

МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ / MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AUTOMATION

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.3.680-690>



УДК 631.95

Интеллектуализированная оценка систем сбора и хранения навоза на молочной ферме по выбросу парниковых газов

© 2025. Э. В. Васильев, Д. А. Максимов, Э. А. Папушин , Е. В. Шалавина, С. Н. Матейчик

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

В выбросах парниковых газов животноводство играет существенную роль. Наибольшее их количество поступает от жвачных животных, в том числе от систем сбора и хранения навоза. В процессе модернизации существующих и строительства новых ферм, современных животноводческих помещений увеличивается их доля с беспривязной системой содержания животных, для которой характерен переход от получения твёрдого навоза к жидкому. Цель работы – провести оценку образования парниковых газов от различных современных систем сбора и хранения навоза на молочных фермах крупного рогатого скота. Исследование выполнили на основе данных одного из сельскохозяйственных предприятий Северо-Западного федерального округа (СЗФО) в соответствии с Руководящими принципами Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) и разработанной национальной методикой по инвентаризации выбросов парниковых газов. Рассмотрены три широко используемые технологии по обращению с навозом. Полученные результаты показали, что переход к системам обращения с жидким навозом способствует росту выбросов парниковых газов за счёт увеличения образования метана. На рассматриваемом предприятии его выброс увеличивается с 1894,17 кг/год до 36137,02 кг/год. Использование сепарации навоза на твёрдую и жидкую фракции с последующей их отдельной обработкой позволяет снизить выброс метана до 6269,70 кг/год. Выброс закиси азота происходит при переработке твёрдого навоза, его снижение возможно путём обеспечения регулируемого процесса аэрации.

Ключевые слова: животноводство, переработка навоза, экология, метан, закись азота

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках 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., Максимов Д. А., Папушин Э. А., Шалавина Е. В., Матейчик С. Н. Интеллектуализированная оценка систем сбора и хранения навоза на молочной ферме по выбросу парниковых газов. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока.* 2025;26(3):680–690. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.3.680-690>

Поступила: 03.04.2025

Принята к публикации: 30.05.2025 Опубликована онлайн: 27.06.2025

Intelligent assessment of manure collection and storage systems on a dairy farm by the greenhouse gas emissions

© 2025. Eduard V. Vasilev, Dmitry A. Maksimov, Eduard A. Papushin , Ekaterina V. Shalavina, Svetlana N. Mateichik

Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal State Budgetary Scientific Institution “Federal Scientific Agroengineering Center VIM”, Saint Petersburg Russian Federation

In greenhouse gas emissions a significant part is accounted for by livestock production. The largest amount comes from ruminants including the manure collection and storage facilities. As existing farms are modernized and new farms are built, the proportion of loose housing systems in them is increasing. They are characterized by a shift from solid manure to liquid manure production. The study is aimed at estimating the greenhouse gas emissions from different modern manure collection and storage systems on cattle farms. The estimation was based on data from one of the agricultural enterprises of the North-western Federal District following the Guidelines of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and the developed national methodology for the inventory of greenhouse gas emissions. The study considered three most common manure

handling technologies. The results showed that the transition to liquid manure production systems contributed to an increase in greenhouse gas emissions due to higher methane production. At the agricultural enterprise studied, methane emissions increased from 1894.17 kg/year to 36137.02 kg/year. The application of manure separation into solid and liquid fractions followed by their individual treatment, reduced methane emissions to 6269.70 kg/year. Nitrous oxide is released during the solid manure processing. It can be reduced by controlled aeration.

Keywords: animal husbandry, manure processing, ecology, methane, nitrous oxide

Acknowledgements: 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 thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

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

For citations: Vasilev E. V., Papushin E. A., Maksimov D. A., Shalavina E. V., Mateichik S. N. Intelligent assessment of manure collection and storage systems on a dairy farm by the greenhouse gas emissions. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*. 2025;26(3):680–690. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.3.680-690>

Received: 03.04.2025

Accepted for publication: 30.05.2025

Published online: 27.06.2025

Во всем мире признано, что глобальное потепление является острой проблемой, требующей своевременного решения. Его основной причиной является повышение концентрации в атмосфере парниковых газов, таких как диоксид углерода (CO₂), метан (CH₄), водяной пар (H₂O), закись азота (N₂O) и фтороводородные углеводороды, что приводит к повышению средней температуры поверхности Земли. В последние десятилетия темпы её роста дошли до 0,4 °C. На сегодняшний день это вызвало таяние ледников и арктического морского льда, что привело к повышению уровня моря с 1901 по 2010 год на 0,19 м. Увеличилось количество происходящих экстремальных погодных явлений [1].

По имеющимся оценкам, до 70 % возникновение парникового эффекта обеспечивается диоксидом углерода. За период с 1900 по 2008 год концентрация CO₂ в атмосфере увеличилась в 16 раз. Потенциал глобального потепления (ППП), определяющий его интенсивность от каждого газа, имеет минимальное значение у CO₂ и он принят за 1 [1, 2, 3]. В соответствии с методиками, утвержденными Приказом Министерства природных ресурсов и экологии РФ №371 от 27.05.2022, PPP для CH₄ составляет 25, а для N₂O – 298¹.

