com

Ахметзянова Лейсан Габбасовна, заведующий кафедрой прикладной экологии, к.б.н., Институт экологии, биотехнологии и природопользования
Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, 18, г. Казань, Республика Татарстан, 420008, РФ
leisan-ksu@mail.ru

Курицин Иван Николаевич, магистрант кафедры прикладной экологии, Институт экологии, биотехнологии и природопользования
Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, 18, г. Казань, Республика Татарстан, 420008, РФ
ivan-kuritsin@yandex.ru

Манишкин Сергей Геннадьевич, доцент кафедры общего земледелия, растениеводства, агрохимии и защиты растений, к.с.-х.н.
ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет»
пл. Ленина, 1, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, 424000, РФ
smanishkin@mail.ru

Курынцева Полина Александровна, старший научный сотрудник учебно-научной лаборатории Центра агро- и экобиотехнологий, к.б.н., Институт экологии, биотехнологии и природопользования
Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, 18, г. Казань, Республика Татарстан, 420008, РФ
polinazwerewa@yandex.ru

Селивановская Светлана Юрьевна, ведущий научный сотрудник учебно-научной лаборатории Центра агро- и экобиотехнологий, д.б.н., профессор, Институт экологии, биотехнологии и природопользования
Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, 18, г. Казань, Республика Татарстан, 420008, РФ
svetlana.selivanovskaya@kpfu.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Alina R. Kamalova, Researcher at the Educational and Scientific Laboratory, Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management
Kazan Federal University
18, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Republic of Tatarstan, Russian Federation
akhtjamovaalina07@gmail.com

SPIN-code: 2691-5682

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7857-8756>

ResearcherID: AAO-8646-2020

Scopus Author ID: 56539926700

Leysan G. Akhmetzyanova, Head of the Department of Applied Ecology, Ph.D. of Biological Sciences, Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management
Kazan Federal University

18, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Republic of Tatarstan, Russian Federation

leisan-ksu@mail.ru

SPIN-code: 1025-3736

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2464-8886>

ResearcherID: F-3849-2015

Scopus Author ID: 55530953200

Ivan N. Kuritsin, Master's student, Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management
Kazan Federal University

18, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Republic of Tatarstan, Russian Federation

ivan-kuritsin@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6028-3467>

ResearcherID: NGR-9978-2025

Sergey G. Manishkin, Associate Professor, Ph.D. of Agricultural Sciences
Mari State University

1, Lenin Sq., Yoshkar-Ola, Republic of Mari El, 424000, Russian Federation

smanishkin@mail.ru

SPIN-code: 8294-8485

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4668-7569>

ResearcherID: G-2699-2014

Scopus Author ID: 57214227143

Polina A. Kuryntseva, Senior Researcher, Ph.D. of Biological Sciences, Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management
Kazan Federal University

18, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Republic of Tatarstan, Russian Federation

polinazwerewa@yandex.ru

SPIN-code: 3916-9347

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9274-7077>

ResearcherID: M-3407-2016

Scopus Author ID: 56069925000

Svetlana Y. Selivanovskaya, Senior Scientist, Doctor of biological sciences, Professor,
Institute of Ecology, Biotechnology and Nature Management

Kazan Federal University

18, Kremlevskaya Str., Kazan, 420008, Republic of Tatarstan, 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 22.05.2025

После рецензирования 01.07.2025

Принята 06.08.2025

Received 22.05.2025

Revised 01.07.2025

Accepted 06.08.2025