

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-3-202-211>

Поступила 05.07.2022

Поступила после рецензирования 27.07.2022

Принята в печать 02.08.2022

© Петрунина И. В., Горбунова Н. А., 2022



<https://www.fsjour.com/jour>

Обзорная статья

Open access

СИСТЕМНЫЕ МЕРЫ ПО СНИЖЕНИЮ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ХОЗЯЙСТВАХ. ОБЗОР

Петрунина И. В., Горбунова Н. А.

Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

парниковые газы, метан,
аммиак, жвачные животные,
кормовые добавки

АННОТАЦИЯ

В статье приведен обзор различных подходов к решению проблем, возникающих при выделении парниковых газов от деятельности животноводческих хозяйств. Сектор животноводства жвачных животных находится под пристальным вниманием по экологическим соображениям из-за его значительного вклада в выбросы кишечного метана (CH_4) и влияния на глобальное изменение климата. При этом дан анализ основных источников выброса метана в сельскохозяйственном секторе АПК, в том числе — по видам домашнего скота и птицы. Оценено влияние системы кормления, используемых кормов и кормовых добавок, хранения навоза на потери азота. В этой связи рассмотрен ряд перспективных научных и практических разработок, направленных на снижение выбросов и выработку стратегии борьбы с прямыми выбросами парниковых газов (ПГ) в животноводстве, которые не ставят под угрозу продуктивность животных, особенно в контексте цели устойчивого развития. Были рассмотрены практические действия, предусматривающие выработку комплекса мер по снижению выбросов парниковых газов. Потенциальные стратегии смягчения их последствий были разделены на следующие основные категории: разведение животных, изменение рационов их кормления и манипуляции с рубцом. Также был предпринят ряд других мер, способствующих повышению продуктивности скота и снижению негативного воздействия на природную среду. Рассмотрены эколого-экономические методики оценки выбросов вредных газов при производстве животноводческой продукции и отмечена необходимость разработки более простых экономически эффективных технологий для количественной оценки выбросов парниковых газов и с целью поиска решений для сохранения благоприятного климата. При оценке выбросов вредных газов учитываются размеры потерь и совокупный экологический ущерб. Реализация стратегий по сокращению выбросов должна привести к повышению продуктивности животных и к снижению негативного влияния животноводства на природную среду.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках выполнения исследований по государственному заданию НИР № FNEN-2019-0005 Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова Российской академии наук.

Received 05.07.2022

Accepted in revised 27.07.2022

Accepted for publication 02.08.2022

© Petrunina I. V., Gorbunova N. A., 2022

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Review article

Open access

SYSTEMIC MEASURES ON REDUCTION OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN ANIMAL HUSBANDRY ENTERPRISES. A REVIEW

Irina V. Petrunina, Nataliya A. Gorbunova

V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems, Moscow, Russia

KEY WORDS:

greenhouse gases, methane,
ammonia, ruminant animals,
feed additives

ABSTRACT

The paper presents a review of different approaches to solving problems arising upon greenhouse gas emission from activities of animal husbandry enterprises. The sector of ruminant animal production is under close attention for ecological reasons due to its significant contribution to emission of enteric methane (CH_4) and an effect on global climate change. Moreover, analysis of the main sources of methane emission in the agricultural sector of the agro-industrial complex, including by species of livestock and poultry, is given. An impact of a feeding system, feeds and feed additives in use and manure storage on nitrogen losses is estimated. In this connection, the authors examine several promising scientific and practical development results that are aimed to reducing emissions and formulating a strategy for controlling direct emissions of greenhouse gases in animal husbandry that do not jeopardize animal productivity, especially in the context of sustainability. Practical activities that envisage the development of the complex of measures for reduction of greenhouse gas emissions are examined. Potential strategies for mitigating their consequences were divided into the following main categories: animal raising, changes in animal diets and manipulations with rumen. Furthermore, several other measures facilitating an increase in livestock productivity and reduction of the negative effect on the environment were taken. Eco-economic methods for assessing emissions of harmful gases in production of animal husbandry products are considered and the necessity of developing simpler cost-effective technologies for quantitative assessment of greenhouse gas emissions and a search for solutions to preserve favorable climate is emphasized. When

