

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT



<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.465-488>

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

УДК 631.862.1:633.082.35:636.2

Оригинальная статья / Original article

Исследования выделения парниковых газов при переработке навоза молодняка крупного рогатого скота

А. Ю. Брюханов, Э. В. Васильев,
В. И. Базыкин, Е. В. Шалавина 

*Институт агроинженерных и экологических
проблем сельскохозяйственного производства –
филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация*
 shalavinaev@mail.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время расчет эмиссии парниковых газов осуществляется в соответствии с оценками Межправительственной группы экспертов по изменению климата, которые не отражают в полной мере ситуацию в сельском хозяйстве из-за укрупненных методов расчета и отсутствия детализации внутри стран. Оценка во многом зависит от точности расчетов, которую можно повысить за счет учета специфики в разрезе технологий в Российской Федерации, и от проведения фактических замеров при переработке навоза.

Цель исследования. Изучение выделения парниковых газов с применением установки, имитирующей реальные условия переработки подстилочного навоза молодняка крупного рогатого скота.

Материалы и методы. На обоснованной экспериментальной установке, включающей герметичную вентилируемую камеру, имитировали технологию компостирования навоза телят в части его естественного разогрева и измеряли концентрацию выделяемых климатически активных веществ в трех повторностях и в четырех температурных режимах. Исследование включало подготовительный этап – химический анализ, взвешивание и загрузка навоза; основной этап – запуск имитационных условий переработки и фиксирование концентрации загрязняющих веществ в выбросах; заключительный этап – выгрузка и взвешивание навоза. Содержание газов в выбросах определяли на четырехканальном газоанализаторе ЭЛАН плюс. Экспериментальные данные обрабатывали в программе Microsoft Excel. Для определения предельного значения случайной погрешности использовали критерий Стьюдента.

Результаты исследования. На экспериментальной установке были определены концентрации аммиака, сероводорода, метана и углекислого газа в выбросах из навоза молодняка крупного рогатого скота в четырех режимах исследования. Значения средних величин концентрации попадают в интервал среднеквадратичных отклонений, следовательно, полученные данные достоверны.

© Брюханов А. Ю., Васильев Э. В., Базыкин В. И., Шалавина Е. В., 2025



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

Обсуждение и заключение. По результатам аналитического обзора выбрана наиболее рациональная конструкция экспериментальной установки. Полученные на ней концентрации газов показали сходимость с результатами аналогичных исследований сторонних авторов. Далее необходимо разработать расчетную модель, учитывающую различные технологии обращения с навозом и позволяющую перейти от концентраций парниковых газов к удельным выбросам.

Ключевые слова: парниковые газы, концентрация парниковых газов в эмиссии, замер концентрации, аммиак, животноводство, переработка навоза

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за помощь в улучшении статьи, а также коллег из Института глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля за консультирование.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Базыкин В.И., Шалавина Е.В. Исследования выделения парниковых газов при переработке навоза молодняка крупного рогатого скота. *Инженерные технологии и системы.* 2025;35(3):465–488. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.465-488>

Study of Greenhouse Gas Emission from Young Cattle Manure Processing

A. Yu. Briukhanov, E. V. Vasilev,
V. I. Bazykin, E. V. Shalavina ✉

*Institute for Engineering and Environmental Problems
in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal
Scientific Agroengineering Center VIM,
St. Petersburg, Russian Federation*

✉ shalavinaev@mail.ru

Abstract

Introduction. Present calculations of greenhouse gas emissions follow IPCC estimates, which use the aggregated calculation methods and do not reflect the country-specific details, so they do not give a true picture of the current situation in agriculture. Assessment depends on calculation accuracy, improvable through taking into account Russia-specific technologies and on actual measurements during manure processing.

Aim of the Study. The study is aimed at quantifying greenhouse gas emissions with an experimental setup that simulates real conditions of processing young cattle bedding manure by composting.

Materials and Methods. For the study there was used a validated experimental setup with a sealed ventilated chamber. The setup simulated the technology for composting young cattle bedding manure in terms of its natural heating and measured concentrations of climate-active substances. The study had three repetitions across four temperature modes. The study included the preparatory stage (chemical analysis, weighing and loading of manure); main stage (simulation of processing conditions and monitoring of pollutant concentrations); and final stage (manure unloading and weighing). The study measured the gas content with the use of the four-channel gas analyzer ELAN Plus. The study analyzed the experimental data via Microsoft Excel. Statistical significance was evaluated using Student's t-test.

Results. The concentrations of ammonia, hydrogen sulfide, methane and carbon dioxide in young cattle manure emissions were determined with the use of four temperature modes. Mean concentrations are within standard deviation intervals confirming statistical reliability.

Discussion and Conclusions. The analytical literature review was used to choose the optimal configuration of an experimental setup. Measured gas concentrations showed statistical correlation with comparable published researches. Future work requires developing a computational model, which takes into account diverse technologies for handling manure and makes possible the conversion of greenhouse gas concentrations to specific emission factors.

Keywords: greenhouse gases, concentration, measuring, ammonia, livestock farming, manure processing

Acknowledgements: The authors express sincere thanks to anonymous reviewers for their valuable help in improving the manuscript and the colleagues from Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology for advising.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Briukhanov A.Yu., Vasilev E.V., Bazykin V.I., Shalavina E.V. Study of Greenhouse Gas Emission from Young Cattle Manure Processing. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(3):465–488. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.465-488>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одними из наиболее актуальных научных и практических направлений научно-технологического развития страны являются объективная оценка выбросов климатически активных веществ от различных отраслей промышленности и от сельского хозяйства и снижение их негативного воздействия на окружающую среду через внедрение наилучших доступных технологий¹. Общепринятые подходы к расчету эмиссии парниковых газов отражены в Руководящих принципах национальных инвентаризаций парниковых газов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК)². Основным недостатком данного подхода является усреднение всех стран, что не позволяет учитывать климатические и технологические особенности каждого региона. Вследствие этого оценка эмиссии без учета специфики каждой страны приводит к погрешности до 50 %. Для Российской Федерации становится актуальной разработка собственной методики оценки эмиссии парниковых газов, учитывающей все аспекты производства³.

Производство сельскохозяйственной продукции связано с выделением в атмосферу целого ряда газов (климатически активных веществ), наносящих вред человеку, животным, окружающей среде [1–3]. Согласно данным Национального

¹ О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации [Электронный ресурс] : Указ Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. № 145. URL: <https://clck.ru/3P7vZ6> (дата обращения: 16.01.2025).

² Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/index.html> (дата обращения: 16.01.2025).

³ 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 г. № 15-р. URL: <https://clck.ru/3P7w4j> (дата обращения: 16.01.2025).

кадастра антропогенных выбросов⁴ в 2021 г. суммарные выбросы парниковых газов от аграрного сектора Российской Федерации составили 121 млн т. CO₂-экв., что соответствует 51,6 % уровня 1990 г. (250 млн т. CO₂-экв.). В 2021 г. вклад закиси азота в общие сельскохозяйственные выбросы был выше (60,0 %) вклада CH₄ (39,2 %), вклад CO₂ составлял около 0,8 %. Снижение выбросов парниковых газов обычно связано с уменьшением поголовья сельскохозяйственных животных, посевных площадей, норм вносимых минеральных удобрений [4; 5].

Общие требования к методологиям расчета выбросов парниковых газов, согласованные друг с другом и с международными требованиями МГЭИК, в основном представлены в стандартизированных документах⁵. Данные документы основаны на расчете с использованием удельных показателей, учитывающих только вид животных (коровы, свиньи и т. п.). Для более точного расчета необходимо еще учитывать технологии переработки навоза и помета. Также данные документы по своему содержанию и методологиям расчета согласованы с Протоколом по выбросам парниковых газов и методологиями Руководств МГЭИК.

В настоящее время расчет эмиссии парниковых газов осуществляется в соответствии с оценками МГЭИК, которые не отражают в полной мере ситуацию по эмиссиям в сельском хозяйстве из-за применения укрупненных методов расчета и отсутствия детализации внутри каждой из стран. Оценка зависит от точности замеров. Проводимые исследования направлены на повышение точности расчетов за счет учета специфики в разрезе технологий Российской Федерации и проведения фактических замеров при переработке навоза методом компостирования.

Целью исследования было изучение выделения парниковых газов с применением установки, имитирующей реальные условия переработки подстилочного навоза молодняка крупного рогатого скота (КРС) методом компостирования.

Задачи исследования: 1) определить концентрации аммиака в эмиссии от навоза молодняка КРС; 2) определить концентрации сероводорода в эмиссии от навоза

⁴ 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: 16.01.2025).

