



<https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.563-583>

EDN: <https://elibrary.ru/fxvrmf>

УДК 630*232.332.44:631.544.2

ISSN Print 2658-4123

ISSN Online 2658-6525

<http://vestnik.mrsu.ru>

Оригинальная статья / Original article



Влияние технологий переработки навоза и помета на эмиссии парниковых газов

А. Ю. Брюханов¹, А. А. Романовская², Е. В. Шалавина¹✉,
Э. В. Васильев¹, В. Ю. Вертянкина²

¹ *Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ*

(г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)

² *Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля*

(г. Москва, Российская Федерация)

✉ shalavinaev@mail.ru

Аннотация

Введение. Одним из значимых источников антропогенных выбросов является аграрный сектор. Корректный учет эмиссии парниковых газов в этом секторе зависит от применяемых технологий переработки навоза и помета. На сегодняшний день отмечается недостаток исследований по уточнению выбросов метана и закиси азота от существующих систем хранения навоза и помета ввиду разнообразия используемых соответствующих технологий, поэтому разработанный методический подход к расчетной оценке годовой эмиссии метана и закиси азота является актуальным.

Цель исследования. Определить влияние технологий переработки навоза и помета на годовые эмиссии метана и закиси азота.

Материалы и методы. Для определения эмиссии закиси азота и метана рассчитана масса получаемого навоза и помета, содержание в нем общего азота и углерода; проанализированы технологии переработки навоза: длительное выдерживание навоза/помета, пассивное компостирование, активное компостирование, биоферментация, сушка и грануляция, сжигание. Выполнен расчет для двух вариантов: 1) по данным Национального кадастра антропогенных выбросов с учетом доли навоза, перерабатываемой каждой технологией за 2022 г.; 2) по фактическим данным распределения технологий за 2022 г. Выполнена прогнозная оценка на период до 2030 г. Исследования выполнены на примере субъектов Северо-западного федерального округа РФ.

Результаты исследования. Проанализированы технологии содержания животных и птицы на трех типах предприятий: сельскохозяйственные организации, крестьянско-фермерские хозяйства, хозяйства населения. Рассчитана масса навоза и помета для каждого типа предприятий и проанализированы технологии переработки, определена доля навоза, перерабатываемая по каждой технологии. Рассчитаны эмиссии метана и закиси азота на примере Северо-западного федерального округа с пересчетом на CO₂ эквивалент для 2022 г.

Обсуждение и заключение. Определено влияние технологий сбора и хранения навоза на выбросы метана и закиси азота. Полученные значения превышают по метану на 35,6 % и закиси азота на 14,2 % значения, рассчитанные по методологии, используемой в Национальном кадастре, что говорит о целесообразности ее уточнения. Категорирование предприятий позволяет упростить расчет при оценках на уровне регионов и страны. Уточненные данные об используемых технологиях сбора

© Брюханов А. Ю., Романовская А. А., Шалавина Е. В., Васильев Э. В., Вертянкина В. Ю., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

и хранения навоза и присущих им эмиссиях позволят проводить прогнозные расчеты и определять возможные направления технико-технологической модернизации, направленной на снижение выбросов парниковых газов.

Ключевые слова: эмиссии парниковых газов, метан, закись азота, животноводство, технологии переработки навоза и помета, азот, углерод

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: определение количественных и качественных характеристик навоза и помета для трех типов хозяйств с учетом применяемых технологий выполнено с использованием баз данных ИАЭП – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. Коэффициенты *MS* и *MCF* уточнены в рамках Важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (соглашение 139-15-2023-004 от 01.03.2023 г.)

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за помощь в улучшении статьи.

Для цитирования: Влияние технологий переработки навоза и помета на эмиссии парниковых газов / А. Ю. Брюханов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 4. С. 563–583. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.563-583>

Effect of Animal and Poultry Manure Processing Technologies on Greenhouse Gas Emissions

A. Yu. Briukhanov^a, A. A. Romanovskaya^b, E. V. Shalavina^a✉,
E. V. Vasilev^a, V. Yu. Vertyankina^b

^a Institute for Engineering and Environmental Problems
in Agricultural Production – branch of FSAC VIM
(St. Petersburg, Russian Federation)

^b Institute of Global Climate and Ecology
named after Academician Yu.A. Israel
(Moscow, Russian Federation)

✉ shalavinaev@mail.ru

Abstract

Introduction. The agricultural sector is one of the most important sources of anthropogenic emissions. The correct accounting of greenhouse gas emissions in this sector depends on technologies used to process animal/poultry manure. To date, there is a lack of research to adjust the methane and nitrous oxide emissions from existing animal/poultry manure storages, because of the variety of technologies used. This is why the methodological approach developed to estimate the annual emissions of methane and nitrous oxide is so important.

Aim of the Study. The study is aimed at determining the impact of manure and litter processing technologies on annual emissions of methane and nitrous oxide.

Materials and Methods. To determine the emission of nitrous oxide and methane, there were calculated mass of animal/poultry manure and its total nitrogen and carbon content; there were analysed manure processing technologies such as long-term manure storing, passive and active composting, biofermentation, drying and granulation, incineration. There were performed calculations for two options: 1) according to the National Inventory of Anthropogenic Emissions, taking into account the share of manure processed with the use of each technology in 2022; 2) according to the actual data of technology distribution in 2022. The predictive estimate for the period up to 2030 was made for regions in the North-Western Federal District of the Russian Federation.

Results. The study analysed animal and poultry housing technologies at three types of enterprises: agricultural organizations, peasant (private) farms, and household farms.



There was calculated the animal/poultry manure mass generated at each type of enterprises and determined the share of manure processed with the use of each technology. Based on the data of the North-Western Federal District, there were calculated methane and nitrous oxide emissions in 2022 in CO₂-eq.

Discussion and Conclusions. There was estimated the effect of manure collection and storage technologies on methane and nitrous oxide emissions. The obtained data on emissions exceeded by 35.6% (methane) and 14.2% (nitrous oxide) those calculated by the methods used in National Inventory indicating their refinement expediency. Categorization of agricultural enterprises makes calculations simpler for regional and national assessments. The refined data on manure collection and storing technologies and the emissions specific for these technologies will help to perform prediction calculations and determine options for technological upgrading to mitigate GHG emissions.

Keywords: greenhouse gas emission, methane, nitrous oxide, livestock farming, animal/poultry manure processing technologies, nitrogen, carbon

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

Funding: The quantity and quality of animal/poultry manure for three types of farms with due account for applied technologies were determined using the databases developed by IEEP – branch of FSAC VIM. *MS* and *MCF* coefficients were refined within the framework of the Crucial Innovative Project of State Significance “Unified National System for Monitoring Climate-Active Substances” (Agreement 139-15-2023-004 dated 01.03.2023).

Acknowledgements: The authors express sincere thanks to anonymous reviewers for their time, effort, and valuable help in improving the manuscript.

For citation: Bryukhanov A.Yu., Romanovskaya A.A., Shalavina E.V., Vasilev E.V., Vertyankina V.Yu. Effect of Animal and Poultry Manure Processing Technologies on Greenhouse Gas Emissions. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(4):563–583. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.563-583>

Введение. Шестой оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) констатирует однозначно, что влияние человека на окружающую среду вызвало потепление атмосферы, океана и суши, наблюдаемое с середины XX в.¹ Российская Федерация является Стороной Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК ООН), Киотского протокола и Парижского соглашения. В соответствии со своими обязательствами по статьям 4 и 12 РКИК ООН Российская Федерация разрабатывает, периодически (в настоящее время, на основании решений Конференции Сторон РКИК ООН 18/СР.8 и 24/СР.19, ежегодно) обновляет, публикует и представляет Конференции Сторон РКИК ООН через ее секретариат – Национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями всех парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом (далее – Кадастр).

Распоряжением Правительства Российской Федерации от 1 марта 2006 г. № 278-р, принятым в Монреале 16 сентября 1987 г.², была создана российская система оценки антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями

¹ IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (H. Lee and J. Romero (eds.)). Geneva, Switzerland : IPCC. 2023. P. 1–34. URL: <https://hdl.handle.net/10568/138472> (дата обращения: 25.05.2024).

² О создании российской системы оценки антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом по веществам, разрушающим озоновый слой, принятым в г. Монреале 16 сентября 1987 г. [Электронный ресурс] : Распоряжение Правительства РФ от 1 марта 2006 г. № 278-р. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_69640/ (дата обращения: 18.03.2024).

парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом по веществам, разрушающим озоновый слой.

