

Изменение концентрации климатически активных веществ в эмиссии от систем переработки различных видов жидкого навоза

© 2026. Э. В. Васильев, В. И. Базыкин, Е. В. Шалавина , С. А. Егоров

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Количество выбросов климатически активных веществ зависит от технологии и режима переработки навоза. Существующие методики для расчета объема выбросов климатически активных веществ основаны на укрупненных коэффициентах, без учета климатических зон и применяемых технологий переработки навоза. Цель исследования – определить концентрации климатически активных веществ в эмиссии в зависимости от систем переработки различных видов жидкого навоза. Исследования проводили на экспериментальной установке с возможностью имитации различных условий переработки твердого и жидкого навоза объемом 0,0625 м³. В качестве исследуемого материала использовали жидкий навоз крупного рогатого скота (КРС), жидкий свиной навоз, жидкая фракция навоза КРС и жидкая фракция свиного навоза. Измерение концентрации CO₂, CH₄, H₂S, и NH₃ осуществляли газоанализатором «ЭЛАН плюс». Концентрацию N₂O определяли в газовом хроматографе «Кристаллюкс-4000М». Концентрация газов в жидком навозе КРС составила: CO₂ – 537–539 мг/м³, CH₄ – 0,02–0,03 %, H₂S – 0,147–0,367 мг/м³, NH₃ – 1,97–4,34 мг/м³, в жидкой фракции навоза КРС следующая: CO₂ – 537–538 мг/м³, CH₄ – 0,02 %, H₂S – 0,367–0,327 мг/м³, NH₃ – 2,53–4,08 мг/м³, в жидком свином навозе – CO₂ – 537–718 мг/м³, CH₄ – 0,02 %, H₂S – 0,12–0,177 мг/м³, NH₃ – 4,69–6,97 мг/м³, в жидкой фракции свиного навоза – CO₂ – 537–592 мг/м³, CH₄ – 0,01–0,02 %, H₂S – 0,08–0,20 мг/м³, NH₃ – 1,57–2,72 мг/м³. Полученные в результате исследования значения концентраций климатически активных веществ при переработке жидкого навоза КРС и жидкой фракции навоза КРС сопоставимы с результатами аналогичных исследований, отличия составляют менее 20 %.

Ключевые слова: сельское хозяйство, животноводство, системы переработки навоза, концентрации газов

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (тема № FGUN-2025-0010).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.


Для цитирования: Васильев Э. В., Базыкин В. И., Шалавина Е. В., Егоров С. А. Изменение концентрации климатически активных веществ в эмиссии от систем переработки различных видов жидкого навоза. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2026;27(1):240–250. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.1.240-250>

Поступила: 24.06.2025

Принята к публикации: 04.02.2026

Опубликована онлайн: 27.02.2026

Variation in concentration of climate-active substances in emissions from different types of liquid manure processing systems

© 2026. Eduard V. Vasilev, Valentin I. Bazykin, Ekaterina V. Shalavina , Semen A. Egorov

Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Saint Petersburg, Russian Federation

The amount of climate-active substances emissions depends on the technology and the mode of manure processing. Current methodologies for calculating these emissions are based on aggregated coefficients that do not consider climatic zones or the manure processing technologies in place. The aim of the study was to determine the concentration of climate-active substances in the emissions in dependence to the processing systems of different types of liquid manure. The research was carried out using the experimental unit with a volume of 0.0625 m³ that was designed to simulate the processing of solid and liquid manure under different conditions. As the research material there was used liquid cattle manure, pig liquid manure, and the liquid fractions of both cattle and pig manure. Concentrations of CO₂, CH₄, H₂S, and NH₃ were measured with an ELAN Plus gas analyzer. N₂O concentration was determined in a gas chromatograph “Crystallux-4000M”. Concentration of CO₂ in liquid cattle manure was found to be 537–539 mg/m³, CH₄ – 0.02–0.03 %, H₂S – 0.147–0.367 mg/m³, and NH₃ – 1.97–4.34 mg/m³. Concentration of CO₂ in liquid fraction of cattle manure was found to be 537–538 mg/m³, CH₄ – 0.02 %, H₂S – 0.367–0.327 mg/m³, and NH₃ – 2.53–4.08 mg/m³. Concentration of CO₂ in pig liquid manure was found to be 537–718 mg/m³, CH₄ – 0.02 %, H₂S – 0.12–0.177 mg/m³, and NH₃ – 4.69–6.97 mg/m³. Concentration of CO₂ in liquid fraction of pig manure was found to be 537–592 mg/m³, CH₄ – 0.01–0.02 %, H₂S – 0.08–0.20 mg/m³, and NH₃ – 1.57–2.72 mg/m³. The obtained concentrations of climate-active substances in the emission from processing of liquid cattle manure and its liquid fraction were comparable with the results of similar studies. The differences were less than 20 %.

Keywords: agriculture, animal husbandry, manure processing systems, gas concentrations

Acknowledgement: the research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (theme No. FGUN-2025-0010).

The authors are grateful to reviewers for their contribution to expert assessment of the work.

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

For citation: Vasilev E. V., Bazykin V. I., Shalavina E. V., Egorov S. A. Variation in concentration of climate-active substances in emissions from different types of liquid manure processing systems. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*. 2026;27(1):240–250. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.1.240-250>

Received: 24.06.2025

Accepted for publication: 04.02.2026

Published online: 27.02.2026

Интенсивное производство продукции агропромышленного комплекса, в частности животноводческой продукции, связано с образованием значительных объемов навоза, а также выбросом в атмосферу климатически активных веществ [1, 2]. Эти вещества образуются на каждом технологическом этапе, начиная с момента образования навоза в помещениях для содержания животных и заканчивая внесением полученных удобрений в почву [3, 4].