⁵ ГОСТ Р ИСО 14064-1:2007. Газы парниковые. Часть 1. Требования и руководство по количественному определению и отчетности о выбросах и удалении парниковых газов на уровне организации [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200077407> (дата обращения: 21.10.2024); ГОСТ Р ИСО 14064-2:2007. Газы парниковые. Часть 2. Требования и руководство по количественной оценке, мониторингу и составлению отчетной документации на проекты сокращения выбросов парниковых газов или увеличения их удаления на уровне проекта [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200077680> (дата обращения: 21.10.2024); ГОСТ Р ИСО 14064-3:2007. Газы парниковые. Часть 3. Требования и руководство по валидации и верификации утверждений, касающихся парниковых газов [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200077410> (дата обращения: 21.10.2024); ГОСТ Р 56267-2014/ISO/TR 14069:2013. Газы парниковые. Определение количества выбросов парниковых газов в организациях и отчетность. Руководство по применению стандарта ИСО 14064-1 [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200118638> (дата обращения: 21.10.2024); Об утверждении методических указаний и руководства по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации [Электронный ресурс]: Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 30 июня 2015 г. № 300. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420287801> (дата обращения: 21.10.2024); Рекомендации по расчету выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от объектов животноводства и птицеводства: информационный материал [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/437016946> (дата обращения: 21.10.2024); ТКП 17.08-11-2008 (02120). Правила расчета выбросов от животноводческих комплексов, звероферм и птицефабрик [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/3P7yH4> (дата обращения: 21.10.2024).

молодняка КРС; 3) определить концентрации метана в эмиссии от навоза молодняка КРС; 4) определить концентрации углекислого газа в эмиссии от навоза молодняка КРС.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Исследователи из разных стран занимаются проблемой оценки и возможного снижения выбросов климатически активных веществ от систем переработки навоза и помета путем совершенствования технологий и модернизации производства, что предусматривает внедрение эффективных практик ведения сельского хозяйства.

В исследованиях, выполненных в ряде стран, применяли различные методы определения количества выделяемых климатически активных веществ в животноводстве и растениеводстве. В Канаде в 1995 г. были проведены исследования [6] с замером выбросов метана от открытых хранилищ жидкого свиного навоза и жидкого навоза молочного скота. Отобранный воздух был проанализирован на содержание метана с помощью газового хроматографа Shimadzu, оснащенного пламенно-ионизационным детектором (модель 8AIF) и колонкой Poropak Q. Используя этот метод, годовую эмиссию CH_4 из резервуара для свиного навоза оценили в 56,5 кг CH_4 на m^2 поверхности резервуара в год ($\pm 20\%$).

В 1996 г. в Дании проведены исследования [7] по оценке эмиссии парниковых газов (CH_4 и N_2O) от открытых хранилищ жидкого навоза КРС при применении различных укрывных материалов – соломы, плавающих керамзитовых шариков и естественной корки, образующейся на поверхности навоза. Результаты показали, что эмиссия CH_4 сократилась в среднем на 38 % при использовании любого вида исследуемых покрытий.

Ученые из Германии в 2001 г. провели измерения [8] газообразных выбросов при компостировании отходов животноводства в рамках проекта, направленного на определение баланса азота в биологическом земледелии. Результаты показали, что выбросы аммиака и метана снижаются в течение двух-трех недель, в то время как закись азота выделяется в основном в середине периода компостирования.

Германскими учеными в 2006 г. проведены исследования [9] по замеру эмиссии парниковых газов от закрытых по сравнению с открытыми хранилищами. Свиной навоз хранился в контейнерах объемом 65 л. Содержание сухого вещества в навозе составляло от 5 до 8 %. Период хранения составлял не менее 162 дней. Навоз хранился в открытых контейнерах, которые закрывались и проветривались только при измерении методом вентилируемой камеры. Высота контейнера составляла 49 см. Скорость вентиляции во время измерений регулировалась таким образом, чтобы воздух в пространстве всегда менялся один раз в минуту.

В 2008 г. в Австралии были проведены исследования [10] по замеру газов от одного навозохранилища с помощью различных устройств – аэродинамической трубы и динамической эмиссионной камеры. Все образцы проанализированы в течение 24 ч после сбора. Результаты показали, что концентрация запаха была неизменно выше в образцах, собранных с помощью поточной камеры (соотношение от 10:7 до 5:1 по сравнению с образцами из аэродинамической трубы), в то время как коэффициенты эмиссии запаха были неизменно выше, когда они были

получены из аэродинамической трубы (соотношение от 60:1 до 240:1 по сравнению со значениями из поточной камеры).

Китайскими учеными в 2014 г. проведены исследования [11] с измерением выбросов N_2O , CH_4 и CO_2 от твердого навоза мясного скота, хранящегося в штабелях. Исследования проводились для четырех вариантов штабелей (навоз во всех штабелях был одинаковый): 1) штабель высотой 20 см без укрывного материала; 2) штабель высотой 40 см без укрывного материала; 3) штабель высотой 20 см, покрытый сверху опилками слоем в 2 см; 4) штабель высотой 40 см, покрытый сверху опилками слоем в 2 см. Замеры начались 29 мая и длились в течение 49 дней. Для измерения выбросов парниковых газов в лабораторном эксперименте было спроектировано и построено двенадцать поливинилхлоридных цилиндрических (30 см в диаметре и 90 см в высоту) статических камер. Пробы передавались в лабораторию. Результаты исследования свидетельствуют о том, что твердый навоз мясного скота при высоте штабеля 40 см без покрытия опилками производит наименьшее количество выбросов парниковых газов.

В 2015 г. учеными из США [12] проводились замеры парниковых газов от открытых хранилищ жидкого свиного навоза для определения характеристик созревания навоза. Результаты показали, что при ежедневном добавлении свежей мочи и кала в систему сбора навоза необходимо минимум пять недель для оценки состава навоза и выбросов в атмосферу для определения влияния рациона на выбросы.

Ученые из США [13] в 2016 г. предложили ряд методов количественной оценки потоков парниковых газов в системах животноводства. Для измерения выбросов парниковых газов от животных часто используются так называемые «дыхательные камеры» (*respiration chambers*), боксы на голову (*headboxes*), методы определения индикаторных газов или методы получения газов *in vitro*. В некоторых случаях используется комбинация этих методов. Наиболее распространенные методы измерения выбросов парниковых газов из помещений для содержания животных включают использование методов индикаторного газа или прямых/непрямых измерений вентиляции в сочетании с измерением концентрации интересующих газов. Существует ряд химических методов количественного определения концентрации парниковых газов и других газов, представляющих интерес, включая газовую хроматографию, инфракрасную спектроскопию, инфракрасную спектроскопию с открытым каналом преобразования Фурье (OP-FTIR) технологии, фотоакустическую спектроскопию (PAS), масс-спектроскопию (MS), перестраиваемую диодную лазерную абсорбционную спектроскопию (TDLAS) и твердотельные электрохимические технологии. Каждый метод имеет свои преимущества и проблемы при использовании в заявленных целях.

В 2017 г. в США (штат Висконсин) проведены исследования [14] с замером парниковых газов от жидкой фракции навоза КРС. Жидкая фракция навоза хранилась в пластиковых бочках объемом 0,21 м³. Результаты исследования показали, что ферментация навоза с последующим разделением на фракции снизила выбросы CH_4 с 3,9 до 1,3 г CO_2 -экв, но увеличила выбросы закиси азота (N_2O) с 0,6 до 2,0 г CO_2 -экв.

В 2019 г. на Украине в Институте сельского хозяйства Карпатского региона Национальной академии аграрных наук Украины проведены исследования [15] по определению количества выбросов во время анаэробной ферментации свиного навоза (*in vitro*) с добавлением природных сорбентов в различных дозах. Исследования проводили с помощью газового детектора-анализатора Dozor S-M-5. Определяли эмиссии CH_4 , CO_2 и NO . Было доказано экспериментально, что применение вермикулита и сапонита наиболее эффективно в дозе 5 % и вызывает снижение уровня газовой выделенности из навоза свиней на 18,6–37,5 % и 7,2–37,5 % соответственно.

В США (штат Айова) в 2020 г. в рамках исследования влияния рационов кормления свиней на эмиссии парниковых газов проводили соответствующие замеры от навоза [16]. Рационы с более высоким содержанием клетчатки увеличивали концентрацию азота, углерода и общего количества летучих жирных кислот (ЛЖК) в навозе и повышали выбросы ЛЖК, но снижали выбросы аммиака. Уменьшение размера частиц рациона снизило концентрацию азота, углерода, ЛЖК, фенольных веществ и индола в навозе и уменьшило выбросы общих ЛЖК. Но ни состав рациона, ни размер частиц не влияли на выбросы парниковых газов в навозе.