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Петрунина, И. В., Горбунова, Н. А. (2022). Системные меры по снижению выбросов парниковых газов в животноводческих хозяйствах. Обзор. *Пищевые системы*, 5(3), 202-211. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-3-202-211>

FOR CITATION: Petrunina, I. V., Gorbunova, N. A. (2022). Systemic measures on reduction of greenhouse gas emissions in animal husbandry enterprises. A review. *Food Systems*, 5(3), 202-211. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-3-202-211>

assessing greenhouse gas emissions, the loss sizes and cumulative ecological damage are taken into account. Realization of strategies for emission reduction should lead to an increase in animal productivity and a decrease in the negative effect of animal husbandry on the environment.

FUNDING: The article was published as part of the research topic No. FNEN-2019-0005 of the state assignment of the V. M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems of RAS.

1. Введение

Производственная деятельность, связанная с содержанием жвачных животных, предполагает необходимость решения проблемы сокращения выбросов парниковых газов (далее — ПГ) при одновременном увеличении производства мяса и молока для удовлетворения потребительского спроса. Интенсификация соответствующих производств в определенной мере снижает выбросы ПГ на единицу продукции, но в ряде случаев приводит к увеличению общего объема их выбросов [1].

На диаграмме 1 указаны основные источники выброса метана, на диаграмме 2 приведены выбросы метана в сельскохозяйственном секторе (Рисунок 1).

Около 50% выбросов метана происходят из антропогенных источников, которые включают сельскохозяйственную деятельность. Общая глобальная оценка антропогенных выбросов приближается к 320 млн тонн в год [3].

При этом основными источниками эмиссии парниковых газов на этапе выращивания животных являются выбросы метана из их пищеварительного тракта, а также закиси азота из навоза [4].

Следует учитывать, что физиология крупного рогатого скота существенно отличается от физиологии свиней и птицы. При производстве говядины выделяется в 4 раза больше

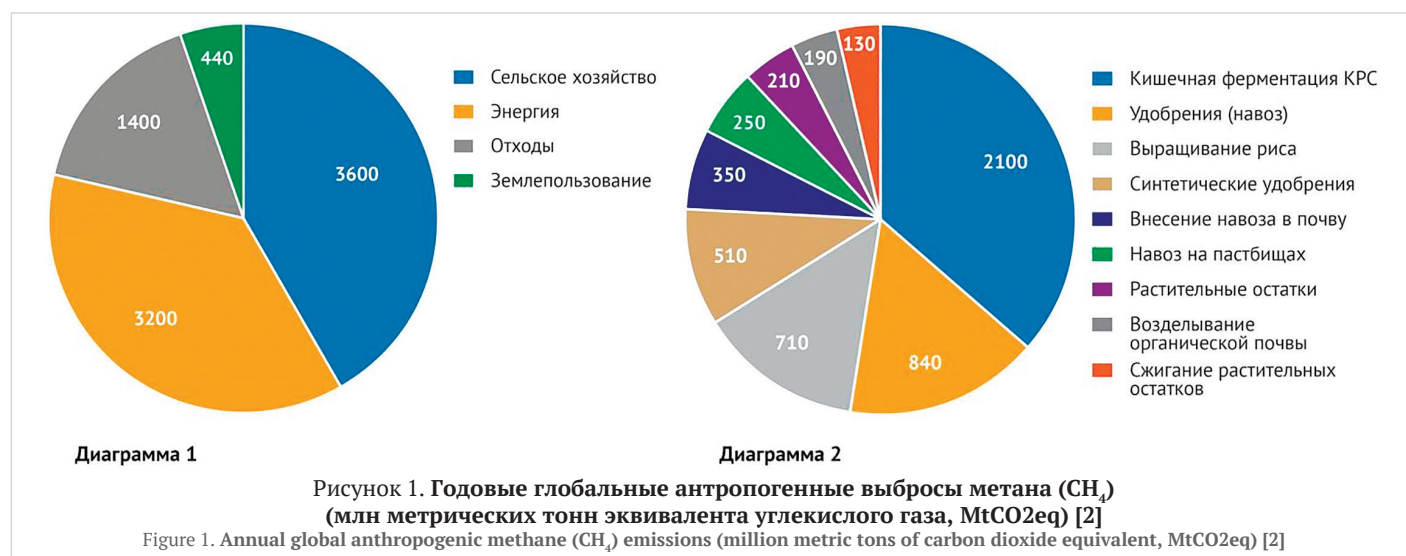
ПГ в расчете на калорийность мяса по сравнению с таким же объемом свинины. Это количество также превышает соответствующие показатели птицы в 5 раз [5].