Для расчета объема выбросов климатически активных веществ используются Методические рекомендации по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации (далее по тексту – Методические рекомендации¹), в которых обоснованы три метода расчета: первый – уровня 1; второй – уровня 2; третий – уровня 2 на основе аналитических данных. Первый метод уровня 1 подразумевает укрупненный расчет с учетом коэффициентов по умолчанию (умножение поголовья на коэффициент). Погрешность данного метода может составлять более 50 %. Второй метод уровня 2 подразумевает использование для расчетов исходных данных предприятия (привесы животных, продуктивность, рационы кормления и т. д.). Однако коэффициенты, отражающие технологии переработки навоза, приведены укрупненно для всей территории Российской Федерации без учета климатических зон. Погрешность этого метода составляет до 30 %. Третий метод уровня 2 на основе аналитических данных подразумевает отбор проб воздуха и навоза. Результаты, полученные на основании фактических замеров, имеют наименьшую погрешность – до 20 %.

В зависимости от применяемых технологий и режимов переработки навоза меняется количество выбросов климатически активных

веществ, которые влияют на коэффициенты, участвующие в расчетных моделях [5, 6]. Эмиссии этих газов зависят также от рациона кормления животных [7, 8]. Поэтому реальные замеры концентраций газов от навоза при его переработке позволяют уточнить коэффициенты, отраженные в указанных Методических рекомендациях, и скорректировать данные, подаваемые от Российской стороны в Национальный доклад² о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, нерегулируемых Монреальским протоколом.

Проблема оценки и фактического замера эмиссии парниковых газов актуальна во всем мире, так как эта эмиссия значительно зависит от технологий переработки навоза и помета, режима их работы, химического состава сырья и региона расположения животноводческого комплекса [9].

Для определения концентраций климатически активных веществ от систем переработки навоза применяются различные методы замеров, учитывающие вид навоза (твердый или жидкий) и используемую технологию переработки [10, 11]. В Российской Федерации переработка жидкого навоза в основном осуществляется в открытых гидроизолированных хранилищах. Следовательно, при проведении исследований по замеру концентрации климатически активных веществ целесообразнее использовать динамическую (вентилируемую) камеру, которая наиболее приближена к погодным условиям (ветрам). Методы анализа проб воздуха от различных типов хранилищ тоже отличаются [12].

Цель исследования – определить концентрации климатически активных веществ в эмиссии в зависимости от систем переработки различных видов жидкого навоза.

¹Распоряжение Минприроды России от 16.04.2015 N 15-р «Об утверждении методических рекомендаций по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации». [Электронный ресурс]. URL: <https://rulaws.ru/acts/Rasporyazhenie-Minprirody-Rossii-ot-16.04.2015-N-15-r/> (дата обращения: 12.05.2025 г.).

²Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2020 гг. Москва, 2022. [Электронный ресурс]. URL: http://downloads.igcc.ru/kadastr/RUS_NIR-2022_v2.pdf (дата обращения: 12.05.2025).

Задачи исследования:

1. Обоснование конструкции экспериментальной установки для определения концентраций климатически активных веществ при переработке различных видов жидкого навоза.

2. Разработка программы и методики проведения исследований по определению концентраций климатически активных веществ при переработке различных видов жидкого навоза.

3. Проведение экспериментальных исследований по определению концентраций климатически активных веществ в эмиссии от систем переработки различных видов жидкого навоза.

4. Математическая обработка полученных результатов, их анализ и оценка сходимости с результатами аналогичных зарубежных исследований.

Научная новизна – моделирование реальных условий переработки различных видов жидкого навоза путем имитации естественной среды внутри камеры экспериментальной установки с целью определения закономерностей изменения концентраций климатически активных веществ в эмиссии от систем переработки различных видов жидкого навоза с дальнейшей перспективой разработки расчётной модели, учитывающей различные варианты технологий обращения с навозом и позволяющей перейти от полученных в результате исследований концентраций парниковых газов к удельным выбросам, позволяющим уточнить данные Национального доклада о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов нерегулируемых Монреальским протоколом.

Материал и методы. Для определения эмиссии климатически активных веществ использовалась методология, отраженная в указанных выше Методических рекомендациях. Методология подразумевает деление всего навоза на два типа: жидкий и сухой. В качестве граничного значения, разделяющего сухой и жидкий навоз, принимается 20 % содержания сухого вещества: влажность более 80 % – жидкий навоз; менее 80 % – сухой навоз. Однако на многих комплексах крупного рогатого скота (КРС) молочного направления и свиноводческих комплексах применяется блок – разделение

исходного навоза на фракции, после которого образуется в том числе и жидкая фракция навоза с влажностью более 80 %, но отличающаяся по своим химическим показателям от исходного. В процессе переработки методом длительного выдерживания, происходит саморазогрев смеси за счет работы микроорганизмов. В зависимости от содержания сухого вещества в жидком навозе скорость саморазогрева имеет разные значения. Соответственно эмиссии климатически активных веществ при переработке исходного навоза и его жидкой фракции будут отличаться. Поэтому для исследования были использованы 4 варианта жидкого навоза: жидкий навоз КРС; жидкий свиной навоз; жидкая фракция свиного навоза (после разделения жидкого свиного навоза на фракции на шнековом сепараторе); жидкая фракция навоза КРС (после разделения жидкого навоза КРС на фракции на шнековом сепараторе). Учитывая, что навоз с комплекса КРС и со свиноводческого комплекса имеет различный химический состав, пробы отбирались с обоих комплексов.