Итальянскими учеными [17] в 2022 г. проведена серия экспериментов для сравнения и оценки прямых измерений выбросов аммиака и парниковых газов с использованием одной статической и двух динамических камер (*static and dynamic hoods*) при хранении навоза КРС. Исследования показали, что использование динамических камер, несмотря на их различия в размерах, эксплуатации и применяемом потоке воздуха, дает сопоставимые показатели эмиссии (*emission rates*) для всех анализируемых выбросов и соединений. Эти показатели всегда выше, полученных с использованием статических камер. Поэтому использование динамических камер является ценным методом для уточнения косвенной оценки выбросов.

Учеными из Казанского государственного энергетического университета разработана методика измерения метана из буртов куриного помета [18]. По этой методике в бурте проделывали отверстие диаметром 40 мм и глубиной 500 мм для снижения влияния климатических условий (выветривания). Далее в отверстие помещали щуп, присоединенный к измерительному прибору «Комета-М», и производились замеры при включенном насосе в течение 2–3 мин. Далее проделывалось следующее отверстие на расстоянии 40 см от первого, и измерения повторялись. Программа позволяла собирать и анализировать эмиссии метана.

В начале 2000-х была инициирована исследовательская программа GRACEnet (*Greenhouse gas reduction through agricultural carbon enhancement network*) с целью обеспечить более точную количественную оценку выбросов парниковых газов из почв сельскохозяйственных угодий. Был разработан общий протокол соответствующих измерений, который устанавливал определенные методологические основы, касающиеся соотношения между поверхностью и высотой камер, типа контейнера для отбора проб воздуха, типа корректировки данных для расчета интенсивности выбросов, периода времени, в течение которого проводятся измерения, и часов

в течение дня, наиболее удобных для отбора проб. По этому протоколу в Аргентине в Институте климата и воды в составе Национального института сельскохозяйственных технологий (INTA-ICyA) в 2009 г. начали проводить полевые измерения с помощью статических камер. Результаты показали, что существует высокая вариабельность выбросов N_2O , обусловленная климатическими условиями (количество осадков, температура воздуха и температура верхнего слоя почвы), эдафическими условиями (водонаполненная пористость, NO_3) и типом сельскохозяйственных культур [19].

В Финляндии в 2004 г. провели исследования [20] по сравнению различных камерных методов для измерения CO_2 , выделяемого почвой. Для измерения выделения почвенных газов широко используются три основных камерных метода: при помощи непроточной камеры с нестабильной/неустойчивой средой (*non-steady-state non-through-flow chamber*), также известной как закрытая статическая камера; проточной камеры с нестабильной/неустойчивой средой (*non-steady-state through-flow chamber*), известной как закрытая динамическая камера; проточной камеры со стабильной/устойчивой средой (*steady-state through-flow chamber*) или открытой динамической камеры. По результатам исследований общая тенденция заключалась в том, что непроточные камеры с нестабильной/неустойчивой средой систематически занижали результаты на 4–14 %, тогда как существенных различий между проточными камерами не наблюдалось. Камеры с проточным режимом и нестабильной/неустойчивой средой либо занижали, либо завышали выделение газа от –21 до +33 % в зависимости от типа камеры и способа смешивания воздуха в свободном пространстве камеры. Однако, когда результаты всех протестированных систем были усреднены, выделения газа находились в пределах 4 % от эталонных значений. Камеры с непроточным режимом и нестабильной/неустойчивой средой либо занижали, либо завышали выделение от –35 до +6 %.

Методики измерений выделения газов из почвы и конструкции камер находились в поле зрения многих исследователей в разных странах. Например, P. Rochette [21] показал, что недостатки в конструкции и размещении непроточных камер с нестабильной/неустойчивой средой (*non-flow-through non-steady-state chambers*) привели к получению ненадежных данных и большой неопределенности при измерении потоков N_2O в почве. Размещение камер на поверхности почвы часто изменяло измеряемый поток газа за счет изменения вертикального профиля концентрации газа, энергетического баланса и режима турбулентности. Поэтому необходимо было выработать стандартную методологию с набором минимальных требований к конструкции камеры. Это повысило бы надежность и достоверность измерений, обеспечило методологическую согласованность и позволило проводить сравнения между исследованиями.

В Руководстве Альянса мировых исследований по парниковым газам в сельском хозяйстве (GRA) в 2020 г. [22] обсуждались основные принципы и минимальные требования к проектированию непроточных камер с нестабильной/неустойчивой средой (*non-flow-through non-steady-state chambers*), чтобы минимизировать влияние метода измерения на естественные процессы в почве и атмосфере. В Руководстве даются указания и рекомендации по материалам, размерам, вентиляции, герметизации,

изоляции, глубине размещения, отверстию для отбора проб, а также отмечается необходимость поддержания роста и активности растений в процессе исследования.

По инициативе Немецкого общества почвоведения (*Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft*) Рабочая группа по почвенным газам в 2022 г. составила Руководство по наилучшей практике измерения потоков углекислого газа, метана и закиси азота между почвенно-растительными системами и атмосферой с помощью камер с нестабильной/неустойчивой средой [23] с целью обобщить исследовательский опыт в этой области.

В Российской Федерации также проводятся исследования по определению выделения почвой парниковых газов (почвенному дыханию). Коллективом ученых из разных научных организаций была проведена оценка эмиссии парниковых газов на осушенных торфяниках Северо-Запада Российской Федерации. Для проведения измерений использовались статические камеры квадратного сечения с площадью основания 0,49 м², высотой 25 и 50 см, объемом 119 и 206 л соответственно. В процессе исследования был измерен 101 поток CO₂ и такое же количество потоков CH₄. На основе полученных данных рассчитаны среднесуточные потоки (г м⁻² сут⁻¹) и факторы эмиссии (т CO₂-экв./га · г). Фактические замеры подтвердили предшествующие измерения и полученные результаты, а также показали соответствие фактических потоков парниковых газов данным, полученным другими исследователями в других регионах, и в первую очередь данным, приведенным в Пятом оценочном докладе МГЭИК [24].

Российскими учеными в 2023 г. проведены исследования [25] эмиссий парниковых газов из природных экосистем Норильского промышленного района. Измерения удельных потоков парниковых газов проводились методом ручных статических темных камер с водяным замком. Для исследования водных экосистем применялись темные плавающие камеры. Полученные результаты показали значительную вариабельность эмиссии парниковых газов для различных типов экосистем.

Учеными из Томска⁶ описаны методы измерения эмиссии и поглощения газов почвами. Наибольшее внимание уделено классическому камерному методу. Теория рассмотрена на нескольких уровнях: 1) качественном, дающем лишь общее представление о методе; 2) элементарном количественном, позволяющем применять метод в основных стандартных ситуациях; 3) строгом количественном. Обычно применяются пластиковые и металлические камеры из стали и алюминия. Камера большого объема обязательно должна комплектоваться вентилятором для перемешивания воздуха в ней. Также используются датчики для измерения температуры внутри объема камеры. Основной тип камеры состоит из двух частей – плексигласового колпака и основания из нержавеющей стали.

Анализ литературных источников показал, что для замера эмиссии климатически активных веществ используются преимущественно специальные камеры (табл. 1), которые могут быть выполнены в разных вариантах (ящики, цилиндры, баки, бочки) из разных материалов (нержавеющая сталь, дерево, пластик).

⁶ Глаголев М. В., Сабреков А. Ф., Казанцев В. С. Методы измерения газообмена на границе почва/атмосфера : учеб. пособие. Томск : Изд-во Томского государственного педагогического университета, 2010. 96 с. URL: <https://clck.ru/3P7yXm> (дата обращения: 21.10.2024).