Жвачные животные признаны одним из наиболее значительных источников парниковых газов. Метан и закись азота выделяются животными в результате анаэробного расщепления органических веществ в рубце и навозе, а также в результате процессов денитри-

фикации и нитрификации, которые происходят в навозе. Около 14,5 % от общего объема глобальных выбросов парниковых газов в мире приходится на сектор животноводства². Их величина от общего объема выбросов сельского хозяйства составляет 80 %. Выбросы от животноводства с 2000 по 2021 год выросли почти на 20 % [4, 5].

Прямые выбросы от животноводческого сектора во всем мире, включая CH₄ от энтеральной ферментации, а также CH₄ и N₂O от обращения с навозом, по данным FAO³, составляют 3,7 Гт в CO₂ экв., из которых 54 % всех выбросов от животноводства относятся к CH₄.

Крупный рогатый скот является основным источником эмиссии парниковых газов, производя их примерно 62 % от всех видов животных. Выбросы метана и закиси азота зависят от численности популяции жвачных животных, их продуктивности и используемых систем обработки навоза [6, 7, 8].

Одним из основных факторов, определяющих выработку CH₄, является качество корма. Высокое содержание клетчатки (целлюлозы) в корме увеличивает выброс CH₄, поэтому используемый видовой состав и сроки уборки трав на корм имеют большое значение. Снижения выделения энтерального метана на единицу продукции можно достичь предварительной подготовкой грубых кормов и использованием их в определенном соотношении с концентрациями, а также введением специальных кормовых добавок.

¹Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ №371 от 27.05.2022 г. «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/350962750> (дата обращения 27.03.2025 г.).

²Livestock solutions for climate change. Technical paper. Italy: Rome, FAO, 2017. 8 p. URL: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i8098en>

³Pathways towards lower emissions – A global assessment of the greenhouse gas emissions and mitigation options from livestock agrifood systems. Italy, Rome: FAO, 2023. 77 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.4060/cc9029en> (дата обращения 27.03.2025 г.).

Выбросы при работе с образующимся навозом зависят не только от его состава, где большую роль играет содержание органического вещества и азота, но также и от технологии, определяющей технические решения по его хранению и переработке.

При обработке и хранении жидкого и полужидкого навоза формируются анаэробные условия, что способствует образованию метана. При обработке твёрдого навоза газообразование зависит от аэрации. При поступлении кислорода разложение происходит до CO_2 , при его недостатке образуется CH_4 .

Образование N_2O возможно только при определённых условиях. Для этого необходимо окисление аммиачного азота до нитратного (нитрификация), которое происходит в аэробных условиях с последующим его преобразованием в N_2O и молекулярный азот уже при анаэробных условиях. Такие комбинированные условия для нитрификации и денитрификации создаются при протекании пассивной аэрации.

В Национальном докладе о кадастре антропогенных выбросов 2023 года представлено, что выбросы парниковых газов по сельскохозяйственному сектору составили 121 Мт в CO_2 экв., из них 41 Мт в CO_2 экв. выброс метана от внутренней ферментации, 13,6 Мт в CO_2 экв. от систем сбора, хранения и использования навоза [9].

Доля выбросов от систем сбора и хранения навоза не самая большая. В то же время с учётом ведущихся работ по строительству новых ферм и комплексов, а также модернизации существующих ферм есть возможность провести оценку и определить направления, позволяющие снизить нагрузку по выбросам от данных технологических процессов.

В России в последние десятилетия наблюдается тенденция увеличения доли хозяйств с поголовьем от 1000 и более коров. Это обусловлено возможностью снизить затраты труда в 2-3 раза на производство единицы продукции и её себестоимость в 1,5–2,0 раза по сравнению с предприятиями средней и малой мощности. Одновременно с этим происходит увеличение доли беспривязных технологий содержания животных. Прогнозируется, что доля беспривязно-боксового содержания коров к 2030 году достигнет 60 %. В этом случае уборка навоза

осуществляется скреперными установками с дальнейшей транспортировкой его с помощью насосов по трубопроводу или транспортёрами по закрытым каналам [10, 11, 12].

При беспривязном содержании стоки от доильного зала обычно смешиваются с экскрементами животных, туда же попадает вода от мытья поилок, что увеличивает влажность навоза до 94 %. Такая влажность позволяет транспортировать навоз в навозохранилище подземным трубопроводом. В результате упрощается процесс транспортировки, что способствует снижению загрязнения площади животноводческого комплекса [13, 14]. Реализация данной тенденции ведёт к увеличению доли образующегося жидкого навоза, а значит происходит изменение в выбросе парниковых газов.

Цель исследования – провести оценку образования парниковых газов от различных современных систем сбора и хранения навоза на типовой молочной ферме крупного рогатого скота Северо-Западного федерального округа (СЗФО).

Научная новизна – проведённая оценка позволяет выявить зависимость изменения выбросов парниковых газов от освоения современных систем сбора и хранения навоза, определить пути к их снижению.

Материал и методы. Приборный мониторинг с количественной оценкой всех выбросов от конкретной фермы на сегодняшний день очень затратный и практически трудноисполнимый. Для этих целей чаще используют несколько типов моделей, обеспечивающих оценку выбросов парниковых газов от различных систем и ферм в целом. В их основу положены принципы от применения простых коэффициентов выбросов до детального моделирования рассматриваемого процесса. При ежегодной инвентаризации парниковых газов в соответствии с Рамочной конвенцией ООН по изменению климата используют методы расчётного мониторинга. Более детальная оценка выбросов от систем сбора и хранения навоза проводится по Уровню 2⁴ с использованием данных по потребляемым видам кормов и коэффициентам их перевариваемости, на основании чего ведётся расчёт валовой энергии (GE) и коэффициентов эмиссии.