Жидкий навоз для исследований был отобран с животноводческих комплексов, расположенных в Северо-Западном ФО (Ленинградская область). Характеристики исследуемого навоза приведены в таблице 1. Анализ свойств материала выполняли в аналитической лаборатории ИАЭП – филиале ФГБНУ ФНАЦ ВИМ в соответствии с инструкциями к средствам измерения, ГОСТ 26713-85³, ГОСТ 27980-88⁴ и ГОСТ 26715-85⁵. Объем материала соответствовал объему нижней камеры установки – 0,0625 м³.

Исследования проводили на экспериментальной установке, разработанной в 2024 году в ИАЭП – филиале ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (рис. 1).

Установка состоит из рамы 1, емкости для слива жидкого материала 2, герметичной камеры 3, входного и выходного воздуховодов 4, 5. Герметичная камера включает в себя верхнюю часть объемом 0,0625 м³ (каркас из нержавеющей труб, обшитый прозрачным акрилом) и нижнюю часть объемом 0,0625 м³ (накопитель из нержавеющей стали). На дне накопителя установлен сливной затвор для слива жидкого материала в специальную емкость.

³ГОСТ 26713-85. Удобрения органические. Методы анализа. М.: Изд-во стандартов, 1986. 6 с.

URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294827/4294827741.pdf>

⁴ГОСТ 27980-88. Удобрения органические. Методы определения органического вещества. М.: Изд-во стандартов, 1986. 11 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294826/4294826787.pdf>

⁵ГОСТ 26715-85. Удобрения органические. Методы определения общего азота. М., 1985. 12 с.

URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294827/4294827739.pdf>

Таблица 1 – Характеристики исследуемого навоза /
Table 1 – Characteristics of the studied manure

Вид навоза / Type of manure	Влажность, % / Moisture content, %	Органический углерод, % на а.с.в. / Organic carbon, % of absolutely dry matter	Массовая доля азота / Mass fraction nitrogen		
			аммонийного, % на н.в. / ammonium, % on native manure	нитратного, мг/100 г / nitrate, mg/100 g	общего, % на н.в. / total, % on native manure
Жидкий навоз КРС / Liquid cattle manure	91,6	44,6	0,12	13,8	0,36
Свиной навоз / Pig manure	96,1	38,9	0,10	33,8	0,28
Жидкая фракция навоза КРС / Liquid fraction of cattle manure	96,8	40,1	0,11	10,2	0,25
Жидкая фракция свиного навоза / Liquid fraction of pig manure	98,36	37,1	0,12	16,1	0,18

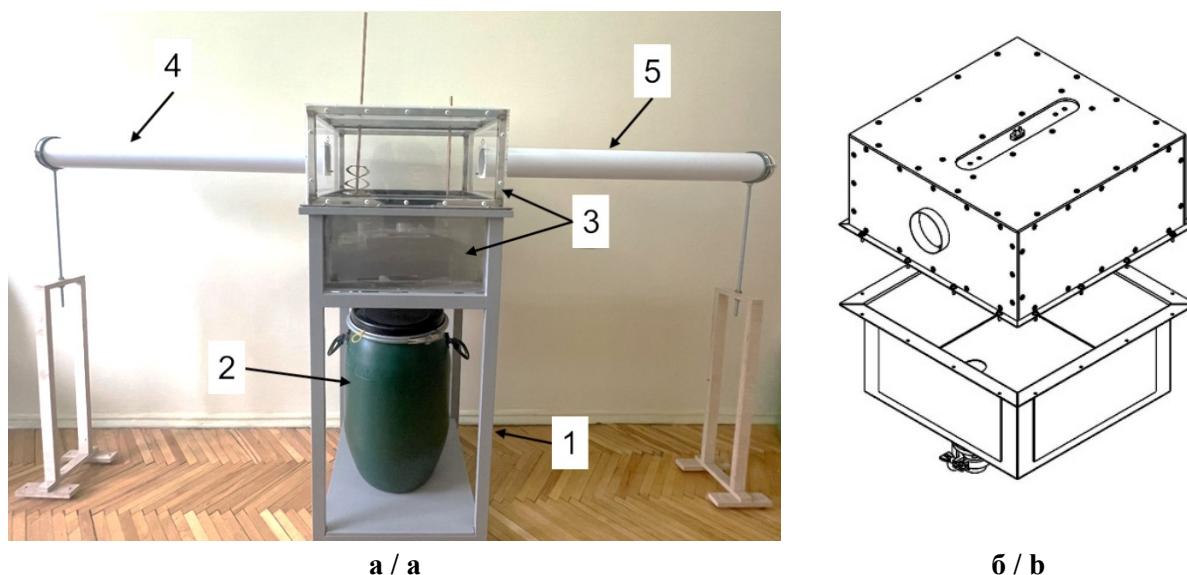


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки: а) экспериментальная установка: 1 – рама; 2 – емкость для слива жидкого материала; 3 – герметичная камера; 4 – входной воздуховод; 5 – выходной воздуховод; б) модель герметичной камеры /

Fig. 1. General view of the experimental unit: а) experimental unit: 1 – frame; 2 – tank for drained liquid material; 3 – airtight chamber; 4 – inlet duct; 5 – outlet duct; б) model of airtight chamber

С противоположных сторон верхней части герметичной камеры расположены воздуховоды, на концах которых закреплены канальные вентиляторы для аэрации и воздухообмена.