Таблица 1

Table 1

**Применяемые методы определения эмиссии климатически активных веществ
в сельском хозяйстве**
Methods used to determine emissions of climate-active substances in agriculture

Страна / Country	Место исследования / Research site	Метод проведе- ния измерений / Measurement method	Метод обра- ботки проб / Sample analysis method	Метод опреде- ления значений. Прибор / Method for determining values. Instrument
1	2	3	4	5
Канада / Canada	Открытое хранилище жидкого свиного на- воза / Open storage of liquid pig manure	Вакуумный насос / Vacuum pump	Передача образцов воздуха в лаборато- рию / Transferring air samples to the laboratory	Газовая хрома- тография / Gas chromatography
Дания / Denmark	Открытое хранилище жидкого навоза крупно- го рогатого скота / Open storage of liquid cattle manure	Статическая камера / Static camera	Передача образцов воздуха в лаборато- рию / Transferring air samples to the laboratory	Газоанализатор Varian 3300 / Gas analyzer Varian 3300
Германия / Germany	Открытое хранилище жидкого свиного на- воза / Open storage of liquid pig manure	Динамическая камера / Dynamic camera	Передача образцов воздуха в лаборато- рию / Transferring air samples to the laboratory	ИК-Фурье-спект- рометр / FT-IR spectrometer
Австралия / Australia	Открытое хранилище жидкого свиного на- воза / Open storage of liquid pig manure	Аэродинамиче- ская труба и ди- намическая каме- ра / Wind tunnel and dynamic camera	Передача образцов воздуха в лаборато- рию / Transferring air samples to the laboratory	Ольфактометрия / Olfactometry
Китай / China	Площадка переработки твёрдого навоза круп- ного рогатого скота / Solid cattle manure processing site	Статическая камера / Static camera	Передача образцов воздуха в лаборато- рию / Transferring air samples to the laboratory	Газовая хрома- тография / Gas chromatography
США / USA	Открытое хранилище жидкого свиного на- воза / Open storage of liquid pig manure	Динамическая камера / Dynamic camera	Передача сорб- ционных трубок в лабораторию / Transfer of sorption tubes to the laboratory	Термическая де- сорбция / Thermal desorption
США / USA	Открытое хранилище жидкой фракции наво- за крупного рогатого скота / Open storage of liquid fraction of cattle manure	Динамическая камера / Dynamic camera	Режим реального времени / Real time mode	ИК-Фурье-спект- рометр / FT-IR spectrometer
Италия / Italy	Открытое хранилище твёрдого навоза круп- ного рогатого скота / Open storage of solid cattle manure	Динамические и статические камеры / Dynamic and static cameras	Передача образцов воздуха в лаборато- рию / Transferring air samples to the laboratory	Газовая хрома- тография / Gas chromatography

Окончание табл. 1 / End of table 1

1	2	3	4	5
Аргентина / Argentina	Пастбища, пашни / Pastures, arable lands	Статическая камера / Static camera	Передача образцов воздуха в лабораторию / Transferring air samples to the laboratory	Газовая хроматография / Gas chromatography
Финляндия / Finland	Земельные угодья / Land holdings	Динамические и статические камеры / Dynamic and static cameras	Режим реального времени / Real time mode	Инфракрасный газоанализатор EGM-4 / Infrared gas analyzer EGM-4
Россия / Russia	Земельные угодья / Land holdings	Динамическая камера / Dynamic camera	Режим реального времени / Real time mode	Газоанализатор LI-7810, Li-Cor / Gas analyzer LI-7810, Li-Cor
Россия / Russia	Земельные угодья / Land holdings	Динамическая камера / Dynamic camera	Передача образцов воздуха в лабораторию / Transferring air samples to the laboratory	Газовая хроматография / Gas chromatography

В зависимости от условий работы камеры могут быть стационарными (жестко закрепленными на исследуемом объекте) или нестационарными (переносными от исследуемого объекта к объекту). С учетом того, что исследования проводятся на различных материалах в различных хозяйствах, целесообразнее применять нестационарные (переносные) камеры.

По конструкции камеры подразделяются на проточные вентилируемые (динамические) и непроточные невентилируемые (статические). Динамические камеры непрерывно продуваются воздухом, обеспечивая при этом приближение к естественным условиям нахождения навозохранилищ. Нагнетание воздуха обеспечивается напорным и вытяжным вентиляторами. Воздух в динамических камерах может отбираться и анализироваться на выходе из камеры. В статических камерах нет принудительного движения воздуха. Отбор воздуха происходит из отверстия, закрываемого пробкой.

Использование статических (непроточных, невентилируемых) камер позволяет отбирать образцы для анализов только вручную. Необходимо множество образцов для моделирования всей картины в целом. Можно использовать автоматические пробоотборники, однако тогда стоимость исследований значительно возрастет.

Использование динамических (проточных вентилируемых) камер позволяет обеспечить непрерывный отбор проб после достижения устойчивых условий, что сокращает количество проб на каждое наблюдение.

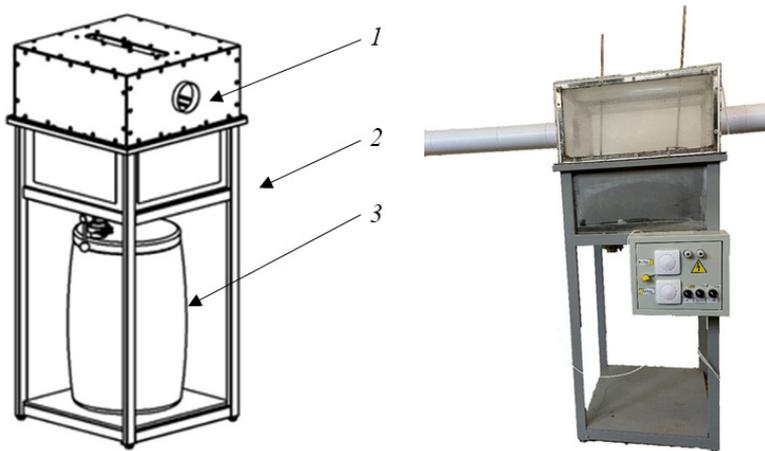
В Российской Федерации переработка твердого навоза и помета в основном осуществляется на открытых гидроизолированных площадках, а большинство хранилищ жидкого навоза открытые. Поэтому целесообразнее при проведении исследований по замеру эмиссии парниковых газов использовать динамическую (вентилируемую) камеру, которая наиболее приближена к погодным условиям (ветрам).

Проведенный аналитический обзор литературных источников позволил сделать вывод, что для исследования выбросов при обращении с различными видами навоза и помета наиболее рационально использование закрытых герметичных вентилируемых и неветилируемых камер. По результатам обзора обоснована конструкция экспериментальной лабораторной установки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальная установка

Для проведения исследований в лаборатории биоконверсии ИАЭП – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ в 2024 г. была разработана и собрана экспериментальная установка, состоящая из герметичной камеры, каркаса и емкости для слива жидкой фракции навоза (рис. 1).



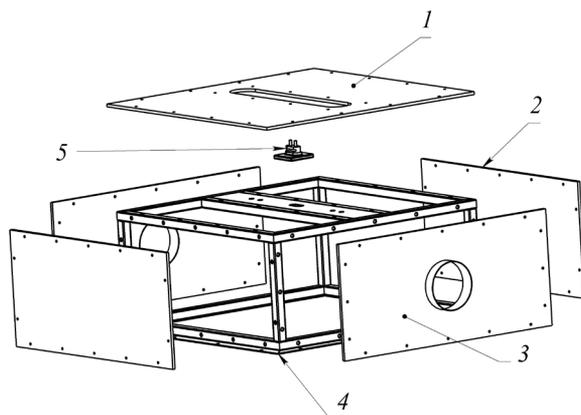
Р и с. 1. Общий вид разработанной экспериментальной установки:
1 – герметичная камера; 2 – каркас; 3 – емкость для слива жидкой фракции навоза

F i g. 1. General view of the designed experimental setup:
1 – an airtight chamber; 2 – a frame; 3 – a container for draining the liquid fraction of manure

Источники: рисунки 1–3, 5–7 составлены авторами статьи.
Source: figures 1–3, 5–7 were made by the authors of the article.

Герметичная камера состоит из двух частей: нижняя часть размером 500×500×250 мм и объемом 0,0625 м³ из нержавеющей стали выполняет функцию накопителя навоза/помета; верхняя часть размером 500×500×250 мм (длина, ширина и высота соответственно) выполнена в виде каркаса из нержавеющей труб, обшитого прозрачным акрилом через винтовые заклепки.

Боковые стенки верхней части имеют фланцы для присоединения трубы диаметром 100 мм. Нижняя и верхняя части камеры крепятся к раме на болтовое соединение. В герметичной камере предусмотрен подогрев материала за счет инфракрасного нагревателя на верхней части и нагревательных элементов на нижней части камеры. В верхней части прозрачного колпака установлена светодиодная подсветка (рис. 2).



Р и с. 2. Верхняя часть камеры:
 1 – верхняя стенка; 2 – боковая стенка; 3 – боковая стенка с фланцем; 4 – каркас; 5 – лампа
 F i g. 2. Upper part of the chamber:
 1 – top wall; 2 – side wall; 3 – side wall with flange; 4 – carcass; 5 – lamp

Для нагрева материала используется инфракрасный нагреватель ЕСР-3 с термомпарой. Его мощность регулируется в диапазоне 50–150 Вт.