⁴Распоряжение Министерства природных ресурсов и экологии РФ № 15-р от 16 апреля 2015 г. «Об утверждении Методических рекомендаций по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420278225> (дата обращения 27.03.2025 г.).

В исследовании оценку выбросов осуществляли на основе данных одного из типичных сельскохозяйственных предприятий Северо-Западного федерального округа (СЗФО), на котором моделировали выбросы парниковых газов для различных наиболее распространенных на сегодняшний день способов сбора и хранения навоза. Расчёты проводили по Уровню 2 Руководящих принципов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК)⁵ по разработанной национальной методике⁶.

В соответствии с данной методикой при оценке выбросов парниковых газов от систем сбора и хранения навоза CO₂ не учитывают. Считается, что идёт возврат CO₂, поглощённого растениями, выращиваемыми на корм животным, в процессе фотосинтеза. Поэтому расчёт проводили на основании выбросов CH₄ и N₂O.

Моделирование осуществляли с использованием разработанной информационной аналитической программной платформы⁷ в подсистеме «Расчёт климатически активных веществ (метана и закиси азота) в животноводстве».

Результаты и их обсуждение. Расчёт выбросов CH₄ осуществляли по алгоритму, реализуемому разработанной программной платформой. Схема алгоритма представлена на рисунке 1. Оценка коэффициентов выбросов метана определяли по уравнению⁸:

$$EF_{(A)} = (VS_{(A)} \cdot 365) \cdot [B_{o(A)} \cdot \frac{0,67}{\text{м}^3} \cdot \sum_{B,D} \frac{MCF_{(B,D)}}{100} \cdot MS_{(A,B,D)}], \quad (1)$$

где $EF_{(A)}$ – коэффициент годовых выбросов CH₄ для заданной категории скота и птицы, кг CH₄/животное×год; $VS_{(A)}$ – суточное выделение летучего твердого вещества для заданной категории/подкатегории скота и птицы, кг сухого вещества/животное×год; 365 – основа для расчета годового производства VS, сутки/год; $B_{o(A)}$ – максимальная метанопродуцирующая способность для навоза скота (помета птицы) категории/подкатегории, м³ CH₄/кг выделенных VS; 0,67 – коэффициент преобразования м³ CH₄ в килограммы CH₄; $MCF_{(B,D)}$ – коэффициенты

преобразования метана для каждой системы B сбора и хранения навоза и помета по климатическому региону, %; $MS_{(A,B,D)}$ – доля навоза (помета птицы) от категории скота, которая обрабатывается с использованием определенной системы сбора и хранения навоза и помета в климатическом регионе, не имеет размерности.

В соответствии с методикой, при расчёте по Уровню 2 среднесуточные темпы выделения летучих твердых веществ VS (*Volatile Solids*) для расчёта выбросов CH₄ оценивали по данным о потреблении и перевариваемости кормов по каждой категории/подкатегории животных (T). Кроме того, в моделировании VS по Уровню 2 при расчёте выбросов метана подстилка (солома, опилки, щепы и др.) не учитывается. В методике принимается, что ее использование обычно связано с системами хранения сухих отходов и не приводит к значительному увеличению общего выброса метана.

Существенную роль играет тип применяемых систем сбора и хранения навоза с соответствующим им коэффициентом преобразования метана MCF (*Methane Conversion Factor*), показывающий долю выделения метана от его максимального количества, которое может быть получено из данного навоза (B_o). Для коров значение B_o составляет 0,24 м³CH₄/кг VS , а для остального поголовья КРС – 0,17 м³CH₄/кг VS . Значения MCF определяются для конкретной системы сбора и хранения навоза и зависят от имеющихся анаэробных условий, температуры системы и времени удерживания в ней органического материала. Для сравнения рассмотрены три системы сбора и хранения навоза на молочных фермах крупного рогатого скота:

1) ранее широко использовавшееся компостирование в буртах с $MCF = 0,5$ %;

2) распространившаяся при беспривязном содержании животных система хранения жидкого навоза в резервуарах с образованием естественной поверхностной корки с $MCF = 10$ % при средней годовой температуре ниже 10 °С, что соответствует условиям рассматриваемого предприятия;

⁵2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol.4. Agriculture, Forestry and Other Land Use.

[Электронный ресурс]. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html> (дата обращения: 27.03.2025).

⁶URL: <https://docs.cntd.ru/document/420278225> (дата обращения 27.03.2025 г.).

⁷Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024681867 от 16.09.2024 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=69650162> (дата обращения 27.03.2025 г.).