Одним из значимых источников антропогенных выбросов является аграрный сектор. 18 мая 2023 г. Российская Федерация представила в секретариат Рамочной конвенции ООН об изменении климата Национальный кадастр антропогенных выбросов за 1990–2021 гг. из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом. Согласно данным Кадастра, в 2021 г. суммарные выбросы парниковых газов от аграрного сектора Российской Федерации составили 121 млн т CO_2 -экв., что соответствует 51,6 % уровня 1990 г. (250 млн. т CO_2 -экв.). В 2021 г. вклад закиси азота в общие сельскохозяйственные выбросы был выше (60,0 %) вклада CH_4 – 39,2 %, вклад CO_2 составляет около 0,8 %³.

Отчетность по аграрному сектору в Кадастре включает в себя выбросы метана от внутренней ферментации животных, выбросы метана и закиси азота от систем переработки навоза и помета, выбросы метана и закиси азота от сельскохозяйственных почв. Эмиссии углекислого газа от животноводства не включаются в оценки Кадастра, учитывая, что цикл углерода в системе выращивания кормовых трав, их переваривания животными и последующего разложения в виде навоза (помета) принимается за ноль и не рассматривается в Кадастре и в данной работе. Нетто-баланс углекислого газа для сельскохозяйственных почв включен в отчетность в рамках другого сектора Кадастра – сектора Землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства. В нашей работе рассмотрены эмиссии таких парниковых газов, как метан и закись азота от различного сочетания технологий переработки навоза и помета для следующих категорий животных: крупный рогатый скот (КРС) (без коров), коровы, свиньи, птица. Эмиссии парниковых газов зависят также и от содержания в навозе и помете общего азота и углерода, которые различны в зависимости от систем содержания животных и систем сбора и хранения навоза и помета для трех рассмотренных типов предприятий: сельскохозяйственных организаций (СХО), крестьянско-фермерских хозяйств (КФХ) и хозяйств населения (ХН). Путем совершенствования технологий и модернизации производства возможно снижение общей эмиссии парниковых газов.

Учитывая большой объем обрабатываемой информации, планируется впоследствии разработать цифровой программный продукт, осуществляющий национальный мониторинг климатически активных веществ.

Целью исследования является определение для каждого региона влияния применяемых технологий переработки навоза и помета на эмиссии метана и закиси азота.

Обзор литературы. Исследователи из разных стран занимаются проблемой снижения эмиссии парниковых газов от систем переработки навоза и помета путем совершенствования технологий и модернизации производства, предусматривающих внедрение эффективных практик ведения сельского хозяйства [1; 2].

³ Национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2021 гг. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/press/news/32581/> (дата обращения: 18.03.2024).



Компостирование является одним из основных методов переработки навоза и помета [3; 4]. При этом технология может быть реализована в различных режимах, влияющих на эмиссии парниковых газов.

В Китае в 2023 г. проведены исследования по эмиссиям парниковых газов в зависимости от длительности процесса компостирования для четырех видов сырья: свиной навоз, навоз КРС, овечий навоз, куриный помет. Результаты исследования показали, что вне зависимости от типа сырья 90 % парниковых газов образуется в ранние (0–15 дней) и поздние (36–49 дней) периоды компостирования. Доля CO_2 составляла более 90 % в первые 35 дней, доля N_2O – 40...75 % в поздний период компостирования, а доля CH_4 – менее 8,0 %. Выбросы NH_3 из куриного помета и свиного навоза в 4,8 раза превышали выбросы из овечьего и коровьего навоза [5].

Корейскими учеными были проведены исследования по определению эмиссий от навоза КРС наиболее распространенной в Корее породы Hanwoo. В результате исследований установлено, что в период компостирования среднемесячные потоки выбросов CH_4 и N_2O варьировались от $1,449 \pm 0,783$ до $86,930 \pm 19,092$ и от $0,511 \pm 0,410$ до $2,629 \pm 1,105$ мкг/м^2 соответственно. Рассчитанные потоки выбросов CH_4 и N_2O от систем обращения с навозом в этом исследовании были выше значений, поданных странами Азии, Южной и Северной Америки в МГЭИК в 2006 г. [6], почти в 5,4 и 2,1 раза соответственно.

Эмиссиям парниковых газов в зависимости от уплотнения и влажности компостной смеси с навозом КРС в буртах на специализированных площадках посвящены исследования китайских ученых. Результаты показали, что интенсивность выбросов газов резко снизилась, когда содержание влаги увеличилось в навозе с высокой водоудерживающей способностью, в то время как обработки уплотнением не так сильно повлияли на интенсивность выбросов газов [7].

Также в Китае в 2020 г. проведен метаанализ выбросов парниковых газов и аммиака для четырех основных методов компостирования навоза КРС: статического, переворачивающего, валкового и силосного. В результате установлено, что компостирование с переворачиванием привело к большим потерям углерода и азота по сравнению с другими методами компостирования. Хотя компостирование в силосах значительно способствовало выбросу NH_3 , оно сократило потери парниковых газов на 82,84 % по сравнению с компостированием методом переворачивания [8]. Таким образом, выбор технологического режима переработки навоза и помета методом компостирования позволяет снизить эмиссии метана и закиси азота до 15 % по сравнению с традиционными видами переработки.

Существуют также исследования, посвященные изучению влияния других технологий на эмиссии метана и закиси азота, а также выявлению наиболее оптимальной из них с климатической, экологической и экономической точек зрения. Например, проведенное в 2023 г. в Дании исследование по оценке эмиссии парниковых газов при длительном выдерживании четырех видов сырья: исходного навоза КРС, жидкой фракции навоза КРС, дигестата после анаэробного сбраживания жидкой фракции навоза КРС, жидкой фракции, полученной из биофильтра для десульфурации биогаза, обогащенного серой и аммонием. Результаты исследования показали,

что анаэробное сбраживание и сепарация значительно сократили выбросы CH_4 во время хранения из-за уменьшения содержания разлагаемых органических веществ, доступных для метаногенов [9].

В 2021 г. египетские ученые провели исследования по извлечению питательных веществ из свежего жидкого навоза с помощью эрлифтного реактора для снижения выбросов парниковых газов в открытых анаэробных лагунах. Результаты показали возможное снижение эмиссий от анаэробных лагун на 51 % [10].

Германскими учеными в 2021 г. были проведены исследования по изучению четырех технологий переработки помета бройлеров: длительное выдерживание, компостирование, анаэробное сбраживание на биогазовой установке, производство биоугля. Исследования показали, что наибольшие выбросы были при технологии пассивного компостирования, наименьшие – при анаэробном сбраживании [11].

В Российской Федерации в 2008 г. выполнены оценки кумулятивных выбросов парниковых газов от животноводства, включая системы сбора и хранения навоза [12]. Результаты этих исследований впоследствии легли в основу национальной методологии оценки Кадастра. В 2023 г. в России проведены методические исследования по измерению эмиссии парниковых газов от систем хранения навоза КРС (жидкое и сухое хранение), свиного навоза и птичьего помета на территории РФ. Разработаны экспериментальные модельные установки для оценки эмиссии парниковых газов от таких систем⁴.

Помимо изменений самих технологий в мире, также проводятся исследования по сокращению эмиссии парниковых газов от систем переработки навоза в результате применения различных препаратов.

В США в 2021 г. проведены исследования по замеру эмиссий от навоза с пастбищ при выпасе бычков. Результаты показали, что применение инкапсулированного нитрата кальция и аммония не снижает выбросы парниковых газов из навоза [13]. В 2022 г. проведены исследования по снижению эмиссий метана и закиси азота от специализированных площадок переработки навоза откормочного поголовья КРС путем добавления в рацион питания специализированных добавок. Результаты исследования показали, что бромформ в дозе 8,6 г/кг корма снижает выбросы углекислого газа с площадок переработки навоза. Льняное масло в дозе 11 г/кг увеличило выбросы метана по сравнению с контролем, но ни одна концентрация льняного масла существенно не повлияла на средний поток углекислого газа или закиси азота из хранилищ навоза по сравнению с контролем [14].

В 2023 г. китайскими учеными проведены исследования по применению добавок в компостную смесь в процессе пассивного компостирования. В качестве исходного сырья использовался свиной навоз, в качестве добавки – бентонит. Исследования показали, что снижение выбросов CH_4 и N_2O примерно на 17 % и 29 % соответственно было достигнуто в присутствии бентонита (10 % от массы сухого вещества навоза) при компостировании [15].

⁴ Козлова Е. Н., Позднякова Е. А., Конькова А. С. Использование модельных установок для оценки эмиссии парниковых газов от систем хранения навоза // Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды: приземный климат, загрязняющие и климатически активные вещества : материалы III Всерос. науч. конф. (15 – 17 ноября 2023 г., г. Москва). М., 2023. С. 136–140. EDN: MGIQHL

Канадские ученые в 2020 г. исследовали влияние подкисления навоза КРС на снижение эмиссии парниковых газов. В результате подкисления выбросы метана сократились на 38 %, закиси азота – на 50 %, аммиака – на 23 %. Однако авторы отмечают высокую стоимость подкислителя, что может быть доступно не всем фермерам [16].