Постоянная имитация естественной среды внутри камеры обеспечивается приточным и вытяжным вентиляторами. Они оснащены частотными преобразователями для задания необходимой частоты вращения. Это обеспечивает установление, поддержание и контроль необходимой скорости движения воздуха внутри камеры (рис. 3).



Р и с. 3. Приточный воздуховод и вмонтированный в него регулируемый вентилятор
 F i g. 3. Supply air duct and adjustable built-in fan

Через специально подготовленное отверстие в вытяжном трубопроводе в него вводится пробоотборный зонд ПЗ 1.2 со специальным наконечником, выбираемым в соответствии с установленной скоростью движения воздуха в трубопроводе.

Пробоотборный зонд соединяется с газоанализатором посредством второпластиковых трубок. Выбранные материалы не вступают в реакцию с исследуемыми газами, что способствует получению адекватных результатов исследования (рис. 4).



Р и с. 4. Измерение концентрации газов с помощью пробоотборного зонда и газоанализатора ЭЛАН плюс

F i g. 4. Measuring gas concentration using a sampling probe and the ELAN Plus gas analyzer

Источник: фотографии сделаны в процессе измерения концентраций газов с помощью пробоотборного зонда и газоанализатора ЭЛАН плюс в лаборатории биоконверсии ИАЭП – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ ведущим научным сотрудником Э. В. Васильевым (на фото научный сотрудник В. И. Базыкин) 15 августа 2024 г.

Source: the photographs were taken during the process of measuring gas concentrations using a sampling probe and the gas analyzer ELAN Plus in the bioconversion laboratory of the IEEP – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM by leading researcher E.V. Vasiliev (in the photo researcher V. I. Bazykin) on 15.08.2024.

Предусмотрено, что разработанная лабораторная экспериментальная установка позволяет определить выбросы при различных системах обращения с навозом и пометом. Конструкция установки предусматривает также проведение исследований как в вентилируемой, так и в невентилируемой герметичной камере.

В данном исследовании имитировалась технология компостирования подстилочного навоза телят. Пробы навоза из телятника отбирались на комплексе КРС, расположенном в Северо-Западном федеральном округе. В качестве подстилочного материала на предприятии используется солома.

Порядок проведения исследования

Экспериментальное исследование разделено на три этапа.

Этап 1 (подготовительный)

Навоз из телятника доставлялся в лабораторию биоконверсии ИАЭП – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, взвешивался весами Smart Sensor и загружался в емкость герметичной камеры вручную. Пробы навоза передавались на анализ в аналитическую лабораторию ИАЭП – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.

Этап 2 (основной)

Устанавливались имитационные условия обращения с навозом. Под ними понималось максимальное приближение к реальным условиям переработки навоза, то есть его саморазогрев за счет:

– нагрева материала сверху с помощью инфракрасного нагревателя, что имитирует воздействие солнечного света на материал при различных способах его хранения;

– перемешивания материала, что имитирует технологические операции при компостировании и обеспечивает саморазогрев смеси;

– создания в камере воздушного потока, имитирующего потоки ветра с помощью присоединения к боковым стенкам с фланцами труб диаметром 100 мм и установки на входной трубе регулируемого вентилятора.

После запуска имитационных условий, осуществлялась фиксация концентрации загрязняющих веществ в образующихся выбросах. Измерения объемной доли диоксида углерода (CO_2), метана (CH_4), сероводорода (H_2S) и аммиака (NH_3) проводили с помощью четырехканального газоанализатора ЭЛАН плюс⁷.

Твердый материал исследовали на предмет выделения газов в четырех температурных режимах:

– при температуре +21,3 °С (через 1 ч после загрузки в камеру);

– при температуре +24,8 °С (через 10 ч после загрузки в камеру);

– при температуре материала +44 °С (мезофильный период);

– при температуре материала +55 °С и выше (термофильный период).

Этап 3 (заключительный)

Навоз выгружался из герметичной емкости и взвешивался.

Эксперимент был проведен в трех повторностях. Статистическая обработка экспериментальных данных осуществлялась в программе Microsoft Excel. Оценка погрешности средних значений производилась с учетом критерия Стьюдента. Истинное значение математического ожидания с вероятностью P должно находиться в интервале:

$$P \left[\bar{x} \pm t_v \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right] = 1 - \alpha,$$

где \bar{x} – среднее значение; t_v – табличное значение критерия Стьюдента (для уровня вероятности 0,9 значение составляет 2,92); $1 - \alpha$ – заданный уровень вероятности (для процесса переработки навоза принято значение 0,9); n – количество точек массива (для данного эксперимента $n = 3$); σ – среднеквадратичное отклонение⁸.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В соответствии с первым этапом исследования был выполнен анализ проб навоза в аналитической лаборатории ИАЭП – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (табл. 2).

⁷ Портативные автоматические газоанализаторы для рабочей и жилой зоны ЭЛАН [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/3P7ybu> (дата обращения: 24.01.2025).

⁸ Валге А. М., Джабборов Н. И., Эвиев В. А. Основы статистической обработки экспериментальных данных при проведении исследований по механизации сельскохозяйственного производства с примерами на Statgraphics и Excel : моногр. СПб. : Элиста, 2015. 140 с. <https://elibrary.ru/vitiud>

Таблица 2

Table 2

Качественные характеристики подстилочного навоза телят
Quality of young cattle bedding manure

Показатель / Indicator	Значение / Value
Влажность, % / Moisture content, %	70,30
NO ₃ ⁻ (на нативное в-во), мг/100 г / NO ₃ ⁻ (native manure), mg/100 g	36,70
NH ₄ (на нативное в-во), % / NH ₄ (native manure), %	0,16
N _{total} (на нативное в-во), % / N _{total} (native manure), %	1,31
Зола (на сухое в-во) / Ash (Dry matter)	10,50

В соответствии со вторым этапом были проведены замеры концентраций климатически активных веществ. В таблице 3 представлены значения концентрации в трех повторностях по четырем температурным режимам исследования и указаны верхний и нижний интервалы среднеквадратических отклонений для CO₂.

Таблица 3

Table 3

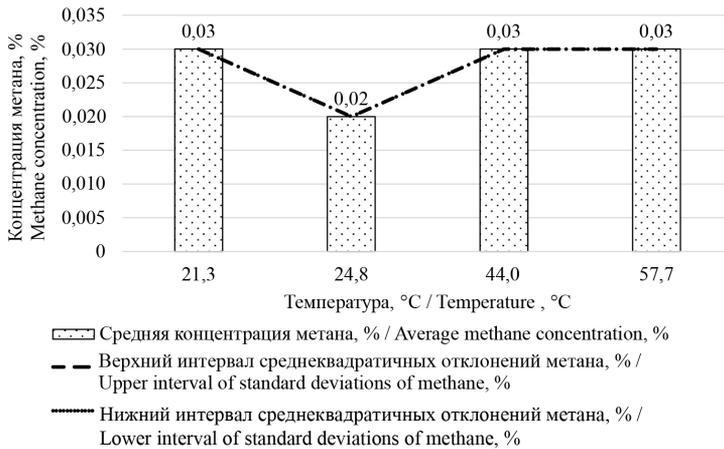
Значения концентрации для углекислого газа при разных значениях температуры навоза

Concentration of carbon dioxide under various manure temperatures

Показатель / Indicator	Значение для температуры / Concentration under			
	+21,3 °C	+24,8 °C	+44 °C	+57,7 °C
Концентрация CO ₂ (повторность 1), мг/м ³ / Concentration of CO ₂ (replication 1), mg/m ³	724	527	538	541
Концентрация CO ₂ (повторность 2), мг/м ³ / Concentration of CO ₂ (replication 2), mg/m ³	724	529	538	541
Концентрация CO ₂ (повторность 3), мг/м ³ / Concentration of CO ₂ (replication 3), mg/m ³	724	530	538	541
Средняя концентрация CO ₂ , мг/м ³ / Mean concentration of CO ₂ , mg/m ³	724	528,7	538	541
Верхний интервал среднеквадратичных отклонений CO ₂ , мг/м ³ / Upper interval of standard deviation of CO ₂ , mg/m ³	724	529,9	538	541
Нижний интервал среднеквадратичных отклонений CO ₂ , мг/м ³ / Lower interval of standard deviation of CO ₂ , mg/m ³	724	527,5	538	541

В исходном состоянии через час после загрузки в камеру фоновая концентрация CO₂ составляла 362 мг/м³. Через 6–18 ч после загрузки в камеру фоновая концентрация CO₂ достигала 349 мг/м³. При температуре материала в диапазоне 40–45 °C фоновая концентрация CO₂ составляла 538 мг/м³. При температуре материала в диапазоне свыше 55 °C фоновая концентрация CO₂ достигла 530 мг/м³.