⁸URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>

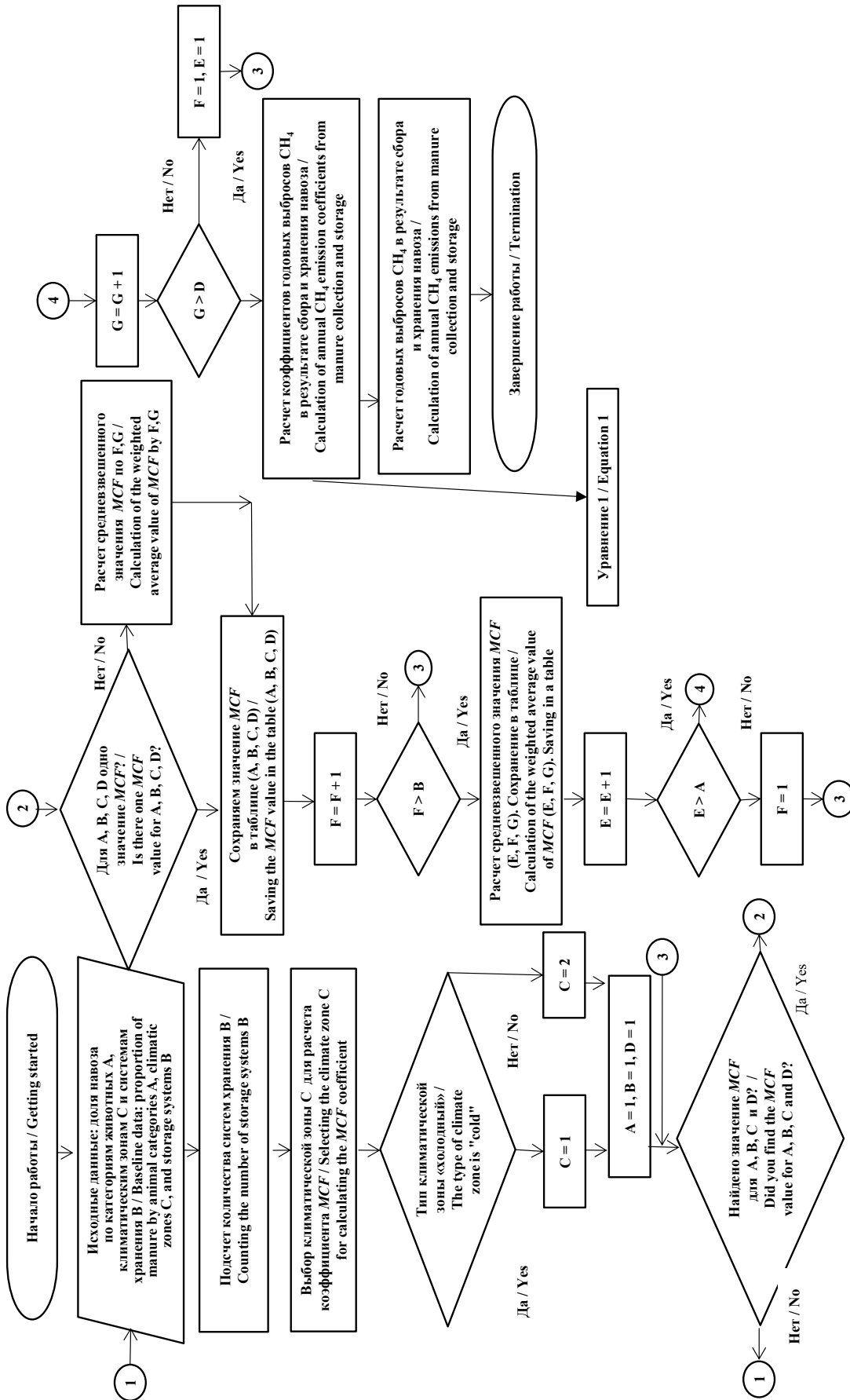


Рис. 1. Схема алгоритма расчёта выбросов CH₄: А – категории животных; В – системы хранения; С – климатические зоны; D – временные периоды; E – счетчик категорий животных; F – счетчик систем хранения; G – счетчик временных периодов / Fig. 1. Calculation algorithm of CH₄ emissions: A – animal categories; B – storage systems; C – climatic zones; D – time periods; E – animal category counter; F – storage system counter; G – time period counter

3) разделение жидкого навоза на фракции с последующим длительным выдерживанием жидкой фракции с $MCF = 17\%$, так как после исключения при сепарации волокнистых и крупных кусков органического материала корка во время хранения не образуется, и пассивным компостированием твердой фракции с $MCF = 0,5\%$.

Оценку прямых выбросов N_2O для каждой из рассматриваемых систем осуществляли в соответствии с уравнением (2)⁹ и по алгоритму,

реализованному в программной платформе, схема которого представлена на рисунке 2.

Для этого определяли суммарное годовое поглощение азота и его удержание животными через величину суточного потребления азота посредством потребляемой валовой энергии рациона GE (*Gross Energy*) и процентной доли сырого белка CP (*Crude Protein*) в его составе, а также доли годового поглощения азота, которая для коров составляет 0,2, а для прочего КРС – 0,07.