В США (Калифорния) в 2021 г. проведены исследования по снижению эмиссии парниковых газов за счет добавления перед сепарированием в жидкий навоз флокулянтов: сульфата железа, хлорида железа, хлорида полиалюминия, Superfloc C-569 и хитозана. Результаты исследования показали, что выбросы метана при использовании любого вида флокулянтов достоверно снижались [17].

В 2023 г. в Эфиопии проведены исследования по снижению эмиссии парниковых газов в процессе компостирования навоза за счет добавления различных наполнителей – соломы и биоугля. Результаты исследования показали, что добавление биоугля сократило выбросы CH_4 на 91 % и выбросы N_2O на 56–57 % [18].

Канадскими учеными также проведены исследования по оценке эмиссии парниковых газов при добавлении биоугля во время компостирования навоза жвачных животных. Кроме того, оценивали эффект от добавления биоугля в рацион жвачных животных. Исследования показали, что эффективное снижение эмиссии парниковых газов от навоза происходит при смешивании самого навоза с биоуглем в процессе компостирования, а не при добавлении биоугля в рацион питания животных [19].

Таким образом, использование препаратов позволяет снизить эмиссии метана и закиси азота до 50 %, что подтверждает перспективность использования различных добавок для сокращения эмиссий, в частности биоугля (за счет его доступности и относительной дешевизны).

Проведенный анализ литературных источников показал, что проблема снижения эмиссии парниковых газов актуальна во всем мире, а на эмиссии значительно влияют технологии переработки навоза и режимы их работы. При этом в Российской Федерации отмечается недостаток исследований по уточнению выбросов метана и закиси азота от существующих систем хранения навоза и помета с учетом используемого разнообразия соответствующих технологий. В данной работе представлен методический подход к расчетной оценке годовой эмиссии метана и закиси азота от систем сбора и хранения навоза и помета в России, который учитывает разнообразие соответствующих технологий, характеристики навоза и помета, категории хозяйств и применяемые в них технологии содержания животных и птицы.

Материалы и методы. Расчет выбросов CH_4 (Гг/год) в результате уборки, хранения и использования навоза/помета осуществлен в соответствии с Методическими рекомендациями по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации⁵ по формуле:

⁵ Об утверждении методических рекомендаций по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации [Электронный ресурс] : Распоряжение Минприроды России от 16 апреля 2015 № 15-р. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_256422/ (дата обращения: 18.03.2024).

$$CH_4 = \sum_{(T)} \frac{EF_{(T)} \cdot N_{(T)}}{10^6}, \quad (1)$$

где $EF_{(T)}$ – коэффициент выбросов метана для установленного поголовья скота/птицы, кг CH_4 на 1 голову в год; $N_{(T)}$ – количество голов скота и птицы вида/категории/подкатегории T в регионе.

Коэффициент выбросов CH_4 в результате сбора и хранения навоза и помета определяется по формуле:

$$EF_{(T)} = VS_{(T)} \cdot 365 \cdot B_{0(T)} \cdot 0,67 \cdot \sum_{S,k} \frac{MCF_{(S,k)}}{100} \cdot MS_{(T,S,k)}, \quad (2)$$

где $VS_{(T)}$ – суточное выделение летучего вещества для заданной категории T скота, кг сухого вещества на 1 голову; $B_{0(T)}$ – максимальная метанопродуцирующая способность для навоза скота (помета птицы) категории T , $m^3 CH_4$ на кг VS ; $0,67$ – плотность метана, kg/m^3 ; $MCF_{(S,k)}$ – коэффициенты преобразования метана для каждой системы S сбора и хранения навоза и помета по климатическому региону k , %; $MS_{(T,S,k)}$ – доля навоза (помета птицы) от T скота, которая обрабатывается с использованием определенной системы S сбора и хранения навоза и помета в климатическом регионе k , не имеет размерности.

Для расчета прямых выбросов $N_2O_{D(mm)}$ (кг N_2O /год) от систем сбора и хранения навоза и помета в регионе используется формула:

$$N_2O_{D(mm)} = (\sum_S (\sum_T (N_{(T)} \cdot Nex_{(T)} \cdot MS_{(T,S)})) \cdot EF_{3(S)}) \cdot \frac{44}{28}, \quad (3)$$

где $Nex_{(T)}$ – среднегодовое выделение азота на одну голову скота вида/категории/подкатегории T в регионе, кг N на 1 голову в год; $EF_{3(S)}$ – коэффициент выбросов для прямых выбросов $N_2O_{D(mm)}$ от систем сбора и хранения навоза и помета S в регионе, кг N_2O-N на кг N в системе S ; S – система сбора и хранения навоза и помета; $44/28$ – коэффициент пересчета азота в оксид азота.

Для расчета косвенных выбросов $N_2O_{G(mm)}$ (кг /год), связанных с улетучиванием азота в результате сбора и хранения навоза и помета, используется формула:

$$N_2O_{G(mm)} = (N_{\text{улет.-MMS}} \cdot EF_4) \cdot \frac{44}{28}, \quad (4)$$

где $N_{\text{улет.-MMS}}$ – количество азота, которое теряется из навоза через улетучивание NH_3 и NO_x , кг/год; EF_4 – коэффициент выбросов N_2O в результате осаждения азота из атмосферы на почву и водные поверхности, кг N_2O-N на кг улетучившихся $NH_3-N + NO_x-N$.

Потери азота через улетучивание определяются по формуле:

$$N_{\text{улет.-MMS}} = \sum_S \left[\sum_T \left[(N_{(T)} \cdot Nex_{(T)} \cdot MS_{(T,S)}) \cdot \left(\frac{F_{\text{раcтa3M6}}}{100} \right)_{(T,S)} \right] \right], \quad (5)$$

где $F_{\text{раcтa3M6}}$ – процентная доля азота в обработанных навозе скота и помете птицы категории/подкатегории T , которая улетучивается в виде NH_3 и NO_x в данной системе сбора и хранения навоза и помета S , %.



Технологии сбора, хранения и переработки навоза и помета определяют наиболее существенные параметры уравнений (1)–(5): $MCF_{(s,k)}$ и $MS_{(t,s)}$.

В Кадастре данные коэффициенты определены укрупненно, без детальной классификации технологий содержания животных и птицы в каждом типе рассматриваемых предприятий (СХО, КФХ, ХН), характеристик самого навоза и помета, а также систем сбора и хранения навоза и помета (далее – технологий переработки).

Чтобы понять, как расчет эмиссии зависит от технологий переработки через применяемые коэффициенты $MCF_{(s,k)}$ и $MS_{(t,s)}$, произведен расчет годовых эмиссий метана и закиси азота для двух вариантов: 1) по данным Кадастра с учетом доли навоза, перерабатываемого каждой технологией, и фактической массы навоза, рассчитанной на основании статистических данных за 2022 г.; 2) по фактическим данным распределения технологий с последующим определением доли перерабатываемого навоза в соответствии с каждой технологией и фактической массой навоза, рассчитанной на основании статистических данных за 2022 г. Кроме того, выполнены прогнозные оценки эмиссий по данным на период до 2030 г. (на основании программ развития сельскохозяйственной отрасли) с учетом распределения технологий и доли перерабатываемого навоза в соответствии с каждой технологией и прогнозной массой навоза⁶.

Реализация данного подхода требует сбора детальной информации о технологиях содержания животных/птицы и технологиях переработки навоза/помета, которую необходимо получать непосредственно у сельхозтоваропроизводителей.