Для нагрева материала предусмотрен подогрев ёмкости из нержавеющей стали специальными силиконовыми нагревателями, закрепленными на дне емкости с внешней стороны.

Процесс перемешивания материала обеспечивается двумя съемными миксерами, установленными в верхней части камеры (рис. 2). Привод миксеров осуществляется с помощью аккумуляторной дрели-шуруповерта. Нагрев материала и его периодическое перемешивание имитируют хранение и переработку навоза

в различных условиях. В данном исследовании имитировали технологию длительного выдерживания.

Проведение исследования разделено на 3 этапа:

Этап 1 – загрузка навоза в камеру, выдерживание одного часа и измерение концентрации климатически активных веществ (без подогрева).

Этап 2 – измерение концентрации климатически активных веществ через 10 часов после загрузки навоза в камеру (без подогрева).

Этап 3 – измерение концентрации климатически активных веществ после нагрева навоза до температуры 35–40 °С.



а / а



б / б

Рис. 2. Верхняя часть камеры (прозрачный колпак): а) установленные миксеры; б) жидкий навоз в нижней части герметичной камеры /

Fig. 2. Upper part of the chamber (transparent hood): a) installed mixers; b) liquid manure in the bottom of the airtight chamber

Перемешивание навоза осуществляли с определённой периодичностью на каждом этапе исследования. На третьем этапе производили дополнительные перемешивания материала для его более равномерного нагрева.

Канальные вентиляторы включали за час до проведения замеров и выключали между этапами исследования.

Температуру навоза измеряли в трех точках с помощью контактного термометра ТК-5.04С с погружным усиленным зондом ЗПУ8.1000, на основе этих данных вычисляли среднюю температуру навоза.

Концентрации CO_2 , CH_4 , H_2S и NH_3 определяли с использованием цифрового газоанализатора «ЭЛАН плюс». Измерение концентрации N_2O проводили на газовом хроматографе «Кристаллюкс-4000М» в ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт». Пробы воздуха отбирали из воздуховода с помощью шприца и закачивали в герметичные флаконы. Схема проведения отбора проб представлена на рисунке 3.

Влажность и температуру воздушного потока определяли переносным цифровым гигрометром Center 315 в соответствии с ГОСТ 17.2.4.07⁶, скорость воздушного потока – переносным цифровым термоанемометром Testo 405i согласно ГОСТ 17.2.4.06⁷ и ГОСТ Р ЕН 15259⁸, массу исследуемого навоза во время загрузки – с помощью весов ТВ-S-200.2-A2.

Эксперимент проводили в трех повторностях. Полученные данные были обработаны методами математической статистики в программе Microsoft EXCEL. Оценку погрешности средних значений определяли с учетом критерия Стьюдента (для уровня вероятности 0,9).

Результаты и их обсуждение. Исследование образцов навоза выполняли по каждому виду в отдельности (табл. 1). Значения средних концентраций находятся в интервале среднеквадратичных отклонений, т. е. данные достоверны, сомнительные точки отсутствуют. Значения средних концентраций для всех газов находятся в пределах допустимых ошибок, что свидетельствует об их достоверности.

⁶ГОСТ 17.2.4.07. Охрана природы. Атмосфера. Методы определения давления и температуры газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения. М.: Стандартинформ, 2008. 7 с.

URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/5d8/4294849062.pdf>

⁷ГОСТ 17.2.4.06. Охрана природы. Атмосфера. Методы определения Скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения. М.: изд-во стандартов, 1991. 20 с.

URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/a01/4294847492.pdf>

⁸ГОСТ Р ЕН 15259. Качество воздуха. Выбросы стационарных источников. Требования к выбору измерительных секций и мест измерений, цели и плану измерений и составлению отчета. М.: Стандартинформ, 2015. 65 с.

URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293758/4293758322.pdf>

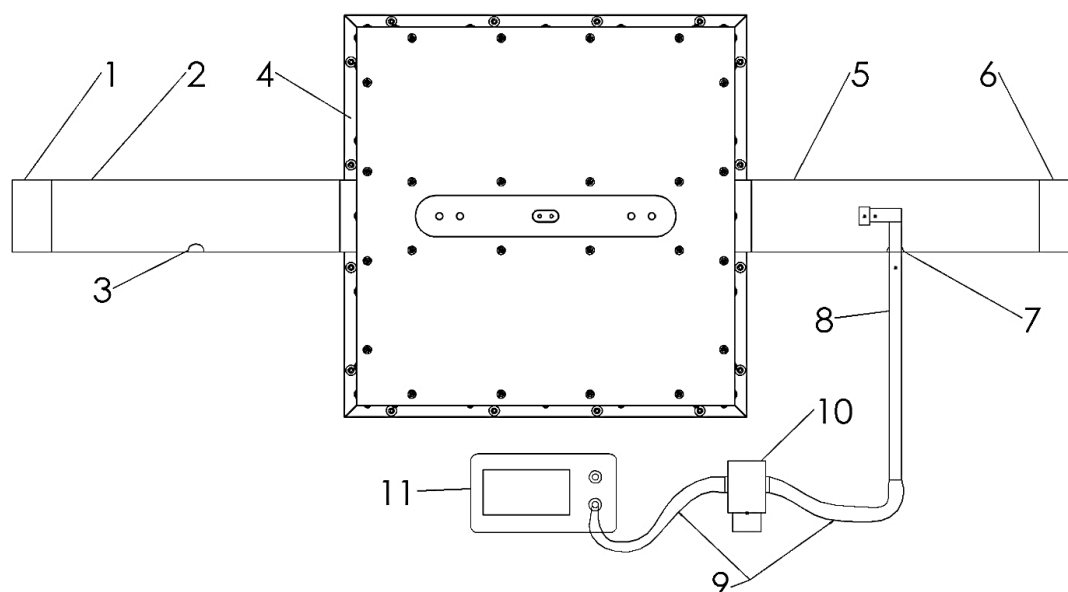


Рис. 3. Схема отбора пробы из воздуховода: 1 – канальный вентилятор входного воздуховода; 2 – входной воздуховод; 3, 7 – точка отбора проб; 4 – герметичная камера; 5 – выходной воздуховод; 6 – канальный вентилятор выходного воздуховода; 8 – пробоотборный зонд из нержавеющей стали; 9 – фторопластовые трубки; 10 – каплеуловитель; 11 – газоанализатор /

Fig. 3. Diagram of sampling from the duct: 1 – duct fan of the inlet duct; 2 – inlet duct; 3, 7 – sampling point; 4 – airtight chamber; 5 – outlet duct; 6 – duct fan of the outlet duct; 8 – stainless steel sampling probe; 9 – PTFE tubing; 10 – liquid trap; 11 – gas analyzer

Средняя температура и концентрации при замерах от перерабатываемого жидкого климатически активных веществ, полученные навоза, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Средняя температура навоза и концентрации выделяемых климатически активных веществ при исследовании разных видов жидкого навоза /

Table 2 – Average temperature of manure and concentrations of released climate-active substances in the study of different types of liquid manure

Вид навоза / Type of manure	Температура навоза, °C / Manure temperature, °C	Концентрация / Concentration			
		CO ₂ , мг/м ³ / mg/m ³	CH ₄ , %	H ₂ S, мг/м ³ / mg/m ³	NH ₃ , мг/м ³ / mg/m ³
1	2	3	4	5	6
Этап 1 / Stage 1					
Жидкий навоз КРС / Liquid cattle manure	24	537	0,02	0,147	1,97
Жидкий свиной навоз / Liquid pig manure	24,1	537	0,02	0,12	4,693
Жидкая фракция навоза КРС / Liquid fraction of cattle manure	24	537,3	0,02	0,367	2,537
Жидкая фракция свиного навоза / Liquid fraction of pig manure	24,3	539	0,02	0,087	1,577
Этап 2 / Stage 2					
Жидкий навоз КРС / Liquid cattle manure	24	539	0,02	0,223	3,343
Жидкий свиной навоз / Liquid pig manure	24	718	0,02	0,177	4,417
Жидкая фракция навоза КРС / Liquid fraction of cattle manure	24	537	0,02	0,22	2,697
Жидкая фракция свиного навоза / Liquid fraction of pig manure	23,3	592,3	0,017	0,12	1,697

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6
Этап 3 / Stage 3					
Жидкий навоз КРС / Liquid cattle manure	35	539,3	0,03	0,367	4,343
Жидкий свиной навоз / Liquid pig manure	40,3	718	0,02	0,177	6,917
Жидкая фракция навоза КРС / Liquid fraction of cattle manure	35,3	538,3	0,027	0,327	4,083
Жидкая фракция свиного навоза / Liquid fraction of pig manure	35,7	537,7	0,027	0,203	2,727

Примечания: этап 1 – загрузка навоза в камеру, выдерживание одного часа и измерение концентрации климатически активных веществ (без подогрева); этап 2 – измерение концентрации климатически активных веществ через 10 часов после загрузки навоза в камеру (без подогрева); этап 3 – измерение концентрации климатически активных веществ после нагрева навоза до температуры 35-40 °С /

Notes: stage 1 – loading manure into the chamber, holding for one hour and measuring the concentration of climatically active substances (without heating); stage 2 – measuring the concentration of climatically active substances 10 hours after loading manure into the chamber (without heating); stage 3 – measuring the concentration of climatically active substances after heating the manure to a temperature of 35-40 °С

Фоновая концентрация N₂O при замерах для жидкого навоза КРС находилась в диапазоне от 0,35 ppm до 0,46 ppm, для жидкой фракции навоза КРС – в диапазоне от 0,38 ppm до 0,45 ppm, для свиного навоза – от 0,43 ppm до 0,47 ppm.

На графике (рис. 5) показаны результаты математической обработки в виде средних концентраций закиси азота в пробах, отобранных с трехкратной повторностью при использовании лабораторной установки.

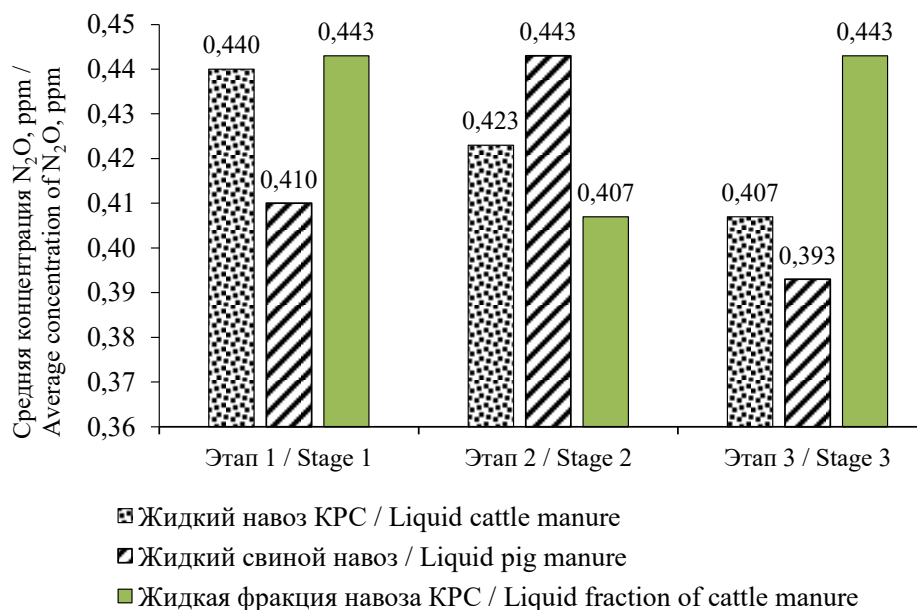


Рис. 5. Гистограмма средних концентраций N₂O для жидкого навоза КРС, жидкой фракции навоза КРС и свиного навоза /