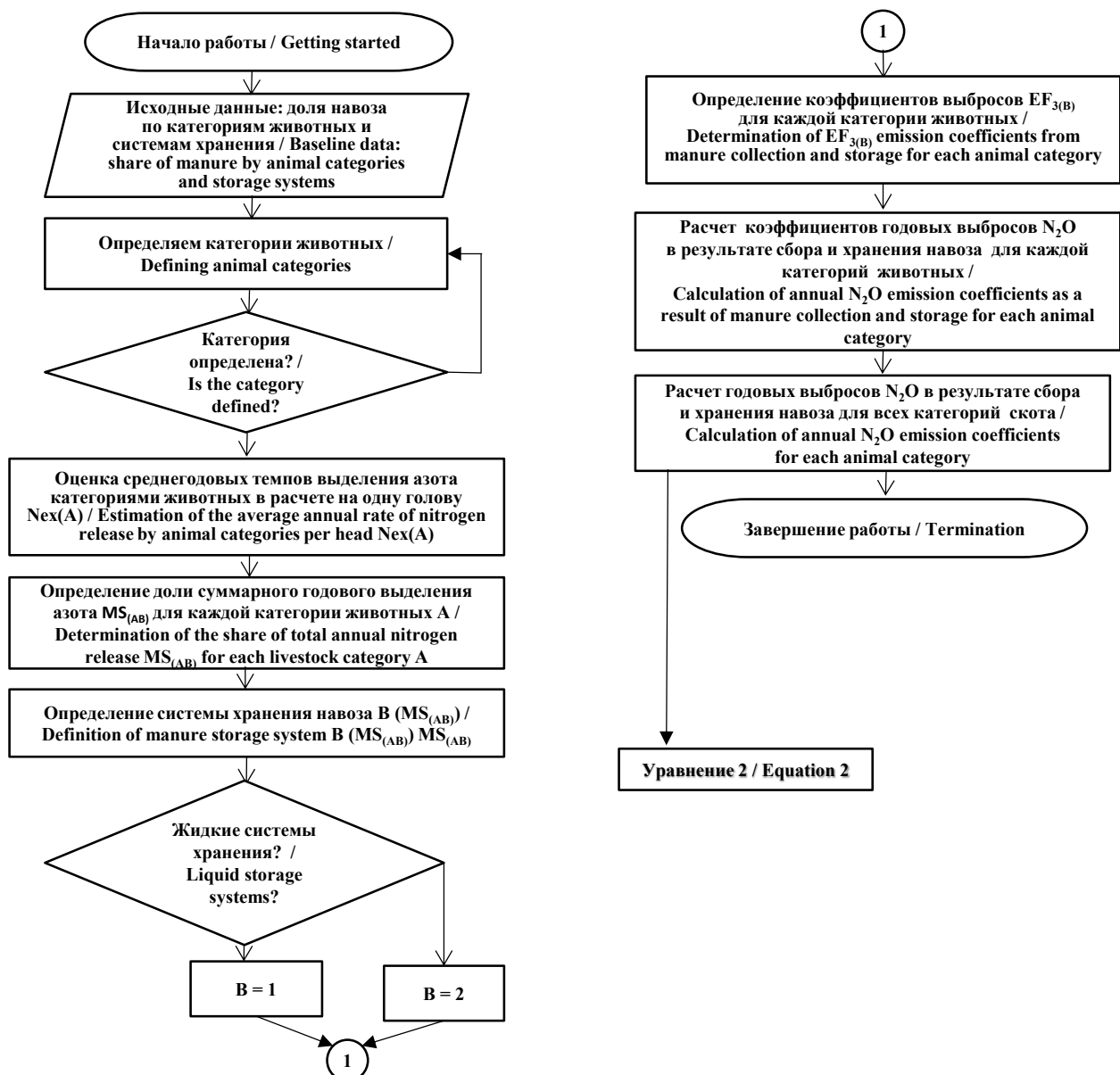


Рис. 2. Схема алгоритма расчёта выбросов N_2O / Fig. 2. Calculation algorithm of N_2O emissions

⁹URL: <https://docs.cntd.ru/document/420278225>

$$N_2O_{D(mm)} = \left[\sum_B \left[\sum_A (N_{(A)} \cdot Nex_{(A)} \cdot MS_{(A,B)}) \cdot EF_{3(B)} \right] \cdot \frac{44}{28} \right] \quad (2)$$

где $N_2O_{D(mm)}$ – прямые выбросы N_2O в результате сбора и хранения навоза и помета в регионе, кг N_2O /год; $N_{(A)}$ – количество голов категории скота и птицы в регионе; $Nex_{(A)}$ – среднегодовое выделение азота на одну голову скота категории в регионе, кг N /животное×год; $MS_{(A, B)}$ – доля суммарного годового выделения азота для каждой категории скота и птицы, которая обрабатывается в рамках системы сбора и хранения навоза и помета в данном регионе, не имеет размерности; $EF_{3(B)}$ – коэффициент для прямых выбросов N_2O от системы сбора и хранения навоза и помета в регионе, кг N_2O-N /кг N в системе; B – система сбора и хранения навоза

и помета; A – категория скота и птицы; 44/28 – коэффициент преобразования выбросов из единиц азота (N_2O-N) в выбросы N_2O .

Исходные данные моделируемого объекта по информации, представленной предприятием, на основе используемых рационов с расчётом валовой энергии, представлены в таблице 1.

Интенсификация производства привела к уходу от пастбищного содержания животных, а также к изменению их характеристик, рациону кормления и продуктивности.