⁶ Об утверждении государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия Архангельской области [Электронный ресурс] : Постановление правительства Архангельской области от 9 октября 2012 г. № 436-пп. URL: <https://office.dvinaland.ru/docs/pub/2c6f8bf08a5326550ffc98e6e0bb76c7/default/?&> (дата обращения: 23.04.2024); Об утверждении государственной программы Калининградской области «Сельское хозяйство и рыболовство» [Электронный ресурс] : Постановление правительства Калининградской области от 21 декабря 2021 г. № 841. URL: <https://clck.ru/3ELZd6> (дата обращения: 23.04.2024); О государственной программе «Развитие агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Вологодской области» [Электронный ресурс] : Постановление правительства Вологодской области от 26 августа 2019 г. № 791. URL: <https://clck.ru/3ELZNP> (дата обращения: 23.04.2024); Об утверждении государственной программы Республики Карелия «Развитие агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов» [Электронный ресурс] : Постановление правительства Республики Карелия от 20 января 2015 г. № 7-П. URL: <https://clck.ru/3EGM93> (дата обращения: 23.04.2024); Концепция развития промышленного и рыбохозяйственного комплексов Республики Коми на 2023–2028 годы [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/3EGMbc> (дата обращения: 23.04.2024); О государственной программе Ленинградской области «Развитие сельского хозяйства Ленинградской области» [Электронный ресурс] : Постановление правительства Ленинградской области от 29 декабря 2012 г. № 463. URL: <https://clck.ru/3EGMN9> (дата обращения: 23.04.2024); Об утверждении государственной программы Мурманской области «Рыбное и сельское хозяйство» [Электронный ресурс] : Постановление правительства Мурманской области от 11 ноября 2020 г. № 787-ПП. URL: <https://clck.ru/3EGMSK> (дата обращения: 12.05.2024); О государственной программе Новгородской области «Развитие сельского хозяйства в Новгородской области на 2019–2024 годы» [Электронный ресурс] : Постановление правительства Новгородской области от 18 июня 2019 г. № 222 (ред. от 29 января 2021 г.). URL: <https://clck.ru/3EGMXz> (дата обращения: 23.04.2024); Об утверждении государственной программы Псковской области «Комплексное развитие сельских территорий» [Электронный ресурс] : Постановление администрации Псковской области от 19 декабря 2019 г. № 445. URL: https://cx.pskov.ru/sites/default/files/gp_po_krst_mart_2021.doc (дата обращения: 18.03.2024); Об утверждении государственной программы Ненецкого автономного округа «Развитие сельского хозяйства и регулирование рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия в Ненецком автономном округе» [Электронный ресурс] : Постановление администрации Ненецкого автономного округа от 22 октября 2014 г. № 405-п. URL: <https://clck.ru/3EGMbH> (дата обращения: 18.03.2024).

Учитывая заделы ИАЭП – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ по научным исследованиям в Северо-западном федеральном округе (СЗФО) и накопленную большую базу данных, дальнейший расчет выполнен на примере СЗФО.

При расчете эмиссии закиси азота и метана использованы следующие значения для коэффициента $MS_{(T, S)}$:

- 1) для варианта 1 – на основе данных Кадастра (таблицы 5.11 и 5.12)⁷;
- 2) для варианта 2 (базового) – на основе данных изучения животноводческих и птицеводческих комплексов в 2022 г.;
- 3) для прогнозных оценок – на основе данных, полученных с учетом региональных программ развития до 2030 г. для каждого субъекта СЗФО.

При расчете эмиссии метана использованы следующие значения коэффициента $MCF_{(S, k)}$:

- 1) для варианта 1 использован коэффициент MCF из таблицы 10.17 методических рекомендаций МГЭИК 2006 г.⁸;
- 2) для варианта 2 (базового) и прогнозных оценок рассчитан средневзвешенный коэффициент $MCF_{(S, k)}$ на основе значений коэффициента $MS_{(T, S)}$, которые были получены в результате проведенного анализа (см. выше).

Для определения эмиссии закиси азота и метана рассчитана масса получаемого навоза и помета (кг/год), содержание в нем общего азота и углерода (%), проанализированы технологии переработки навоза и помета для трех типов предприятий с учетом применяемых технологий содержания животных. По поголовью данные взяты с сайта Федеральной службы государственной статистики⁹. Расчет массы навоза/помета и содержание в нем общего азота и углерода проведен в соответствии с РД-АПК 1.10.15.02-17^{*10} для трех категорий животных (КРС, свиньи, птица) и для трех типов предприятий (СХО, КФХ, ХН).

К 2030 г. в молочном животноводстве в связи с общей тенденцией перехода на беспривязное содержание животных и получением полужидкого и жидкого навоза¹¹ средневзвешенные значения коэффициента преобразования метана увеличатся от 2 до 6 %. В свиноводстве и птицеводстве, учитывая требования экологического законодательства и соответствующее увеличение доли технологии «Длительное выдерживание твердого навоза/помета», ожидается уменьшение средневзвешенного значения коэффициента преобразования метана.

Масса навоза/помета определялась как сумма экскрементов, подстилочного материала и технологической воды. Масса общего азота и углерода в навозе/помете определялась как сумма азота и углерода в экскрементах и в подстилочном материале.

⁷ Национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2021 гг.

⁸ Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов : в 5 т. МГЭИК, 2006. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/index.html> (дата обращения: 18.03.2024).

⁹ Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 18.03.2024).

¹⁰ РД-АПК 1.10.15.02-17*. Методические рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/3F4pxf> (дата обращения: 18.03.2024).

¹¹ Технологическое проектирование молочных ферм КРС / В. Е. Хазанов [и др.] : моногр. СПб, 2023. 117 с. EDN: YHIZPT

В расчете использовались нормативные значения для СХО и ХН по массе экскрементов¹², технологической воды и подстилочного материала¹³; влажности экскрементов и подстилочного материала; содержанию в экскрементах общего азота и зольности; содержанию в подстилочном материале общего азота и углерода. Расчет содержания углерода в экскрементах произведен через зольность¹⁴.

В расчеты заложено, что свиньи в СХО содержатся на частично-целевых полах без применения подстилочного материала¹⁵; свиньи в ХН содержатся на монолитных полах на подстилке; птица в СХО выпаса не подлежит¹⁶.

Учитывая, что для обеспечения бесперебойной работы системы удаления свиного навоза в сельскохозяйственных организациях минимальная влажность навоза должна быть 92 %, в расчетах учтена минимальная масса технологической воды, равная 2 кг на 1 голову в сутки.

Были проанализированы технологии переработки навоза и помета в СЗФО. Расчет сделан для категорий животных, содержащихся во всех трех типах хозяйств: КРС, свиньи, птица.

Расчетную массу навоза/помета в СЗФО перераспределили между технологиями переработки, применяемыми в регионах на основании значений, полученных в результате расчетов коэффициентов $MS_{(T,S)}$. Для возможности сравнения этих данных с материалами, отраженными в Кадастре, все технологии разделили по типу перерабатываемого навоза/помета: твердый и жидкий. Рассмотренные технологии: длительное выдерживание твердого или жидкого навоза/помета, пассивное компостирование, активное компостирование, биоферментация, сушка и грануляция, сжигание.

Полученные данные обработаны методами математической статистики в программе Excel.

Результаты исследования. На первом этапе, после анализа результатов расчетов, установлено, что в СЗФО на всех типах хозяйств в 2022 г. образовалось: 12,8 млн т навоза КРС, в которых содержится 42,8 тыс. т азота и 719,8 тыс. т углерода; 6,9 млн т свиного навоза, в которых содержится 19,7 тыс. т азота и 32,5 тыс. т углерода; 2,1 млн т куриного помета, в которых содержится 32,5 тыс. т азота и 457 тыс. т углерода.

¹² РД-АПК 1.10.15.02-17*. Методические рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета.

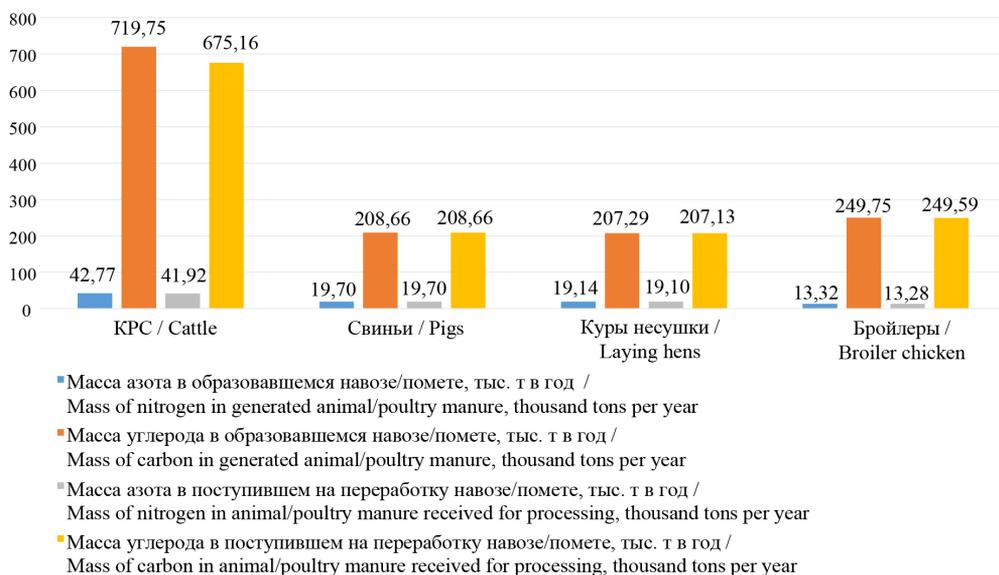
¹³ РД-АПК 1.10.01.01-18. Методические рекомендации по технологическому проектированию ферм и комплексов крупного рогатого скота [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/3EGPtm> (дата обращения: 18.03.2024).