Ниже (Рисунок 2) приведена схема выбросов ПГ по видам домашнего скота и птицы.

Анализ приведенной схемы показывает, что большая часть выбросов в секторе животноводства приходится на КРС — 62%, что составляет около 5 млн тонн в CO_2 -эквиваленте. Эта цифра примерно поровну делится между молочным и мясным скотом. Уровень выбросов, источником которых является разведение свиней, птицы, буйволов и мелких жвачных, гораздо ниже — примерно от 7 до 11% от суммарных выбросов данного сектора.

Уменьшить образование метана в пищеварительной системе животных можно за счет использования различных кормовых добавок, антибиотиков и вакцин, а также посредством включения в рацион питания крупного рогатого скота высококачественных грубых кормов [6,7].

Кроме того, снижение объемов и интенсивности выбросов можно обеспечить за счет внедрения современных методов повышения продуктивности животных. Этот подход является достаточно привлекательной стратегией, поскольку одновременно увеличивает прибыль фермерских хозяйств [8].



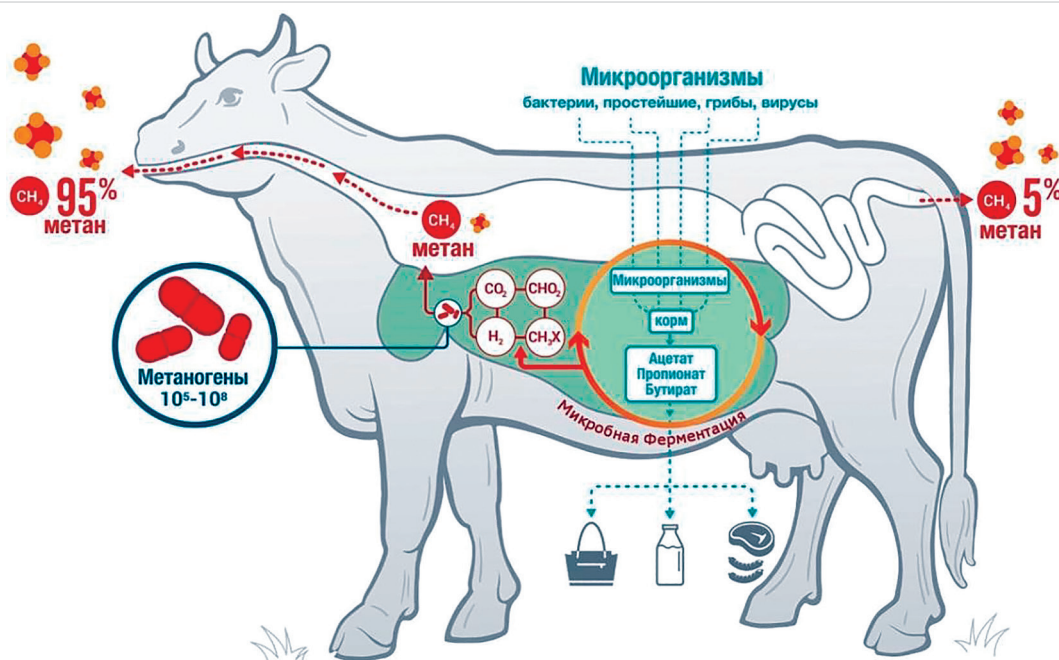


Рисунок 3. Пищеварительный процесс КРС с выделением метана

Figure 3. Digestive process in cattle with methane emission

2. Основная часть

Сокращение выбросов ПГ от разведения жвачных животных является достаточно сложной, а также актуальной задачей по причине растущего спроса на мясо и молоко [9]. Одним из методов сокращения выбросов является повышение эффективности ферментации рубца и увеличение продуктивности животных. В рамках этих подходов предлагается несколько вариантов действий, имеющих различную эффективность снижения образующего энтерального метана. К ним, в частности, относятся: изменение рационов питания, применение специальных вакцин и химических добавок, осуществление генетической селекции животных и другие меры.

Следует уточнить, что энтеральная ферментация является естественной частью пищеварительного процесса жвачных животных, когда бактерии, простейшие и грибы, содержащиеся в передней части желудка животного (рубец), ферментируют и расщепляют растительную биомассу, съеденную животным.

На Рисунке 3 схематично показан данный пищеварительный процесс на примере крупного рогатого скота.