Результаты расчётов выбросов метана от систем сбора и хранения навоза по Уровню 2 с учётом имеющихся подкатегорий животных и для всех рассматриваемых возможных технологических решений, представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Данные по типичному сельскохозяйственному предприятию СЗФО / Table 1 – Data on a typical agricultural enterprise in the Northwestern Federal District

Подкатегории животных / Animal category	Поголовье, гол. / Animal stock, heads	Суточный рацион на гол. / Daily ration per head		GE, МДж/сут. / MJ/day
		к. е. / feed units	с. в., кг / DM, kg	
Лактирующие коровы / Lactating cows	640	23,63	23,23	428,6
Сухостойные коровы и нетели / Dry cows and heifers	320	14,53	16,56	268,6
Ремонтный молодняк / Replacement young animals	356	2,70	5,70	105,1

Таблица 2 – Расчёт выбросов метана по рассмотренным системам сбора и хранения навоза на молочных фермах крупного рогатого скота / Table 2 – Calculation of methane emissions from the considered manure collection and storage systems on cattle dairy farms

Подкатегории животных / Animal category	DE% перевариваемость корма, % / Feed digestibility, %	VS _(T) , кг с. в./год. * гол / kg DM/year/head	Выбросы CH_4 по вариантам систем, кг/год / CH_4 emissions by system options, kg/year		
			1	2	3
Лактирующие коровы / Lactating cows	72,1	6,82	1280,88	25617,58	4239,71
Сухостойные коровы и нетели / Dry cows and heifers	68,8	5,36	503,06	10061,17	1665,12
Ремонтный молодняк / Replacement young animals	75,6	1,49	110,23	458,27	364,87
Итого по ферме / Total on the farm			1894,17	36137,02	6269,70

Примечание: 1 – компостирование в буртах с $MCF = 0,5 \%$; 2 – система хранения жидкого навоза в резервуарах с образованием естественной поверхностной корки с $MCF = 10 \%$ при средней годовой температуре ниже $10 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 – разделение жидкого навоза на фракции с последующим длительным выдерживанием жидкой фракции с $MCF = 17 \%$

Notes: 1 – composting in clamps with $MCF = 0.5 \%$; 2 – liquid manure storage system in tanks with the formation of a natural surface crust with $MCF = 10 \%$ at an average annual temperature below $10 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 – separation of liquid manure into fractions followed by long-term storage of the liquid fraction with $MCF = 17 \%$

Из представленных результатов видно, что в процессе интенсификации молочного животноводства и переходе к системам по работе с жидким навозом растёт количество выбросов метана, так как эти системы способствуют созданию анаэробных условий. Применение сепарации и последующая переработка

отдельно жидкой и твёрдой фракции позволяет существенно снизить выбросы метана.

В таблице 3 представлены результаты расчётов по прямым выбросам закиси азота в зависимости от вариантов рассматриваемых технологий.

Таблица 3 – Расчёт выбросов закиси азота по рассмотренным системам сбора и хранения навоза на молочных фермах крупного рогатого скота / Table 3 – Calculation of nitrous oxide emissions from the considered manure collection and storage systems on cattle dairy farms

Подкатегории животных / Animal category	$N_{ex(T)}$ экскреция азота, кг/год гол. / Nitrogen excretion, kg/year head	Прямые выбросы N_2O по вариантам систем, кг/год / Direct N_2O emissions by system options, kg/year		
		1	2	3
Лактирующие коровы / Lactating cows	195,36	1964,71	982,36	1827,18
Сухостойные коровы и нетели / Dry cows and heifers	129,21	649,72	324,86	604,24
Ремонтный молодняк / Replacement young animals	48,29	270,17	135,09	251,26
Итого / Total		2884,60	1442,30	2682,68

Примечания: 1 – компостирование в буртах с $MCF = 0,5\%$; 2 – система хранения жидкого навоза в резервуарах с образованием естественной поверхностной корки с $MCF = 10\%$ при средней годовой температуре ниже $10\text{ }^\circ\text{C}$; 3 – разделение жидкого навоза на фракции с последующим длительным выдерживанием жидкой фракции с $MCF = 17\%$ /

Notes: 1 – composting in clamps with $MCF = 0.5\%$; 2 – liquid manure storage system in tanks with the formation of a natural surface crust with $MCF = 10\%$ at an average annual temperature below $10\text{ }^\circ\text{C}$; 3 – separation of liquid manure into fractions followed by long-term storage of the liquid fraction with $MCF = 17\%$

Из полученных данных следует, что наибольший выброс закиси азота происходит в системах, осуществляющих ферментацию твёрдых материалов, где формируются условия, способствующие процессам нитрификации и денитрификации, необходимым для образования N_2O .

Общую оценку выбросов парниковых газов принято осуществлять в CO_2 эквиваленте путём пересчёта всех составляющих через соответствующие им значения потенциала глобального потепления. При проведении оценки по данному показателю установили, что для рассматриваемого предприятия:

- при компостировании в буртах выброс парниковых газов составит 907 т CO_2 экв./год;

- при хранении жидкого навоза в резервуарах с образованием естественной поверхностной корки выброс парниковых газов составит 1 333,2 т CO_2 экв./год;

- при разделении навоза на фракции с последующим длительным выдерживанием жидкой фракции и пассивным компостированием твёрдой фракции выброс парниковых газов составит 956,2 т CO_2 экв./год.

Полученные результаты показывают, что интенсификация производства в молочном животноводстве с переходом к работе с жидким навозом способствует увеличению выбросов парниковых газов от систем сбора и хранения навоза. В то же время применение сепарации навоза с последующей работой с жидкой и твёрдой фракциями позволит снизить общий выброс. Достигнуть ещё большего снижения выбросов возможно через совершенствование технических решений, направленных на управление режимами работы системы аэрации по обработке твёрдой фракции навоза [15, 16].