¹⁴ ГОСТ 27980-88. Удобрения органические. Методы определения органического вещества. М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1989. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/11598/> (дата обращения: 18.03.2024).

¹⁵ Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 41-2023 «Интенсивное разведение свиней». М. : Бюро НДТ, Росстандарт, 2023. 340 с. URL: <https://clck.ru/3EGRPc> (дата обращения: 18.03.2024).

¹⁶ Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 42-2023 «Интенсивное разведение сельскохозяйственной птицы». М. : Бюро НДТ, Росстандарт, 2023. 188 с. URL: <https://clck.ru/3EGa5F> (дата обращения: 18.03.2024).

В соответствии с Кадастром определен процент выпаса сельскохозяйственных животных и птицы. Была скорректирована масса навоза и помета, а также масса азота и углерода в нем, поступающая на переработку (рис. 1).



Р и с. 1. Масса азота и углерода в навозе и помете, полученном в СЗФО в 2022 г.

F i g. 1. Mass of nitrogen and carbon in animal/poultry manure generated in North-Western Federal District in 2022

Источник: рисунки 1, 2 получены авторами статьи расчетным путем на основании статистических данных.

Source: figures 1, 2 were made by the authors of the article by calculation on the basis of statistical data.

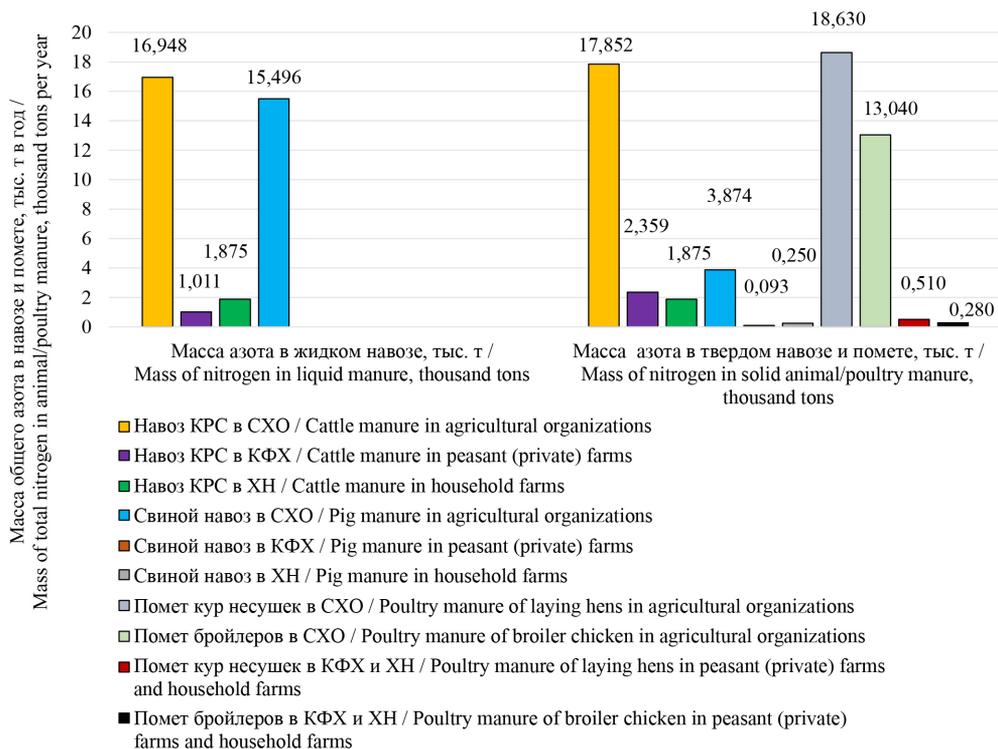
При проведении обследования предприятий КРС выявлено, что всего в СХО за год поступает на переработку 5,19 млн т твердого навоза и 5,45 млн т жидкого навоза; в КФХ и ХН суммарно – 1,14 млн т твердого навоза и 0,77 млн т жидкого навоза.

Анализ свиноводческих предприятий показал, что в СХО ежегодно поступает на переработку 1,36 млн т твердого навоза и 5,43 млн т жидкого навоза; в КФХ и ХН – 0,08 млн т твердого навоза.

Распределение массы азота в навозе и помете по типам хозяйств в СЗФО представлено на рисунке 2.

По нашим расчетам в СЗФО во всех типах хозяйств и от всех групп животных поступает на переработку 94 тыс. т азота: 35,33 тыс. т в жидком навозе и 58,67 тыс. т в твердом навозе и помете.

На рисунке 3 представлен результат расчета коэффициента $MS_{(T,S)}$ для СЗФО в зависимости от типов предприятий и влажности получаемого на предприятиях навоза/помета [20]. Цифры соответствуют распределению технологий переработки навоза/помета (составляющая коэффициента $MS_{(T,S)}$ для варианта 2).



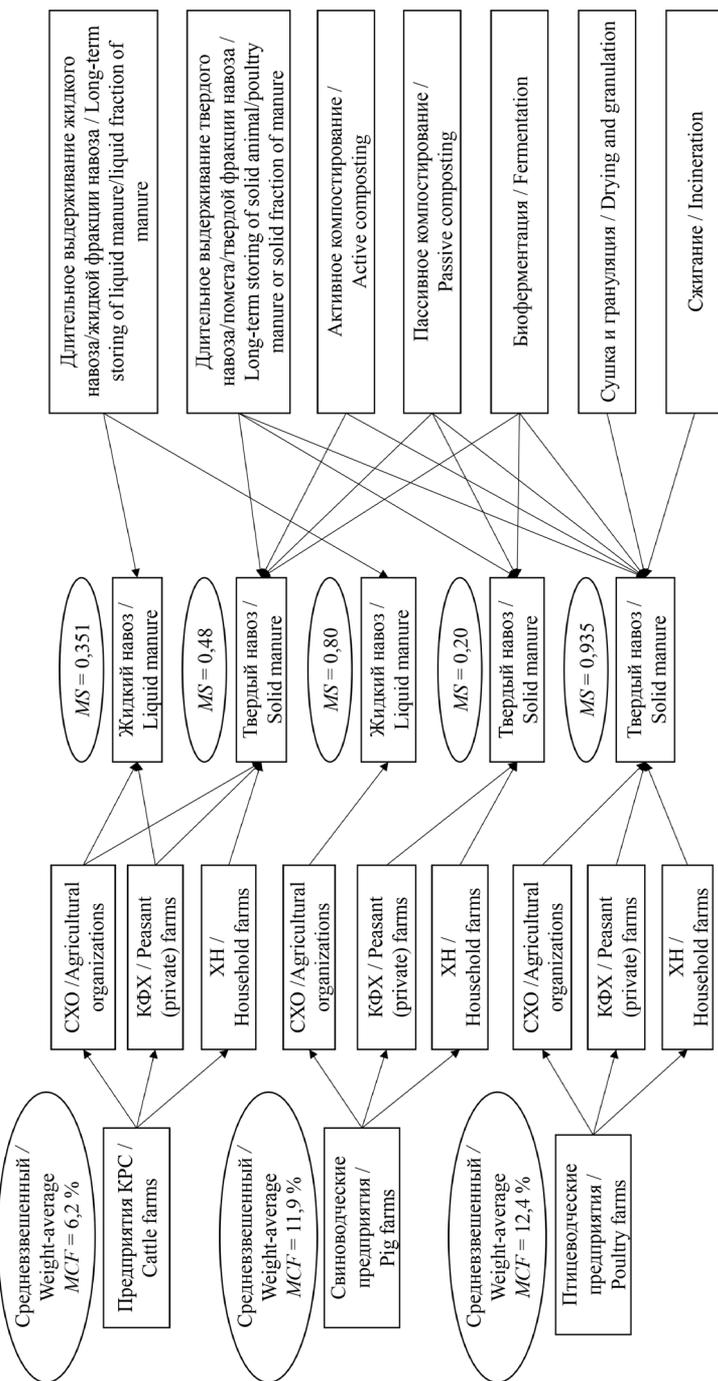
Р и с. 2. Масса общего азота в поступающем на переработку навозе и помете в различных типах хозяйств

Fig. 2. Mass of total nitrogen in animal/poultry manure delivered for processing in various farm types

Из рисунка 3 видно, что технология переработки навоза и помета выбирается в зависимости от влажности на каждом типе предприятий. Каждой технологии соответствует свой коэффициент эмиссии, который влияет на получаемые значения выбросов парниковых газов.