Растительная биомасса в рубце преобразуется в летучие жирные кислоты, которые проходят через стенку рубца и по кровеносной системе попадают в печень. Этот процесс обеспечивает большую часть энергетических потребностей животного и позволяет достичь высокой эффективности преобразования целлюлозы и полуцеллюлозы, характерной для жвачных животных. Газообразные отходы энтеральной ферментации, углекислый газ и метан, удаляются из рубца отрыжкой. Выделение метана в ретикулуме¹ является эволюционной адаптацией, позволяющей экосистеме рубца утилизировать водород, который в противном случае может накапливаться и препятствовать ферментации углеводов и разложению клетчатки [10].

¹ Эндоплазматический ретикулум (ЭПР) (лат. reticulum — сеточка) или эндоплазматическая сеть — внутриклеточный органоид эукариотической клетки, представляющий собой разветвленную систему из окружающих мембраной уплощенных полостей, пузырьков и канальцев. ЭПР не является стабильной структурой и подвержен частым изменениям.

2.1. Роль кормов и кормовых добавок для сокращения энтерального метана

Интенсивные системы ротационного выпаса являются хорошим способом увеличения производства кормов и снижения выбросов оксида азота. Для этих систем характерно наличие нескольких небольших полей, называемых пастбищными участками (загонами), для ротации скота. Разделяя пастбища и чередуя животных, можно управлять плотностью поголовья и продолжительностью выпаса, тем самым регулируя распределение азотных выделений и восстанавливать растительность на определенных участках. В частности, более равномерное распределение мочи скота по всей площади пастбища снижает на нем концентрацию азота [11]. Кроме того, если не выпускать животных с пастбищ во время влажной погоды, это сокращает механические повреждения почвы.

Интенсивность выделения энтерального метана варьируется в зависимости от объема потребления корма, его качества и скорости перевариваемости.

Содержание лигнина² увеличивается во время роста растений, последовательно снижая их перевариваемость при употреблении их в пищу. Поэтому уборка кормовых растений для силосования на более ранней стадии их созревания повышает содержание растворимых углеводов и снижает содержание лигнина.

По некоторым данным, повышение качества кормов показывает потенциальное снижение энтерального метана примерно на 5% на единицу скорректированного по жиrowому белку молока [12].

Физическая обработка кормов, включая их измельчение, размалывание и обработку паром, также улучшает перевариваемость кормов и снижает выработку энтерального метана у жвачных животных [13].