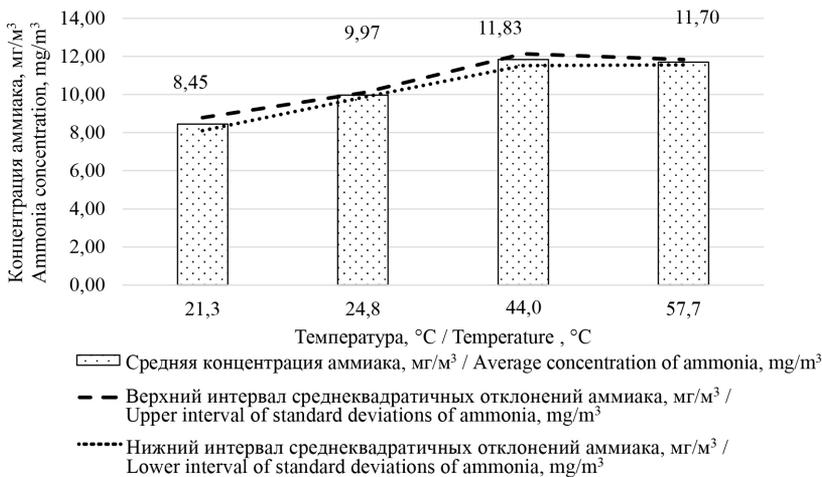
На рисунках 5–7 представлены средние значения концентрации по четырем режимам исследования и указаны верхний и нижний интервалы среднеквадратических отклонений CH₄, H₂S и NH₃ соответственно.



Р и с. 5. Значения средней концентрации метана, верхний и нижний интервалы средноквадратических отклонений метана

F i g. 5. Mean methane concentrations, upper and lower intervals of methane standard deviations

В исходном состоянии через час после загрузки в камеру фоновая концентрация CH_4 составляла 0,03 %. Через 6–18 ч после загрузки в камеру фоновая концентрация CH_4 составляла 0,02 %. При температуре материала в диапазоне 40–45 °C фоновая концентрация CH_4 достигла 0,03 %. При температуре материала в диапазоне свыше 55 °C фоновая концентрация CH_4 составляла 0,02 %.

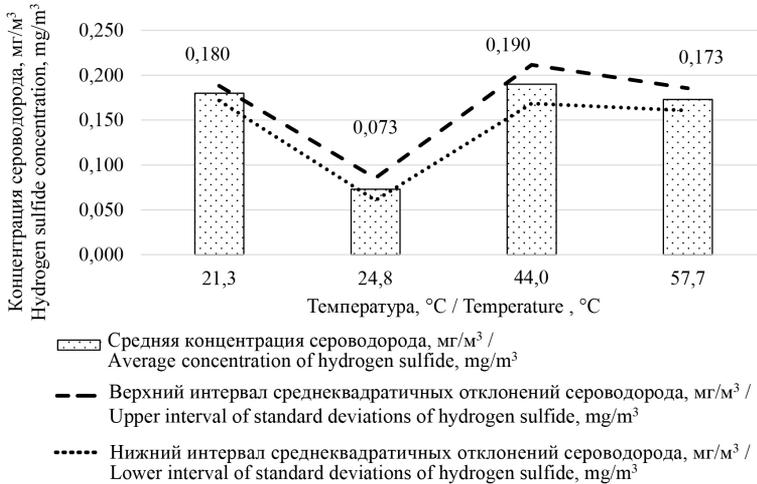


Р и с. 6. Значения средней концентрации сероводорода, верхний и нижний интервалы средноквадратических отклонений сероводорода

F i g. 6. Mean hydrogen sulfide concentrations, upper and lower intervals of hydrogen sulfide standard deviations

В исходном состоянии через час после загрузки в камеру фоновая концентрация H_2S достигала 0,1 мг/м³. Через 6–18 ч после загрузки в камеру

фоновая концентрация H_2S составляла 0 мг/м^3 . При температуре материала в диапазоне $40\text{--}45 \text{ }^\circ\text{C}$ фоновая концентрация H_2S достигала $0,1 \text{ мг/м}^3$. При температуре материала в диапазоне свыше $55 \text{ }^\circ\text{C}$ фоновая концентрация H_2S составляла $0,08 \text{ мг/м}^3$.



Р и с. 7. Значения средней концентрации аммиака, верхний и нижний интервалы среднеекватричных отклонений аммиака

F i g. 7. Mean ammonia concentrations, upper and lower intervals of ammonia standard deviations

В исходном состоянии через час после загрузки в камеру фоновая концентрация NH_3 составляла $1,34 \text{ мг/м}^3$. Через $6\text{--}18 \text{ ч}$ после загрузки в камеру фоновая концентрация NH_3 достигала $0,42 \text{ мг/м}^3$. При температуре материала в диапазоне $40\text{--}45 \text{ }^\circ\text{C}$ фоновая концентрация NH_3 составляла $1,11 \text{ мг/м}^3$. При температуре материала в диапазоне свыше $55 \text{ }^\circ\text{C}$ фоновая концентрация NH_3 достигала $1,34 \text{ мг/м}^3$.

На рисунках $5\text{--}7$ результаты измерений концентраций выбросов попадают в доверительный интервал оценки среднего значения, следовательно, данные достоверны, сомнительные точки отсутствуют. В соответствии с формулой значения средних концентраций для всех газов (CO_2 , CH_4 , H_2S и NH_3) находятся в пределах ошибок, следовательно, можно говорить об их достоверности.

При обработке результатов исследований было выявлено, что в зависимости от режима исследования и изменения температуры материала наиболее интенсивно изменяются показания концентрации H_2S и NH_3 .

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обоснована и создана лабораторная экспериментальная установка для замеров концентрации климатически активных веществ от разных видов навоза и помета. Экспериментальная установка позволяет имитировать реальные процессы, происходящие при переработке навоза и помета, – самопроизвольный разогрев перерабатываемого материала, в частности за счет его насыщения воздухом при ворошении. Данная установка апробирована на подстилочном навозе телят. Произведена имитация технологии компостирования.

Результаты исследования показали следующее:

1) концентрация углекислого газа после первых 10 ч исследования (температура сырья поднялась с +21,3 до +24,8 °С) падает с 724 до 528,7 мг/м³, после чего возрастает до 541 мг/м³ при разогреве до +57,7 °С. Фоновая концентрация CO₂ с момента загрузки навоза в камеру увеличилась с 362 до 530 мг/м³;

2) концентрация метана оставалась на уровне 0,03 % независимо от времени проведения эксперимента и температуры разогрева навоза из телятника;

3) концентрация H₂S после первых 10 ч исследования (температуры сырья поднялась с +21,3 до +24,8 °С) падает с 0,18 до 0,073 мг/м³, после чего возрастает до 0,173 мг/м³ при разогреве до +57,7 °С. Фоновая концентрация H₂S все время исследования находилась на уровне 0,1 мг/м³;

4) концентрация аммиака динамично увеличивалась весь период исследования с 8,447 мг/м³ через час после загрузки до 11,7 мг/м³ при разогреве до +57,7 °С. Фоновая концентрация NH₃ с момента загрузки навоза в камеру сначала понизилась с 1,34 до 0,42 мг/м³, но к разогреву навоза +57,7 °С повысилась до 1,34 мг/м³.

Оценка полученных в исследовании результатов показала сходимость с результатами других исследователей по метану: концентрация метана при эмиссии от подстильного навоза молодняка КРС в наших исследованиях составила 0,03 % (0,3 г/кг), у китайских исследователей концентрация метана составила 2,4 г/кг от подстильного навоза КРС на откорме [6]; ученые из Канады замеряли концентрацию метана от открытых хранилищ жидкого свиного навоза в течение всех четырех сезонов, значения были получены в диапазоне от 5 г/кг зимой до 155 г/кг летом [7].

Оценка результатов исследования показала, что в дальнейшей работе необходимо собирать большее количество исходных для возможности пересчета концентраций в выбросы и возможности дальнейшего сопоставления результатов с аналогичными зарубежными исследованиями.