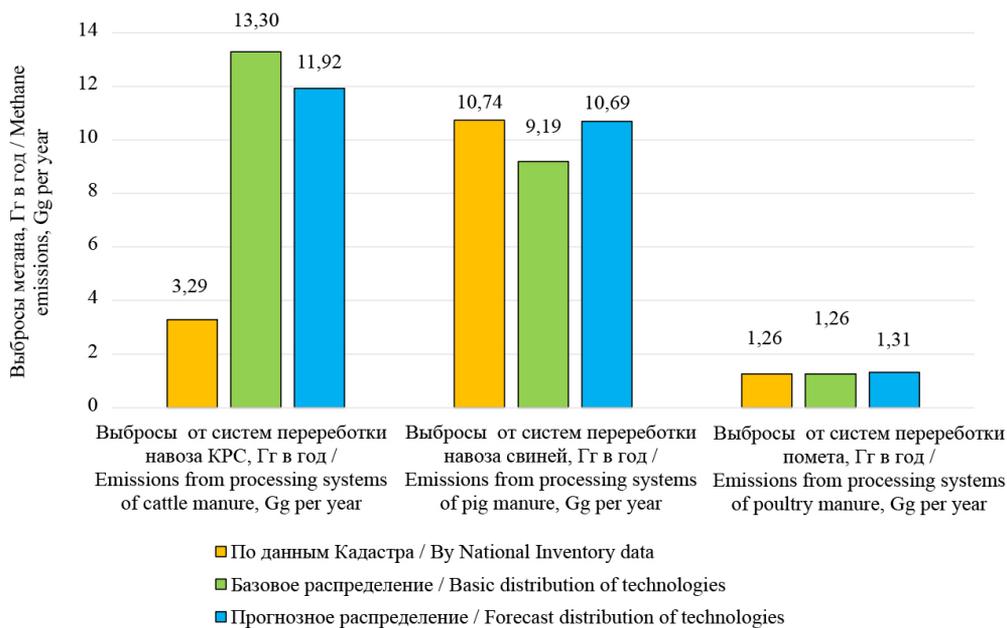
На рисунках 4, 5 представлен пример результата расчета эмиссии метана и закиси азота для СЗФО на основе полученных коэффициентов распределения технологий переработки и средневзвешенных значений коэффициентов преобразования метана для двух вариантов расчета для 2022 г. (по данным Кадастра и базовому распределению технологий) и прогнозные оценки на 2030 г.

В результате расчетов для СЗФО установлено, что эмиссии метана и закиси азота в пересчете на CO_2 эквивалент составили: по данным Кадастра 382,3 и 193,4 тыс. т (Гг) в год соответственно; по базовому распределению технологий 594 и 225,4 тыс. т (Гг) в год соответственно; по прогнозному распределению технологий 598,1 и 249,6 тыс. т (Гг) в год соответственно. Полученные значения говорят о том, что расчетные эмиссии при уточненном распределении технологий переработки навоза и помета увеличиваются на 35,6 % и 14,2 % для метана и закиси азота соответственно, по сравнению с укрупненным распределением, применяемым в Кадастре.

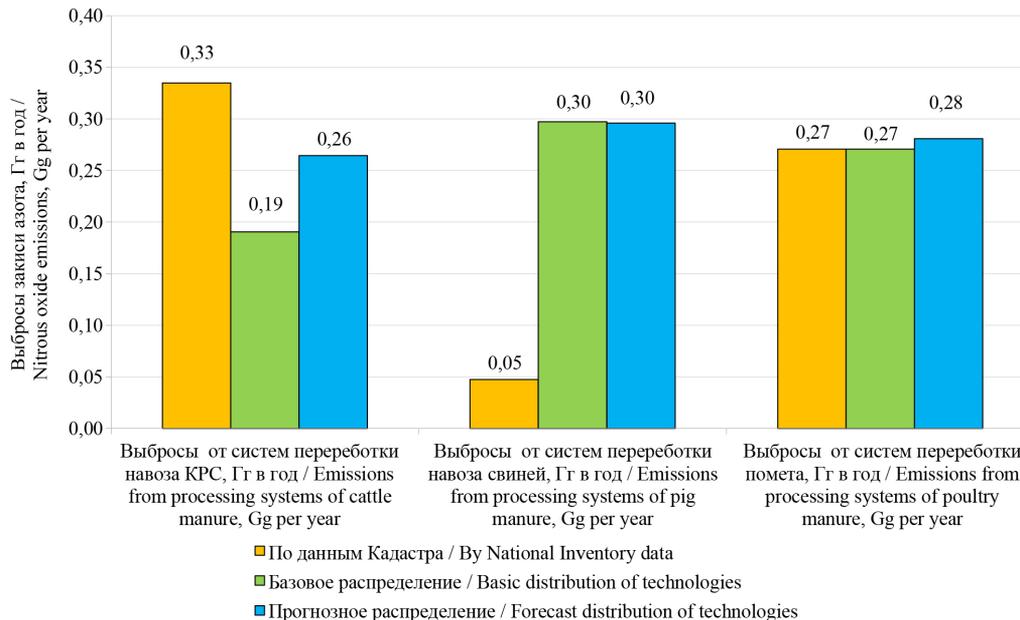


Р и с. 3. Результат расчета коэффициента $MS_{(t,s)}$ для варианта 2 для СЗФО
 Fig. 3. Calculation result of $MS_{(t,s)}$ coefficient for Version 2 for North-Western Federal District

Источники: здесь и далее рисунки получены авторами статьи расчетным путем на основании натурного обследования предприятий, статистических и литературных данных.
 Source: hereinafter in this article the figures are made by the authors of the article by calculation on the basis of field survey of enterprises, statistical and literary data.



Р и с. 4. Выбросы метана в СЗФО
F i g. 4. Methane emissions in North-Western Federal District



Р и с. 5. Выбросы закиси азота в СЗФО
F i g. 5. Nitrous oxide emissions in North-Western Federal District

Основными факторами, способными оказывать влияние на отклонения полученных оценок эмиссий парниковых газов для СЗФО от значений, отраженных в Кадастре, являются:

1) отличие в типах получаемого навоза, отраженных в Кадастре, и получаемых на животноводческих предприятиях в СЗФО. Наибольшее отличие наблюдается у молочного животноводства. В Кадастре указано, что для коров применяются только системы сухого хранения, которые подразумевают получение на предприятиях твердого навоза. В СЗФО, как и многих других регионах, более 50 % ферм используют беспривязный способ содержания животных. На таких фермах образуется преимущественно полужидкий навоз;

2) отличие в технологиях переработки навоза, отраженных в Кадастре, и применяемых в СЗФО. Наибольшее отличие наблюдается у предприятий крупного рогатого скота. В Кадастре указано, что для коров применяется система пастбищного содержания – 16,9 %, а для КРС (без коров) – 26 %. Обследование предприятий КРС в СЗФО показало, что животные содержатся в основном на круглогодичном стойловом содержании. Следовательно, увеличивается масса перерабатываемого навоза.

Учитывая значительные отклонения полученных оценок эмиссий парниковых газов от значений, отраженных в Кадастре, целесообразно оценить другие регионы Российской Федерации по разработанной нами методике. Для этого необходимо организовать работу по сбору исходных данных по субъектам РФ.

Обсуждение и заключение. За счет того, что в большинстве случаев в КФХ и ХН животные содержатся на глубокой подстилке, весь твердый навоз из помещений содержания животных удаляют механизированными средствами или вручную. В сельскохозяйственных организациях во всех регионах процент жидкого навоза больше 80 %, удаление его осуществляется соответствующими механизмами, оснащенными насосами различных типов.

В результате обследований животноводческих и птицеводческих комплексов установлено, что список применяемых технологий больше, чем указанный в Кадастре. С учетом того, что каждой технологии переработки соответствует свой коэффициент эмиссии, расчетные значения значительно отличаются от указанных в Кадастре.

В частности, по комплексам КРС в Кадастре указано, что весь навоз от коров (за исключением навоза, оставленного на пастбищах) является твердым ($MS_{(T,S)} = 0,831$). Соответственно, для расчета применяются коэффициенты, характеризующие технологии работы с твердым навозом ($MCF_{(S,k)} = 4\%$, $EF_3 = 0,01$ кг N_2O-N /кг выделенного N). Однако обследования комплексов КРС показали, что с учетом интенсификации отрасли молочного животноводства образуются также значительные объемы стоков с доильных залов, что приводит к образованию жидкого навоза. Следовательно, при расчете для соответствующей доли навоза КРС необходимо использовать коэффициент, характеризующий жидкий навоз ($MCF_{(S,k)} = 17\%$, $EF_3 = 0,005$ кг N_2O-N /кг выделенного N).