Улучшение перевариваемости рациона за счет увеличения в нем доли концентратов является еще одной эффектив-

² Лигнин (от лат. lignum — дерево, древесина) — вещество, характеризующее одревесневшие стенки растительных клеток. Сложное полимерное соединение, содержащееся в клетках сосудистых растений и некоторых водорослях.

ной стратегией по снижению выбросов метана — примерно на 15% на единицу нормализованного молока. Однако при применении этого метода необходимо тщательно учитывать соотношение обычных кормов и концентратов. Так, заметного снижения энтерального метана можно ожидать при использовании концентратов от 35% до 40% в общем объеме кормовой смеси [14].

Такие кормовые добавки, как *electron receptors*, *ionophoric antibiotics*, *chemical inhibitors*, были успешно протестированы на их способность снижать выбросы метана [15]. Однако следует обратить внимание на недостаточное изучение возможной токсичности, возникающей при использовании некоторых из указанных соединений. Это повышает риски для здоровья животных и затрудняет широкое применение упомянутых добавок [16].

Добавление жиров или жирных кислот в рацион жвачных животных может снизить энтеральные выбросы метана как за счет уменьшения доли энергии, поступающей из ферментируемых углеводов, так и за счет изменения микробной популяции рубца [17].

Хотя некоторые побочные продукты (например, хлопковое семя, пивная дробина, шрот холодного отжима канолы и т. д.) эффективны для снижения энтеральной ферментации, потенциал смягчения воздействия побочных продуктов с высоким содержанием масла не является устойчивым, и в некоторых случаях производство метана может увеличиться из-за повышенного потребления клетчатки.

Целесообразно упомянуть о швейцарско-британской компании Mootral, которая разработала добавку, сокращающую выбросы метана в среднем на 30%. Эта добавка основана на экстрактах чеснока и цитрусовых. Ее нужно смешивать с обычным кормом для крупного рогатого скота. Попадая в желудок животного, специальные вещества препятствуют образованию метана микробами. Компания планирует протестировать свою добавку на фермах США. Если не будет выявлено отрицательного влияния на здоровье соответствующих видов животных, то указанная разработка может стать весьма востребованной [18]. Сейчас добавка используется на нескольких фермах в Англии и помогает фермерам не только снизить выбросы, но и заработать так называемые «углеродные кредиты», которые можно продать более крупным компаниям, получая с этого определенную прибыль. Поясним, что «углеродный кредит» является особой формой разрешения государственных органов на выделение парниковых газов при осуществлении соответствующей деятельности. При нарушении допустимых объемов приходится платить огромные штрафы. Поэтому фирмы часто выкупают такие кредиты у предпринимателей, имеющих более экологичные производства.

Также выбросы метана, выделяемые в результате кишечной ферментации жвачных, можно снизить с помощью нескольких способов оптимизации кормления, в том числе путем уменьшения в кормах целлюлозы в сочетании с повышением энергетической ценности корма для КРС [19].

В целом, именно современные системы кормления жвачных животных на основе высококачественных кормов могут снизить выбросы ПГ от животноводства и сельского хозяйства. Одними из основных факторов, определяющих качество корма, являются стадия роста на момент сбора урожая и видовая смесь. Увеличение содержания клетчатки приводит к увеличению количества метана. В то время как кормовые бобовые могут снизить выбросы ПГ за счет снижения использования азотных удобрений и снижения образования паразитов у жвачных животных. Поэтому эти корма являются более экологически и экономически выгодными [20].

2.2. Использование морских водорослей для уменьшения метана в организме жвачных животных

В последние годы проводятся интенсивные исследования морских водорослей как перспективного сырья для животноводства. В немаловажной степени это связано с тем, что водоросли являются источником различных питательных веществ, включая белки, липиды, витамины, жирные кислоты, углеводы, минералы и другие нутриенты. Они также содержат биоактивные соединения, такие как антиметаногенные, антиоксидантные, противовоспалительные, а также антибактериальные или противовирусные агенты [21–25].