Заключение. Жвачные животные признаны одним из существенных источников выброса парниковых газов. Помимо энтеральной ферментации значительные объёмы выбросов образуются от систем сбора и хранения навоза, где большую роль играют используемые технологии. Интенсификация молочного животноводства с целью повышения его продуктивности, снижения себестоимости и трудозатрат привела к укрупнению предприятий данного направления, переходу их на беспривязное содер-

жание животных, где применяются системы работы с жидким навозом.

Используя метод расчётного мониторинга на основе Методических рекомендаций по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации, реализованный в подсистеме «Расчёт климатически активных веществ (метана и закиси азота) в животноводстве»¹⁰ Информационной аналитической программной платформы, проведена оценка широко применяемых систем работы с навозом на примере типичной фермы СЗФО.

Проведённая оценка показала, что переход к системам работы с жидким навозом приводит к увеличению выбросов парниковых газов за счёт увеличенного выброса метана. Применение технологии разделения навоза на фракции с последующей их отдельной переработкой позволяет снизить выброс метана на 28 % по сравнению с хранением жидкого навоза в резервуарах с образованием естественной поверхностной корки. Снижение выбросов закиси азота при обработке твёрдой фракции навоза возможно путём управления режимами ее аэрации.

Список литературы

1. Jose V. S., Sejian V., Bagath M., Ratnakaran A. P., Lees A. M., Al-Hosni Y. A. S. et al. Modeling of greenhouse gas emission from livestock. *Frontiers in Environmental Science*. 2016;4:27. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00027>
2. Rotz C. A. Modeling greenhouse gas emissions from dairy farms. *Journal of Dairy Science*. 2018;101(7):6675–6690 DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13272>
3. Genstwa N., Zmysłona J. Greenhouse gas emissions efficiency in Polish agriculture. *Agriculture*. 2024;14(1):56. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14010056>
4. Prasad R. J., Sourie S. J., Cherukuri V. R., Fita L., Merera C. E. Global warming: genesis, facts and impacts on livestock farming and mitigation strategies. *International Journal of Agriculture Innovations and Research*. 2015;3(5): 2319–1473. URL: https://ijair.org/administrator/components/com_jresearch/files/publications/IJAIR_1267_Final.pdf
5. Regan C., Perveen S., Sandhu H. Updated global emissions from the livestock sector. Australia: Adelaide, University of South Australia Report, 2021. 146 p. URL: <https://www.researchgate.net/publication/362065392>
6. Петрунина И. В., Горбунова Н. А. Системные меры по снижению выбросов парниковых газов в животноводческих хозяйствах. Обзор. *Пищевые системы*. 2022;5(3):202–211. DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-3-202-211> EDN: ZIUPJC
7. Christophe S., Pentieva K., Botsaris G. Knowledge and practices of cypriot bovine farmers towards effective and safe manure management. *Veterinary Sciences*. 2023;10(4):293. DOI: <https://doi.org/10.3390/vetsci10040293>
8. Шанина Е. В. Выбросы парниковых газов от животноводства. Научно-практические аспекты развития АПК: мат-лы национ. науч. конф. Красноярск: Красноярский ГАУ, 2023. С. 35–37. Режим доступа: <http://www.kgau.ru/new/all/science/04/content3/70.pdf>
9. Вертянкина В. Ю. Оценка выбросов парниковых газов в секторе животноводство на территории Российской Федерации. Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды: приземный климат, загрязняющие и климатически активные вещества: мат-лы III Всеросс. науч. конф. с международным участием. М.: ФГБУ «ИГКЭ», 2023. С. 77–81. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=59986856> EDN: UZBPKM
10. Хазанов В. Е., Гордеев В. В., Гордеева Т. И., Миронова Т. Ю., Вторая Е. В. Технологическое проектирование молочных ферм КРС. СПб.: ИАЭП, 2023. 117 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=58734897> EDN: YHIZPT
11. Брюханов А. Ю., Шалавина Е. В., Васильев Э. В. Прогнозное распределение технологий переработки навоза КРС в Российской Федерации. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2024;25(3):507–517. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.507-517> EDN: SKOBWN
12. Вторый В. Ф., Вторый 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
13. Слиган М. Е., Гордеев В. В. Сравнительная оценка систем навозоудаления на фермах КРС в условиях Северо-Запада России. *АгроЭкоИнженерия*. 2024;(3(120)):168–183. DOI: <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-3120-168-183> EDN: AUFQUE
14. Гордеев В. В., Миронова Т. Ю., Хазанов В. Е., Гордеева Т. И., Мионов В. Н. Структурная схема управления технологическим процессом навозоудаления. *АгроЭкоИнженерия*. 2021;(2(107)):115–125. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46302063> EDN: GEUAAX

¹⁰URL: <https://docs.cntd.ru/document/420278225>

15. Васильев Э. В., Максимов Д. А., Шалавина Е. В. Результаты исследований биотермической ферментативной переработки органических отходов свиноводческого комплекса с оценкой образующихся выбросов. Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2023;(3(63)):200–206. DOI: <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2023-3-200-206> EDN: FPWRVP
16. Васильев Э. В., Егоров С. А., Максимов Д. А., Шалавина Е. В. Исследование аэробной ферментативной переработки смеси конского и козьего навоза с оценкой потерь углерода и азота газовым выбросом. Техника и оборудование для села. 2024;(9(327)):29–32. DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2024-9-29-32> EDN: UVLYUB