В связи с продолжающейся интенсификацией отрасли свиноводства и переходом на бесподстилочное содержание свиней, доля технологии длительного выдерживания навоза будет увеличиваться при снижении доли технологии пассивного компостирования.



В свиноводстве и птицеводстве с учетом изменения экологического законодательства технология хранения навалом будет замещаться технологиями длительного выдерживания или пассивного компостирования на специализированных площадках.

Исследование показало, что с учетом результатов изучения используемых систем содержания животных и птицы, а также применяемых технологий сбора и хранения навоза, эмиссии метана и закиси азота превышают на 35,6 % и 14,2 % соответственно значения из Кадастра.

Выполненные прогнозные оценки эмиссий парниковых газов от систем сбора и хранения навоза показали, что к 2030 г. в СЗФО ожидается рост эмиссий метана от систем переработки навоза свиней на 16,3 % и эмиссии закиси азота от систем переработки навоза КРС (коровы и КРС без коров) на 38,6 %, по сравнению с уровнем 2022 г. При этом возможно сокращение выбросов метана от навоза КРС и навоза коров на 16,3 % и 5,3 % соответственно. В целом ожидается, что суммарные эмиссии метана вырастут на 0,7 %, а эмиссии закиси азота – на 10,8 %. Следовательно, необходимо планирование мер по сокращению выбросов от животноводства на период до 2030 г. для выполнения целей утвержденной Стратегии долгосрочного развития Российской Федерации с низким уровнем выброса парниковых газов.

Для разработки таких мер необходима дезагрегированная оценка выбросов парниковых газов, позволяющая учитывать все разнообразие применяемых технологий переработки навоза и помета в части распределения (составляющая коэффициента $MS_{(T,S)}$) и соотнесение соответствующих коэффициентов эмиссии ($MCF_{(S,k)}$ и EF_3) с каждой технологией. Это позволит повысить точность и качество данных Кадастра и, соответственно, уточнить результаты расчетов выбросов парниковых газов от животноводства.

Учитывая существенные отклонения, целесообразно рассмотреть вопрос уточнения методики определения эмиссии метана и закиси азота в части учета технологических особенностей животноводческих и птицеводческих предприятий. Категорирование предприятий на СХО, КФХ и ХН позволяет их типизировать, что упрощает расчет при оценках на уровне регионов и страны. При этом данные об используемых технологиях сбора и хранения навоза и аккумуляции информации о присущих этим системам эмиссиях позволят провести прогнозные расчеты и определить направления технико-технологической модернизации для снижения выбросов парниковых газов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ динамики и структуры эмиссии парниковых газов в сельском хозяйстве России / Ю. Н. Романцева [и др.] // *Аграрная наука*. 2024. № 2. С. 139–145. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-379-2-139-145>
2. Ахметшина Л. Г. Возможности российского сельского хозяйства в снижении выбросов парниковых газов и адаптации к климатическим изменениям // *Вестник Алтайской академии экономики и права*. 2022. № 4. Ч. 1. С. 5–14. <https://doi.org/10.17513/vaael.2129>
3. Шалавина Е. В., Васильев Э. В., Папушин Э. А. Анализ технологий переработки отходов животноводства в различных природно-климатических условиях России // *АгроЭкоИнженерия*. 2023. № 3 (116). С. 110–123. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-3116-110-123>

4. Ветеринарно-санитарная оценка современных биотехнологических способов переработки навоза / В. Г. Тюрин [и др.] // Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии. 2022. № 2 (42). С. 230–238. <https://doi.org/10.36871/vet.san.hyг.ecol.202202012>
5. Relating Bacterial Dynamics and Functions to Greenhouse Gas and Odor Emissions during Facultative Heap Composting of Four Kinds of Livestock Manure / L. Li [et al.] // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 345. Article no. 118589. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118589>
6. Estimation of Greenhouse Gas Emission from Hanwoo (Korean Native Cattle) Manure Management Systems / S. Won [et al.] // Atmosphere. 2020. Vol. 11, Issue 8. Article no. 845. <https://doi.org/10.3390/atmos11080845>
7. Compaction Effects on Greenhouse Gas and Ammonia Emissions from Solid Dairy Manure / F. Chang [et al.] // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 332. Article no. 117399. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117399>
8. Ba S., Qu Q., Zhang K., Groot J.C.J. Meta-Analysis of Greenhouse Gas and Ammonia Emissions from Dairy Manure Composting // Biosystems Engineering. 2020. Vol. 193. P. 126–137. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.02.015>
9. Greenhouse Gas Balances and Yield-Scaled Emissions for Storage and Field Application of Organic Fertilizers Derived from Cattle Manure / X. Meng [et al.] // Agriculture, Ecosystems & Environment. 2023. Vol. 345. Article no. 108327. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108327>
10. Nutrients Recovery from Fresh Liquid Manure Through an Airlift Reactor to Mitigate the Greenhouse Gas Emissions of Open Anaerobic Lagoons / M. Sobhi [et al.] // Journal of Environmental Management. 2021. Vol. 294. Article no. 112956. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112956>
11. Greenhouse Gas Emissions from Broiler Manure Treatment Options Are Lowest in Well-Managed Biogas Production / U. Kreidenweis [et al.] // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 280. Part 2. Article no. 124969. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124969>
12. Романовская А. А. Оценка антропогенной эмиссии метана в животноводстве России // Сельскохозяйственная биология. 2008. № 6. С. 59–65. URL: <https://www.agrobiology.ru/6-2008romanovskaya.html> (дата обращения: 11.05.2024).
13. Effects of Encapsulated Calcium-Ammonium Nitrate on Greenhouse Gas Emissions from Manure of Beef Steers Grazing a Mature Mixed-Winter Forage / D. D. Henry [et al.] // Journal of Animal Science. 2021. Vol. 99. P. 146–147. <https://doi.org/10.1093/jas/skab235.269>
14. Effect of Bromoform and Linseed Oil on Greenhouse Gas Emissions from Stored Beef Manure / A. O. Balsero [et al.] // ASABE Annual International Meeting. 2022. Article no. 2200416. <https://doi.org/10.13031/aim.202200416>
15. Impact of Bentonite on Greenhouse Gas Emissions during Pig Manure Composting and Its Subsequent Application / J.-P. Wu [et al.] // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 344. Article no. 118453. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118453>
16. Acidification of Residual Manure in Liquid Dairy Manure Storages and Its Effect on Greenhouse Gas Emissions / V. Sokolov [et al.] // Frontiers in Sustainable Food Systems. 2020. Vol. 4. Article no. 568648. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.568648>
17. Ellison R. J., Horwath W. R. Reducing Greenhouse Gas Emissions and Stabilizing Nutrients from Dairy Manure Using Chemical Coagulation // Journal of Environmental Quality. 2021. Vol. 50, Issue 2. P. 375–383. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20195>
18. Biochar Addition Reduces Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions during Composting of Human Excreta and Cattle Manure / D. Castro-Herrera [et al.] // Journal of Environmental Quality. 2023. Vol. 52, Issue 4. P. 814–828. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20482>
19. Effects of Feeding a Pine-Based Biochar to Beef Cattle on Subsequent Manure Nutrients, Organic Matter Composition and Greenhouse Gas Emissions / C. M. Romero [et al.] // Science of the Total Environment. 2022. Vol. 812. Article no. 152267. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152267>
20. Брюханов А. Ю., Шалавина Е. В., Васильев Э. В. Прогнозное распределение технологий переработки навоза КРС в Российской Федерации // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024. Т. 25, № 3. С. 507–517. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.507-517>