Fig. 5. Histogram of average N₂O concentrations for liquid cattle manure, liquid fraction of cattle manure and pig slurry

При проведении исследования определяли следующие параметры, которые были сопоставимы для всех трех этапов и всех четырех видов навоза:

1. Средняя температура воздуха перед камерой (входной воздуховод) – +24,4±0,9 °С.
2. Средняя температура воздуха в камере – +24,9±1,1 °С;

3. Средняя температура воздуха на выходе из камеры (выходной воздуховод) – +24,7±0,7 °С.
4. Средняя скорость воздушного потока перед камерой (входной воздуховод) – 0,6±0,1 м/с.
5. Средняя скорость воздушного потока в камере – 0,5±0,1 м/с.
6. Средняя скорость воздушного потока на выходе из камеры (выходной воздуховод) – 2,1±0,1 м/с.

7. Средняя влажность воздуха перед камерой (входной воздуховод) – $59,8 \pm 0,5$ %.

8. Средняя влажность воздуха в камере – $61,5 \pm 1,9$ %.

9. Средняя влажность воздуха на выходе из камеры (выходной воздуховод) – $60,7 \pm 1,4$ %.

Как видно из данных, представленных в таблице и на гистограмме, с разогревом жидкого навоза КРС (с $+24$ до $+35$ °С) концентрация CO_2 в эмиссии увеличилась на 0,4 %, концентрация CH_4 – на 33,3 %; H_2S – на 59,9 %; NH_3 – на 54,6 %. Концентрация N_2O в эмиссии снизилась с 0,440 ppm до 0,407 ppm (на 8,1 %).

С разогревом жидкой фракции навоза КРС (с $+24,0$ до $+35,3$ °С) концентрация CO_2 в эмиссии увеличилась на 0,2 %; концентрация CH_4 – на 25,9 %; концентрация H_2S снизилась на 12,2 %; концентрация NH_3 увеличилась на 37,9 %; концентрация N_2O в эмиссии не изменилась.

С разогревом жидкого свиного навоза (с $+24,1$ до $+40,3$ °С) концентрация CO_2 в эмиссии увеличилась на 25,2 %, H_2S – на 32,2 %, NH_3 – на 32,1 %; концентрация N_2O в эмиссии уменьшилась на 4,3 %, концентрация CH_4 не изменилась;

С разогревом жидкой фракции свиного навоза (с $+24,3$ до $+35,7$ °С) концентрация CO_2 в эмиссии уменьшилась на 0,2 %; концентрация CH_4 увеличилась на 25,9 %, концентрация H_2S – на 57,1 %; NH_3 – на 42,2 %.

Динамика повышения концентрации газов при разогреве жидкого навоза говорит о том, что имитация технологии длительного выдерживания прошла успешно.

Полученные в нашем исследовании численные значения концентраций климатически активных веществ сравнили с результатами других исследований.

В Российской Федерации аналогичные исследования проводятся в основном в ФГБУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля» (ФГБУ «ИГКЭ»). В 2008 году в этом институте была выполнена расчетным путем оценка кумулятивных выбросов парниковых газов от животноводства, включая системы сбора и хранения навоза [13]. Результаты этих исследований впоследствии легли в основу методологических подходов Национального кадастра антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, нерегулируемых Монреальским протоколом за 1990–2022 гг.

В 2023 году в России были проведены исследования по измерению эмиссии парниковых газов от систем хранения навоза КРС (жидкое и сухое хранение), свиного навоза и птичьего помёта на территории РФ. Разработаны экспериментальные модельные установки для оценки эмиссии парниковых газов от таких систем [14]. Исследования находятся в стадии проведения.

Ученые из Италии выполнили замеры концентраций аммиака в двух типах хранилищ: с исходным жидким навозом КРС и жидкой фракцией навоза КРС (после разделения исходного навоза на сепараторе). Результаты измерений показали, что концентрация аммиака над хранилищами исходного навоза КРС варьировала в диапазоне $4,2$ – $6,1$ мг/м³; над хранилищами жидкой фракции навоза – $4,4$ – $6,9$ мг/м³. Данные значения превышали полученные нами в результате эксперимента по исходному навозу КРС на 11,9 %, по жидкой фракции навоза – на 18,2 % [15].

Ученые из Малайзии провели исследование по замеру метана от хранилищ жидкого навоза КРС. Результаты показали, что эмиссии метана находятся в диапазоне 0–3,02 %. Наши экспериментальные показатели попадают в данный диапазон [16].

Полученные в результате исследования значения концентраций климатически активных веществ при переработке жидкого свиного навоза и жидкой фракции навоза КРС сопоставимы с данными аналогичных исследований, отличия составляют менее 20 %. Причины расхождения могут быть связаны с различными рационами кормления животных, природно-климатическими зонами и с нестабильными характеристиками навоза [17]. Следовательно, необходимо продолжать исследования по уточнению данных коэффициентов для регионов РФ.