В результате анализа полученных экспериментальных данных установлена следующая закономерность: после размещения исследуемого навоза в камере экспериментальной установки по истечению 10 ч навоз «приходит в состояние покоя», при этом концентрации всех исследуемых загрязняющих веществ в выбросах снижаются. Вследствие активации микроорганизмов и запуска процесса переработки методом компостирования происходит саморазогрев навоза, что сопровождается повышением концентрации загрязняющих веществ в выбросах. Данный факт подтверждает, что концентрация в выбросах имеет динамический характер и зависит от стадии переработки навоза.

В дальнейшей перспективе необходимо провести углубленные исследования материалов с увеличением кратности измерений с целью повышения репрезентативности полученных данных и разработать расчетную модель, учитывающую различные варианты технологий обращения с навозом/пометом и позволяющую перейти от полученных в результате исследований концентраций парниковых газов к удельным выбросам. Полученные закономерности и разработка расчетных моделей позволят уточнить данные Национального доклада о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов

не регулируемых Монреальским протоколом⁹. Полученные данные позволят внести вклад в разработку отечественной методики по оценке эмиссии парниковых газов от животноводства и для использования ее при получении данных, подаваемых в Национальный доклад.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пилип Л.В. Метод очистки воздуха от запахообразующих веществ свинокомплексов. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2019;(4):137–146. <https://doi.org/0.24411/0131-5226-2019-10221>
2. Джаббаров Н.И., Мишанов А.П., Добринов А.В. Прогнозирование выбросов парниковых газов в растениеводстве от уровня применяемых технологий. *АгроЭкоИнженерия*. 2024;(1):70–82. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-1118-70-82>
3. Вторый В.Ф., Вторый С.В. Влияние системы удаления навоза на концентрацию аммиака в коровниках с беспривязным содержанием. *АгроЭкоИнженерия*. 2024;(2):104–117. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-2119-104-116>
4. Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Шалавина Е.В., Уваров Р.А., Субботин И.А. Метод решения экологических проблем при обращении с навозом и пометом. *Молочнохозяйственный вестник*. 2017;(3):84–96. <https://elibrary.ru/zmnxsx>
5. Васильев Э.В., Шалавина Е.В. Изменение содержания азота и фосфора в жидкой фракции свиного навоза при биологической очистке. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2014;(85):146–150. <https://elibrary.ru/sydaqr>
6. Kaharabata S.K., Schuepp P.H., Desjardins R.L. Methane Emissions from Above Ground Open Manure Slurry Tanks. *Global Biogeochemical Cycles*. 1998;12(3):545–554. <https://doi.org/10.1029/98GB01866>
7. Sommer S.G., Petersen S.O., Søgaard H.T. Greenhouse Gas Emission from Stored Live-stock Slurry. *Journal of Environmental Quality*. 2000;29(3):744–751. <https://doi.org/10.2134/jeq2000.00472425002900030009x>
8. Hellebrand H.J., Kalk W.-D. Emission of Methane, Nitrous Oxide, and Ammonia from Dung Windrows. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2001;60:83–87. <https://doi.org/10.1023/A:1012662823291>
9. Berg W., Brunsch R., Pazsiczki I. Greenhouse Gas Emissions from Covered Slurry Compared with Uncovered During Storage. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2006;112(2–3):129–134. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.08.031>
10. Hudson N.A., Ayoko G.A., Dunlop M.W., Duperouzel D., Burrell D., Bell K., et al. Comparison of Odour Emission Rates Measured from Various Sources Using Two Sampling Devices. *Bioresource Technology*. 2009;100(1):118–124. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.043>
11. Zhu H., Dong H., Zuo F., Yuan F., Rao J. Effect of Covering on Greenhouse Gas Emissions from Beef Cattle Solid Manure Stored at Different Stack Heights. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2014;30:225–231. URL: <https://www.ingentaconnect.com/content/tcsae/tcsae/2014/00000030/00000024/art00027;jsessionid=1krm4xm5vumnl.x-ic-live-03> (дата обращения: 01.06.2025).
12. Trabue S.L., Kerr B.J., Bearson B.L., Hur M., Parkin T., Wurtele E.S., et al. Microbial Community and Chemical Characteristics of Swine Manure During Maturation. *Journal of Environmental Quality*. 2016;45(4):1144–1152. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.09.0446>
13. Powers W., Capelari M. Analytical Methods for Quantifying Greenhouse Gas Flux in Animal Production Systems. *Journal of Animal Science*. 2016;94(8):3139–3146. <https://doi.org/10.2527/jas.2015-0017>
14. Holly M.A., Larson R.A., Powell J.M., Ruark M.D., Aguirre-Villegas H. Greenhouse Gas and Ammonia Emissions from Digested and Separated Dairy Manure During Storage and

⁹ Национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2021 гг.

- after Land Application. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2017;239:410–419. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.007>
15. Vorobel M., Klym O., Kaplinskyi V., Ivan L., Grabovskiy S., Taras P., et al. Reduction of the Greenhouse Gas Emissions from the Pig Manure Using Inorganic Substances. *Scientific Papers. Series D. Animal Science*. 2023;(2):421–427. URL: https://animalsciencejournal.usamv.ro/pdf/2023/issue_2/Art49.pdf (дата обращения: 01.06.2025).
 16. Kerr B.J., Trabue S.L., Andersen D.S., Van Weelden M.B., Pepple L.M. Dietary Composition and Particle Size Effects on Swine Manure Characteristics and Gas Emissions. *Journal of Environmental Quality*. 2020;49(5):1384–1395. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20112>
 17. Cattaneo M., Tayà C., Burgos L., Morey L., Noguerol J., Provolo G., et al. Assessing Ammonia and Greenhouse Gas Emissions from Livestock Manure Storage: Comparison of Measurements with Dynamic and Static Chambers. *Sustainability*. 2023;15(22):15987. <https://doi.org/10.3390/su152215987>
 18. Фахреев Н.Н., Дыганова Р.Я. Программный комплекс оценки полигонов хранения органических отходов в птицеводческих комплексах. *Академический вестник ЕЛПИТ*. 2019;4(1):49–56. <https://elibrary.ru/pbgbj>
 19. Posse G., Lewczuk N., Richter K., Hilbert J. Field Measurements of Agricultural Emissions. *Bioenergy and Latin America: A Multi Country Perspective*. 2015:53–60. URL: https://www.researchgate.net/publication/304917594_Field_measurements_of_agricultural_emissions (дата обращения: 01.06.2025).
 20. Pumpanen J., Kolari P., Ilvesniemi H., Minkkinen K., Vesala T., Niinistö S., et al. Comparison of Different Chamber Techniques for Measuring Soil CO₂ Efflux. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2004;123(3–4):159–176. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.12.001>
 21. Rochette P. Towards a Standard Non-Steady-State Chamber Methodology for Measuring Soil N₂O Emissions. *Animal Feed Science and Technology*. 2011;166–167:141–146. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.063>
 22. Clough T.J., Rochette P., Thomas S.M., Pihlatie M., Christiansen J.R., Thorman R.E. Global Research Alliance N₂O Chamber Methodology Guidelines: Design Considerations. *Journal of Environmental Quality*. 2020;49(5):1081–1091. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20117>
 23. Fiedler J., Fuß R., Glatzel S., Hagemann U., Huth V., Jordan S., et al. Measurement of Carbon Dioxide, Methane and Nitrous Oxide Fluxes between Soil-Vegetation-Systems and the Atmosphere Using Non-Steady State Chambers. *Best Practice Guideline*. 2022. 70 p. <https://doi.org/10.23689/figeo-5422>
 24. Шахматов К.Л., Орлов Т.В., Суворов Г.Г., Чердниченко О.В., Фурса Ю.В., Моченов С.Ю., и др. Апробация методов площадной оценки эмиссии парниковых газов на осушенных торфяниках Северо-Запада России с помощью GEST-подхода на примере торфяника Дедово поле. *Труды Инсторфа*. 2023;(28):10–20. <https://elibrary.ru/hkerql>
 25. Казанцев В.С., Кривенок Л.А., Чербунина М.Ю., Котов П.И. Эмиссия парниковых газов из природных экосистем Норильского промышленного района. *Арктика и Антарктика*. 2023;(4):19–41. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2023.4.69058>

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, Фильтровское ш., д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4963-3821>, Researcher ID: B-7550-2018, sznii@ya.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, Фильтровское ш., д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5910-5793>, Researcher ID: C-1304-2018, sznii6@yandex.ru

Базыкин Валентин Игоревич, 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/0000-0001-6417-6433>, Researcher ID: P-4694-2015, valentin-bazykin@mail.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, shalavinaev@mail.ru

Вклад авторов:

А. Ю. Брюханов – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования.