REFERENCES

1. Romantseva Yu.N., Bodur A.M., Maslakova V.V., Kagirova M.V. Analysis of the Dynamics and Structure of Greenhouse Gas Emissions in Russian Agriculture. *Agrarian Science*. 2024;(2):139–145. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-379-2-139-145>
2. Akhmetshina L.G. Opportunities for Russian Agriculture to Reduce Greenhouse Gas Emissions and Adapt to Climatic Changes. *Vestnik Altaiskoi Akademii Ekonomiki i Prava*. 2022;4(1):5–14. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17513/vael.2129>
3. Shalavina E.V., Vasilev E.V., Papushin E.A. Analysis of Technologies for Processing Animal Waste in Different Natural and Climatic Conditions of Russia. *AgroEcoEngineering*. 2023;3(116):110–124. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-3116-110-123>
4. Tyurin V.G., Mysova G.A., Potemkina N.N., Sakharov A.Yu., Kochish O.I., Biryukov K.N. Veterinary and Sanitary Assessment of Modern Biotechnological Methods of Manure Processing. *Problemy Veterinarnoi Sanitarii, Gigienny i Ecologii*. 2022;2(42):230–238. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36871/vet.san.hyг.ecol.202202012>
5. Li L., Liu Y., Kong Y., Zhang J., Shen Y., Li G., et al. Relating Bacterial Dynamics and Functions to Greenhouse gas and Odor Emissions during Facultative Heap Composting of four Kinds of Live-stock Manure. *Journal of Environmental Management*. 2023;345:118589. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118589>
6. Won S., Yoon Y., Ali Hamid M.M., Reza A., Shim S., Kim S., et al. Estimation of Greenhouse Gas Emission from Hanwoo (Korean Native Cattle) Manure Management Systems. *Atmosphere*. 2020;11(8):845. <https://doi.org/10.3390/atmos11080845>
7. Chang F., Fabian-Wheeler E., Richard T.L., Hile M. Compaction Effects on Greenhouse Gas and Ammonia Emissions from Solid Dairy Manure. *Journal of Environmental Management*. 2023;332:117399. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117399>
8. Ba S., Qu Q., Zhang K., Groot J.C.J. Meta-Analysis of Greenhouse Gas and Ammonia Emissions from Dairy Manure Composting. *Biosystems Engineering*. 2020;193:126–137. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.02.015>
9. Meng X., Sørensen P., Møller H.B., Petersen S.O. Greenhouse Gas Balances and Yield-Scaled Emissions for Storage and Field Application of Organic Fertilizers Derived from Cattle Manure. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2023;345:108327. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108327>
10. Sobhi M., Gaballah M.S., Han T., Cui X., Li B., Sun H., et al. Nutrients Recovery from Fresh Liquid Manure through an Airlift Reactor to Mitigate the Greenhouse Gas Emissions of Open Anaerobic Lagoons. *Journal of Environmental Management*. 2021;294:112956. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112956>
11. Kreidenweis U., Breier J., Herrmann C., Libra J., Prochnow A. Greenhouse Gas Emissions from Broiler Manure Treatment Options Are Lowest in Well-Managed Biogas Production. *Journal of Cleaner Production*. 2021;280(2):124969. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124969>
12. Romanovskaya A.A. Estimation of Volumes of Anthropogenic Emissions of Methane in Russian Animal Husbandry. *Agricultural Biology*. 2008;6:59–65. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://www.agrobiolgy.ru/6-2008romanovskaya.html> (accessed 11.05.2024).
13. Henry D.D., Osorio A.M., Mejia-Turcios S.E., Vargas D.A., Slaughter L.C., Kohmann M., et al. Effects of Encapsulated Calcium-Ammonium Nitrate on Greenhouse Gas Emissions from Manure of Beef Steers Grazing a Mature Mixed-Winter Forage. *Journal of Animal Science*. 2021;99:146–147. <https://doi.org/10.1093/jas/skab235.269>
14. Balsero A.O., Zelt M., Schmidt A.M., Fudolig M., Miller D.N. Effect of Bromoform and Linseed Oil on Greenhouse Gas Emissions from Stored Beef Manure. *ASABE Annual International Meeting*. 2022;2200416. <https://doi.org/10.13031/aim.202200416>
15. Wu J.-P., Li M.-L., Wang Y., Lin S., Hu R.-G., Xiang R.-B. Impact of Bentonite on Greenhouse Gas Emissions during Pig Manure Composting and Its Subsequent Application. *Journal of Environmental Management*. 2023;344:118453. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118453>

16. Sokolov V., VanderZaag A., Habtewold J., Dunfield K., Tambong J.T., Wagner-Riddle C., et al. Acidification of Residual Manure in Liquid Dairy Manure Storages and Its Effect on Greenhouse Gas Emissions. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2020;4:568648. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.568648>
17. Ellison R.J., Horwath W.R. Reducing Greenhouse Gas Emissions and Stabilizing Nutrients from Dairy Manure Using Chemical Coagulation. *Journal of Environmental Quality*. 2021;50(2):375–383. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20195>
18. Castro-Herrera D., Prost K., Kim D.-G., Yimer F., Tadesse M., Gebrehiwot M., et al. Biochar Addition Reduces Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions during Composting of Human Excreta and Cattle Manure. *Journal of Environmental Quality*. 2023;52(4):814–828. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20482>
19. Romero C.M., Redman A.-A.P.H., Owens J., Terry S.A., Ribeiro G.O., Gorzelak M.A., et al. Effects of Feeding a Pine-Based Biochar to Beef Cattle on Subsequent Manure Nutrients, Organic Matter Composition and Greenhouse Gas Emissions. *Science of the Total Environment*. 2022;812:152267. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152267>
20. Briukhanov A. Yu., Shalavina E.V., Vasilev E.V. Forecast Distribution of Cattle Manure Processing Technologies in the Russian Federation. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2024;25(3):507–517. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.507-517>

Об авторах:

Брюханов Александр Юрьевич, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, директор института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Филътровское ш., д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4963-3821>, Researcher ID: B-7550-2018, Scopus ID: 57190026573, SPIN-код: 8932-5083, sznii@ya.ru

Романовская Анна Анатольевна, доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, директор института глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля (107258, Российская Федерация, г. Москва, ул. Глебовская, 20Б), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8943-170X>, Researcher ID: J-8166-2013, Scopus ID: 6603121727, SPIN-код: 3370-6390, an_roman@igce.ru

Шалавина Екатерина Викторовна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Филътровское ш., д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7345-1510>, Researcher ID: C-1980-2018, Scopus ID: 57190026700, SPIN-код: 4075-6888, shalavinaev@mail.ru

Васильев Эдуард Вадимович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Филътровское ш., д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5910-5793>, Researcher ID: C-1304-2018, Scopus ID: 57190024035, SPIN-код: 9810-9439, sznii6@yandex.ru

Вертянкина Виктория Юрьевна, научный сотрудник отдела мониторинга потоков парниковых газов в природных и антропогенно-нарушенных экосистемах института глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля (107258, Российская Федерация, г. Москва, ул. Глебовская, 20Б), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3934-7872>, Researcher ID: Y-8301-2018, SPIN-код: 6487-8721, victoria_vert@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

А. Ю. Брюханов – концептуализация, руководство исследованием.

А. А. Романовская – определение методологии исследования.

Е. В. Шалавина – формирование структуры статьи, проведение расчетов, сравнение результатов.



Э. В. Васильев – постановка задачи, литературный обзор.

В. Ю. Вертянкина – формальный анализ.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 23.08.2024; поступила после рецензирования 06.09.2024;

принята к публикации 12.09.2024

About the authors:

Aleksandr Yu. Briukhanov, Dr.Sci. (Eng.), Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Director, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – branch of FSAC VIM (3 Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, St. Petersburg 196634, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4963-3821>, Researcher ID: B-7550-2018, Scopus ID: 57190026573, SPIN-code: 8932-5083, sznii@ya.ru

Anna A. Romanovskaya, Dr.Sci. (Biol.), Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Director, Institute of Global Climate and Ecology named after Academician Yu.A. Israel (20B Glebovskaya St., Moscow 107258, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8943-170X>, Researcher ID: J-8166-2013, Scopus ID: 6603121727, SPIN-code: 3370-6390, an_roman@igce.ru

Ekaterina V. Shalavina, Cand.Sc. (Eng.), Senior Researcher of the Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – branch of FSAC VIM (3 Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, St. Petersburg 196634, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7345-1510>, Researcher ID: C-1980-2018, Scopus ID: 57190026700, SPIN-code: 4075-6888, shalavinaev@mail.ru

Eduard V. Vasilev, Cand. Sc. (Eng.), Leading Researcher of the Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – branch of FSAC VIM (3 Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, St. Petersburg 196634, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5910-5793>, Researcher ID: C-1304-2018, Scopus ID: 57190024035, SPIN-code: 9810-9439, sznii6@yandex.ru

Victoria Yu. Vertyankina, Researcher of the Department of Monitoring Greenhouse Gas Fluxes in Natural and Human-Disturbed Ecosystems, Institute of Global Climate and Ecology named after Academician Yu.A. Israel (20B Glebovskaya St., Moscow 107258, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3934-7872>, Researcher ID: Y-8301-2018, SPIN-code: 6487-8721, victoria_vert@mail.ru

Authors contribution:

A. Yu. Briukhanov – study concept and guidance.

A. A. Romanovskaya – methodology.

E. V. Shalavina – structure of the manuscript, calculations, comparison of results.

E.V. Vasilev – task setting, literature review.

V. Yu. Vertyankina – formal analysis.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 23.08.2024; revised 06.09.2024; accepted 12.09.2024