Заключение. В соответствии с задачами исследования обоснована конструкция экспериментальной установки, разработана программа и методика, определены концентрации климатически активных веществ при переработке различных видов жидкого навоза. Экспериментальная установка позволяет имитировать естественные процессы, происходящие при переработке навоза. Произведена имитация технологии длительного выдерживания в открытом хранилище.

В результате исследования определены концентрации климатически активных веществ при переработке различных видов навоза (жидкий навоз КРС, жидкая фракция навоза КРС, жидкий

свиной навоз, жидкая фракция свиного навоза) на экспериментальной установке.

Концентрацию N_2O определяли на газовом хроматографе «Кристаллюкс-4000М». Концентрация газов в жидком навозе КРС составила: CO_2 – 537–539 мг/м³, CH_4 – 0,02–0,03%, H_2S – 0,147–0,367 мг/м³, NH_3 – 1,97–4,34 мг/м³, в жидкой фракции навоза КРС следующая: CO_2 – 537–538 мг/м³, CH_4 – 0,02 %, H_2S – 0,367–0,327 мг/м³, NH_3 – 2,53–4,08 мг/м³, в жидком свином навозе – CO_2 – 537–718 мг/м³, CH_4 – 0,02 %, H_2S – 0,120–0,177 мг/м³, NH_3 – 4,69–6,97 мг/м³, в жидкой фракции свиного навоза – CO_2 – 537–592 мг/м³, CH_4 – 0,01–0,02 %, H_2S – 0,08–0,20 мг/м³, NH_3 – 1,57–2,72 мг/м³.

Полученные в результате исследования значения концентраций климатически активных веществ при переработке жидкого навоза КРС и жидкой фракции навоза КРС сопоставимы с результатами аналогичных исследований, отличия составляют менее 20 %. При нагреве жидкого свиного навоза концентрация CO_2 увеличивается на 33,3 % по сравнению с другими видами навоза. Показания концентрации CH_4 слабо изменялись в процессе

эксперимента. Наиболее высокие концентрации NH_3 наблюдали при обращении с жидким свиным навозом вне зависимости от этапа исследований.

Проведенные исследования позволяют говорить об определенной динамике изменения концентраций выбросов при различных этапах переработки жидкого навоза и о возможности выявления закономерностей, которые впоследствии смогут позволить создавать прогнозы изменения выбросов.

В перспективе необходимо провести более углубленные исследования исходных материалов с увеличением кратности измерений с целью повышения репрезентативности полученных данных и разработать расчётную модель, учитывающую различные варианты технологий обращения с навозом и позволяющую перейти от полученных в результате исследований концентраций веществ к удельным выбросам. Результаты исследований являются основой для корректировки коэффициентов при расчете эмиссии газов в соответствии с Методическими рекомендациями по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации.

Список литературы

1. Брюханов А. Ю., Васильев Э. В., Шалавина Е. В., Уваров Р. А., Субботин И. А. Метод решения экологических проблем при обращении с навозом и помётом. Молочнохозяйственный вестник. 2017;(3(27)):84–96. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30275937> EDN: ZMNSXD
2. Пилип Л. В. Метод очистки воздуха от запахообразующих веществ свинокомплексов. Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2019;(4(101)):137–146. DOI: <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10221> EDN: UCGZAY
3. Джабборов Н. И., Мишанов А. П., Добринов А. В. Прогнозирование выбросов парниковых газов в растениеводстве от уровня применяемых технологий. АгроЭкоИнженерия. 2024;(1(118)):70–82. DOI: <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-1118-70-82> EDN: UDSNCT
4. Второй В. Ф., Второй С. В. Влияние системы удаления навоза на концентрацию аммиака в коровниках с беспривязным содержанием. АгроЭкоИнженерия. 2024;(2(119)):104–117. DOI: <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-2119-104-116> EDN: OOTRET
5. Брюханов А. Ю., Шалавина Е. В. Методический подход к выбору и проектированию отстойников жидкой фракции свиного навоза. Инновации в сельском хозяйстве. 2013;(2(4)):17–21. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19414326> EDN: QIVYEL
6. 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(24):225–231. DOI: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2014.24.027>
7. 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. DOI: <https://doi.org/10.1029/98GB01866>
8. 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. DOI: <https://doi.org/10.1002/jeq2.20112>
9. Trabue S. L., Kerr B. J., Bearson B. L., Hur M., Parkin T., Wurtele E. S., Ziemer C. J. Microbial community and chemical characteristics of swine manure during maturation. Journal of Environmental Quality. 2016;45(4):1144–1152. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2015.09.0446>
10. Vorobel M., Klym O., Kaplinskyi V., Ivan L., Grabovskyi S., Taras P., Bilovus H. Reduction of the greenhouse gas emissions from the pig manure using inorganic substances. Scientific Papers. Series D. Animal Science. 2023;LXVI(2):421–427. URL: https://animalsciencejournal.usamv.ro/pdf/2023/issue_2/Art49.pdf

11. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.043>
12. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.007>
13. Романовская А. А. Оценка антропогенной эмиссии метана в животноводстве России в 1990-2004 гг. *Сельскохозяйственная биология*. 2008;43(6):59–65. Режим доступа: <http://www.agrobiology.ru/6-2008romanovskaya.html>
14. 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: мат-лы III Всеросс. научн. конф. М.: ФГБУ ИГКЭ, 2023. С. 136–140. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=59986887> EDN: MGIQHL
15. Dinuccio E., Berg W., Balsari P. Effects of mechanical separation on GHG and ammonia emissions from cattle slurry under winter conditions. *Animal Feed Science and Technology*. 2011;166-167:532–538. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.037>
16. Hanafiah M. M., Ibraheem A. J., Razman K. K. Emissions of carbon dioxide and methane from dairy cattle manure. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2021;880:012037 DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/880/1/012037>
17. Оценка потоков парниковых газов в экосистемах регионов Российской Федерации. Под ред. А. А. Романовской. М.: ИГКЭ, 2023. 343 с. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_56147005_38818185.pdf

References

1. Bryukhanov A. Yu., Vasilev E. V., Shalavina E. V., Uvarov R. A., Subbotin I. A. Method of environmental problem solution in manure management. *Molochnokhozyaystvenny vestnik*. 2017;(3(27)):84–96. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30275937>
2. Pilip L. V. Method of air cleaning from odor-forming substances originating from pig complexes. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2019;(4(101)):137–146. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10221>
3. Dzhaborov N. I., Mishanov A. P., Dobrinov A. V. Forecasting of greenhouse gas emissions in crop production depending on applied technology level. *AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering*. 2024;(1(118)):70–82. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-1118-70-82>
4. Vtory V. F., Vtory S. V. Effect of manure removal system on ammonia concentration in loose housing barns. *AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering*. 2024;(2(119)):104–117. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-2119-104-116>
5. Bryukhanov A. Yu., Shalavina E. V. A methodical approach to the selection and design of settling tanks for the liquid fraction of pig manure. *Innovatsii v selskom khozyaystve*. 2013;(2(4)):17–21. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19414326>
6. 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(24):225–231. DOI: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2014.24.027>
7. 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. DOI: <https://doi.org/10.1029/98GB01866>
8. 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. DOI: <https://doi.org/10.1002/jeq2.20112>
9. Trabue S. L., Kerr B. J., Bearson B. L., Hur M., Parkin T., Wurtele E. S., Ziemer C. J. Microbial community and chemical characteristics of swine manure during maturation. *Journal of Environmental Quality*. 2016;45(4):1144–1152. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2015.09.0446>
10. Vorobel M., Klym O., Kaplinskyi V., Ivan L., Grabovskyi S., Taras P., Bilovus H. Reduction of the greenhouse gas emissions from the pig manure using inorganic substances. *Scientific Papers. Series D. Animal Science*. 2023;LXVI(2):421–427. URL: https://animalsciencejournal.usamv.ro/pdf/2023/issue_2/Art49.pdf
11. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.043>
12. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.007>
13. Romanovskaya A. A. Estimation of volumes of anthropogenic emissions of methane in Russian animal husbandry. *Selskokhozyaystvennaya biologiya = Agricultural Biology*. 2008;43(6):59–65. (In Russ.). URL: <http://www.agrobiology.ru/6-2008romanovskaya.html>

14. Kozlova E. N., Pozdnyakova E. A., Konkova A. S. Ystimation of greenhouse gas emissions from manure storage systems with use of pilot-scaled plant. Monitoring of the state and pollution of the environment: surface climate, pollutants and climatically active substances: Proceedings of the III All-Russian Scientific Conference. Moscow: *FGBU IGKE*, 2023. pp. 136–140. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=59986887>

15. Dinuccio E., Berg W., Balsari P. Effects of mechanical separation on GHG and ammonia emissions from cattle slurry under winter conditions. *Animal Feed Science and Technology*. 2011;166-167:532–538. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.037>

16. Hanafiah M. M., Ibraheem A. J., Razman K. K. Emissions of carbon dioxide and methane from dairy cattle manure. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2021;880:012037 DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/880/1/012037>

17. Assessment of greenhouse gas fluxes in the ecosystems of the regions of the Russian Federation. Edited by A. A. Romanovskaya. Moscow: *IGKE*, 2023. 343 p. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_56147005_38818185.pdf

Сведения об авторах

Васильев Эдуард Вадимович, кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Филътровское ш. 3, пос. Тярлево, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196634, e-mail: sznii@ya.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5910-5793>

Базыкин Валентин Игоревич, научный сотрудник отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Филътровское ш. 3, пос. Тярлево, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196634, e-mail: sznii@ya.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6417-6433>

✉ **Екатерина Викторовна Шалавина**, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Филътровское ш. 3, пос. Тярлево, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196634, e-mail: sznii@ya.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7345-1510>, e-mail: shalavinaev@mail.ru

Егоров Семен Алексеевич, младший научный сотрудник отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Филътровское ш. 3, пос. Тярлево, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196634, e-mail: sznii@ya.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3948-6171>

Information about the authors

Eduard V. Vasilev, PhD in Engineering, leading researcher, the Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 3, Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, Saint Petersburg, Russian Federation, 196634, e-mail: sznii@ya.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5910-5793>

Valentin I. Bazykin, researcher, the Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 3, Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, Saint Petersburg, Russian Federation, 196634, e-mail: sznii@ya.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6417-6433>

✉ **Ekaterina V. Shalavina**, PhD in Engineering, senior researcher, the Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 3, Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, Saint Petersburg, Russian Federation, 196634, e-mail: sznii@ya.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7345-1510>, e-mail: shalavinaev@mail.ru

Semen A. Egorov, junior researcher, the Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 3, Filtrovskoje Shosse, Tiarlevo, Saint Petersburg, Russian Federation, 196634, e-mail: sznii@ya.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0008-3948-6171>

✉ – Для контактов / Corresponding author