References

1. Jose V. S., Sejian V., Bagath M., Ratnakaran A. P., Lees A. M., Al-Hosni Y. A. S. et al. Modeling of greenhouse gas emission from livestock. *Frontiers in Environmental Science*. 2016;4:27. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00027>
2. Rotz C. A. Modeling greenhouse gas emissions from dairy farms. *Journal of Dairy Science*. 2018;101(7):6675–6690 DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13272>
3. Genstwa N., Zmysłona J. Greenhouse gas emissions efficiency in Polish agriculture. *Agriculture*. 2024;14(1):56. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14010056>
4. Prasad R. J., Sourie S. J., Cherukuri V. R., Fita L., Merera C. E. Global warming: genesis, facts and impacts on livestock farming and mitigation strategies. *International Journal of Agriculture Innovations and Research*. 2015;3(5): 2319–1473. URL: https://ijair.org/administrator/components/com_jresearch/files/publications/IJAIR_1267_Final.pdf
5. Regan C., Perveen S., Sandhu H. Updated global emissions from the livestock sector. Australia: Adelaide, University of South Australia Report, 2021. 146 p. URL: <https://www.researchgate.net/publication/362065392>
6. Petrunina I. V., Gorbunova N. A. Systemic measures on reduction of greenhouse gas emissions in animal husbandry enterprises. A review. *Pishchevye sistemy = Food systems*. 2022;5(3):202–211. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-3-202-211>
7. Christophe S., Pentieva K., Botsaris G. Knowledge and practices of cypriot bovine farmers towards effective and safe manure management. *Veterinary Sciences*. 2023;10(4):293. DOI: <https://doi.org/10.3390/vetsci10040293>
8. Shanina E. V. Greenhouse gas emissions from animal husbandry. Scientific and practical aspects of the development of the agro-industrial complex: Proceedings of the national scientific conference. Krasnoyarsk: *Krasnoyarskiy GAU*, 2023. pp. 35–37. URL: <http://www.kgau.ru/new/all/science/04/content3/70.pdf>
9. Vertyankina V. Yu. Assessment of greenhouse gas emissions from livestock in the Russian Federation. Monitoring of the state and pollution of the environment: surface climate, pollutants and climatically active substances: proceedings of the III All-Russian Scientific Conference with international participation. Moscow: *FGBU «IGKE»*, 2023. pp. 77–81. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=59986856>
10. Khazanov V. E., Gordeev V. V., Gordeeva T. I., Mironova T. Yu., Vtoraya E. V. Technological designing of cattle dairy farms. Saint Petersburg: *IAEP*, 2023. 117 p. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=58734897>
11. Briukhanov A. Yu., Shalavina E. V., Vasilev E. V. Forecast distribution of cattle manure processing technologies in the Russian Federation. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*. 2024;25(3):507–517. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.507-517>
12. Vtoryy V. F., Vtoryy 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>
13. Sligan M. E., Gordeev V. V. Comparative evaluation of manure removal systems on cattle farms in the conditions of the Northwest of Russia. *Ag-roEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering*. 2024;(3(120)):168–183. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-3120-168-183>
14. Gordeev V. V., Mironova T. Yu., Khazanov V. E., Gordeeva T. I., Mironov V. N. Block diagram of manure removal control. *AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering*. 2021;(2(107)):115–125. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46302063>
15. Vasilev E. V., Maksimov D. A., Shalavina E. V. Research results of biothermal fermentative processing of organic waste from a pig rearing complex with assessment of emissions generated. *Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii = Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy*. 2023;(3(63)):200–206. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2023-3-200-206>
16. Vasilev E. V., Egorov S. A., Maksimov D. A., Shalavina E. V. Study of aerobic enzymatic digestion of horse and goat manure mixture with assessment of carbon and nitrogen losses by gas emission. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela = Machinery and Equipment for Rural Area*. 2024;(9(327)):29–32. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2024-9-29-32>

Сведения об авторах

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

Максимов Дмитрий Анатольевич, кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Филътровское ш., д. 3, п. Тярлево, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196634, e-mail: nii@sznii.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7032-3081>

✉ **Папушин Эдуард Александрович**, кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Филътровское ш., д. 3, п. Тярлево, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196634, e-mail: nii@sznii.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7035-4654>, e-mail: papushinea@yandex.ru

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

Матейчик Светлана Николаевна, инженер-программист отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Филътровское ш., д. 3, п. Тярлево, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196634, e-mail: nii@sznii.ru

Information about the authors

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

Dmitry A. Maksimov, DSc in Engineering, leading researcher, the Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, the Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 3, Filtrovskoje Shosse, p.o. Tiarlevo, Saint Petersburg, Russian Federation, 196634, e-mail: nii@sznii.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7032-3081>

✉ **Eduard A. Papushin**, DSc in Engineering, leading researcher, the Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, the Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 3, Filtrovskoje Shosse, p.o. Tiarlevo, Saint Petersburg, Russian Federation, 196634, e-mail: nii@sznii.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7035-4654>, e-mail: papushinea@yandex.ru

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

Svetlana N. Mateichik, software development engineer, the Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, the Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 3, Filtrovskoje Shosse, p.o. Tiarlevo, Saint Petersburg, Russian Federation, 196634, e-mail: nii@sznii.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author