Э. В. Васильев – формулирование идеи исследования, целей и задач; разработка методологии исследования.

В. И. Базыкин – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных.

Е. В. Шалавина – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 07.02.2025; поступила после рецензирования 25.02.2025; принята к публикации 06.03.2025

REFERENCES

1. Pilip L.V. Method of Air Cleaning from Odor-Forming Substances Originating From Pig Complexes. *Tekhnologii i Tekhnicheskie Sredstva Mekhanizirovannogo Proizvodstva Produktii Rastenievodstva i Zhivotnovodstva*. 2019;(4):137–146. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/0.24411/0131-5226-2019-10221>
2. Dzhabborov N.I., Mishanov A.P., Dobrinov A.V. Forecasting of Greenhouse Gas Emissions in Crop Production Depending on Applied Technology Level. *AgroEcoEngineering*. 2024;(1):70–82 (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-1118-70-82>
3. Vtoryi V.F., Vtoryi S.V. Effect of Manure Removal System on Ammonia Concentration in Loose Housing Barns. *AgroEcoEngineering*. 2024;(2):104–117. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-2119-104-116>
4. Bryukhanov A.Yu., Vasilev E.V., Shalavina E.V., Uvarov R.A., Subbotin I.A. Method of Environmental Problem Solution in Manure Management. *Molochnokhozyaistvenny Vestnik*. 2017;(3):84–96. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/zmnssx>
5. Vasilev E.V., Shalavina E.V. Change in Nitrogen and Phosphorus Content During Biological Treatment of Liquid Fraction of Pig Manure. *Tekhnologii i Tekhnicheskie Sredstva Mekhanizirovannogo Proizvodstva Produktii Rastenievodstva i Zhivotnovodstva*. 2014;(85):146–150. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/sydaqr>
6. Kaharabata S.K., Schuepp P.H., Desjardins R.L. Methane Emissions from Above Ground Open Manure Slurry Tanks. *Global Biogeochemical Cycles*. 1998;12(3):545–554. <https://doi.org/10.1029/98GB01866>

7. Sommer S.G., Petersen S.O., Søgaard H.T. Greenhouse Gas Emission from Stored Livestock Slurry. *Journal of Environmental Quality*. 2000;29(3):744–751. <https://doi.org/10.2134/jeq2000.00472425002900030009x>
8. Hellebrand H.J., Kalk W.-D. Emission of Methane, Nitrous Oxide, and Ammonia from Dung Windrows. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2001;60:83–87. <https://doi.org/10.1023/A:1012662823291>
9. Berg W., Brunsch R., Pazsiczki I. Greenhouse Gas Emissions from Covered Slurry Compared with Uncovered During Storage. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2006;112(2–3):129–134. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.08.031>
10. Hudson N.A., Ayoko G.A., Dunlop M.W., Duperouzel D., Burrell D., Bell K., et al. Comparison of Odour Emission Rates Measured from Various Sources Using Two Sampling Devices. *Bioresource Technology*. 2009;100(1):118–124. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.043>
11. Zhu H., Dong Heming, Zuo F., Yuan F., Rao J. Effect of Covering on Greenhouse Gas Emissions from Beef Cattle Solid Manure Stored at Different Stack Heights. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2014;30:225–231. Available at: <https://www.ingentaconnect.com/content/tcsae/tcsae/2014/00000030/00000024/art00027;jsessionid=1krm4xm5vumnl.x-ic-live-03> (accessed 01.06.2025).
12. Trabue S.L., Kerr B.J., Bearson B.L., Hur M., Parkin T., Wurtele E.S., et al. Microbial Community and Chemical Characteristics of Swine Manure During Maturation. *Journal of Environmental Quality*. 2016;45(4):1144–1152. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.09.0446>
13. Powers W., Capelari M. Analytical Methods for Quantifying Greenhouse Gas Flux in Animal Production Systems. *Journal of Animal Science*. 2016;94(8):3139–3146. <https://doi.org/10.2527/jas.2015-0017>
14. Holly M.A., Larson R.A., Powell J.M., Ruark M.D., Aguirre-Villegas H. Greenhouse Gas and Ammonia Emissions from Digested and Separated Dairy Manure During Storage and after Land Application. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2017;239:410–419. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.007>
15. Vorobel M., Klym O., Kaplinskyi V., Ivan L., Grabovskyi S., Taras P., et al. Reduction of the Greenhouse Gas Emissions from the Pig Manure Using Inorganic Substances. *Scientific Papers. Series D. Animal Science*. 2023;(2):421–427. Available at: https://animalsciencejournal.usamv.ro/pdf/2023/issue_2/Art49.pdf (accessed 01.06.2025).
16. Kerr B.J., Trabue S.L., Andersen D.S., Van Weelden M.B., Pepple L.M. Dietary Composition and Particle Size Effects on Swine Manure Characteristics and Gas Emissions. *Journal of Environmental Quality*. 2020;49(5):1384–1395. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20112>
17. Cattaneo M., Tayà C., Burgos L., Morey L., Noguero J., Provolo G., et al. Assessing Ammonia and Greenhouse Gas Emissions from Livestock Manure Storage: Comparison of Measurements with Dynamic and Static Chambers. *Sustainability*. 2023;15(22):15987. <https://doi.org/10.3390/su152215987>
18. Fakhreev N.N., Dyganova R.Ya. [Program Complex of Assessment of Organic Waste Storage Landfills in Poultry Farms]. *Academic Bulletin ELPIT*. 2019;4(1):49–56. (In Russ.) <https://elibrary.ru/pbgbrj>
19. Posse G., Lewczuk N., Richter K., Hilbert J. Field Measurements of Agricultural Emissions. *Bioenergy and Latin America: A Multi Country Perspective*. 2015:53–60. Available at: https://www.researchgate.net/publication/304917594_Field_measurements_of_agricultural_emissions (accessed 01.06.2025).
20. Pumpanen J., Kolari P., Ilvesniemi H., Minkkinen K., Vesala T., Niinistö S., et al. Comparison of Different Chamber Techniques for Measuring Soil CO₂ Efflux. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2004;123(3–4):159–176. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.12.001>
21. Rochette P. Towards a Standard Non-Steady-State Chamber Methodology for Measuring Soil N₂O Emissions. *Animal Feed Science and Technology*. 2011;166–167:141–146. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.063>

22. Clough T.J., Rochette P., Thomas S.M., Pihlatie M., Christiansen J.R., Thorman R.E. Global Research Alliance N₂O Chamber Methodology Guidelines: Design Considerations. *Journal of Environmental Quality*. 2020;49(5):1081–1091. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20117>
23. Fiedler J., Fuß R., Glatzel S. Hagemann U. Huth V., Jordan S., et al. Measurement of Carbon Dioxide, Methane and Nitrous Oxide Fluxes between Soil-Vegetation-Systems and the Atmosphere Using Non-Steady State Chambers. *Best Practice Guideline*. 2022. 70 p. <https://doi.org/10.23689/fidgeo-5422>
24. Shakhmatov K.L., Orlov T.V., Suvorov G.G., Cherednichenko O.V., Fyrsa Yu.V., Mochenov S.Yu., et al. Approbation of Methods for Area Assessment of Greenhouse Gas Emissions on Drained Peatlands in the North West of Russia Using the Gest Approach on the Example of the Dedovo Pole Peatland. *Trudy Instorfa*. 2023;(28):10–20. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/hkerql>
25. Kazantsev, V.S., Krivenok, L.A., Cherbunina, M.Y., Kotov, P.I. Greenhouse Gas Emissions from Natural Ecosystems of the Norilsk Industrial District. *Arctic and Antarctica*. 2023;(4):19–41. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2023.4.69058>

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 (IEEP) – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, St. Petersburg 196634, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4963-3821>, Researcher ID: B-7550-2018, sznii@ya.ru

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

Valentin I. Bazykin, Researcher of the Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, St. Petersburg 196634, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6417-6433>, Researcher ID: P-4694-2015, valentin-bazykin@mail.ru

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

Authors contribution:

A. Yu. Briukhanov – oversight and leadership responsibility for planning and conducting the study, including mentorship external to the core team.

E.V. Vasilev – formulating the study ideas, aims and objectives; developing the study methodology.

V. I. Bazykin – conducting the study, specifically performing the experiments or collecting data.

E. V. Shalavina – conducting the study, specifically performing the experiments, or collecting data; preparing and presenting the manuscript, specifically visualizing the study results and the obtained data.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 07.02.2025; revised 25.02.2025; accepted 06.03.2025