Возможность снижения количества энтерального метана с помощью добавок из морских водорослей является достаточно актуальной темой. Поскольку биологическая доступность полисахаридов в некоторых морских водорослях может привести к потенциальному снижению содержания метана, в настоящее время продолжают осуществляться исследования о возможном применении различных морских водорослей в кормлении скота [26].

Обладая высокой эффективностью и широким спектром действия против метаногенов рубца, использование некоторых красных морских водорослей для производства кормов представляет собой весьма перспективный метод снижения кишечных выбросов метана у жвачных животных, сохраняя при этом достаточно высокий уровень продуктивности скота. Исследования показали, что красная морская водоросль *Asparagopsis taxiformis* способна снизить выбросы метана у мясного и молочного скота до 95% при отсутствии негативного влияния на ферментацию рубца [27].

Также установлено, что диетическое питание с биомассой из морских водорослей, содержащих флоротанины или галогенорганические аналоги метана, может комплексно применяться для снижения кишечных выбросов метана и улучшения здоровья животных без использования экстрактов или метаболитов [28–31].

Из сказанного выше следует, что морские водоросли могут быть полезны для снижения кишечных выбросов ПГ без пагубного влияния на ферментацию рубца. Однако необходимы дополнительные исследования для установления такой нормы включения морских водорослей в рацион кормления, которая будет положительно влиять на производительность животных, сохранять высокоэффективные характеристики мясной туши, поддерживать необходимый уровень содержания жирных кислот в молоке и мясе, а также иметь противовоспалительное действие при функционировании рубца.

2.3. Выделение парниковых газов при хранении навоза

Известно, что навоз является источником выбросов метана и оксида азота, а их объем зависит не только от состава навоза, но и способов его хранения и переработки.

Оксид азота образуется в результате процессов нитрификации и денитрификации азота, содержащегося в навозе, который присутствует в основном в органической форме (например, протеины) и в неорганической форме в виде аммония и аммиака. Нитрификация происходит аэробно и преобразует аммоний и аммиак в нитриты, а затем в нитраты, в то время как денитрификация происходит анаэробно, преобразуя нитраты в оксид азота и азотный газ [32].

Органическое вещество и уровень содержания азота в экскрементах являются основными характеристиками, влияющими на интенсивность эмиссии метана и образования оксида азота. В анаэробных условиях органическое вещество лишь частично разлагается бактериями с выделением метана и углекислого газа. В то же время хранение или

обработка жидкого навоза в лагуне или резервуаре способствует образованию анаэробной среды, что приводит к увеличению выделения метана. Длительные периоды хранения навоза, а также теплые и влажные условия могут еще больше увеличить выбросы этих газов [33].

Кроме того, применение навоза в качестве удобрения для кормовых культур и отложение экскрементов на пастбищах также приводят к образованию значительного количества выбросов оксида азота. Но, хотя производство кормов для скота и связано с внесением большого количества азота в сельскохозяйственные земли, рациональное использование навоза может снизить потребность в производстве соответствующих удобрений [14].

С другой стороны, для образования выбросов оксида азота необходимо сочетание аэробных и анаэробных условий. Поэтому, когда навоз обрабатывается в твердом виде или складывается на пастбищах, производство оксида азота увеличивается, в то время как метана выделяется мало или вообще не выделяется.

В Таблице 1 представлены данные по выбросам метана от процессов внутренней ферментации и утилизации навоза сельскохозяйственных животных. Эти показатели были рассчитаны для всех видов животных с учетом поголовья, расхода валовой энергии и коэффициентов перевариваемости потребляемых кормов по регионам, а также энергии мочи и зольности сухого вещества навоза [34].

Как видим, 81,7% выбросов метана от ферментативных процессов и утилизации навоза приходится на крупный рогатый скот.

Таблица 1. Распределение выбросов метана по видам животных для основных технологических процессов

Table 1. Distribution of methane emissions by animal species for the main technological processes

Виды сельскохозяйственных животных	Выбросы метана по поголовью, %		
	Внутренняя ферментация	Система утилизации навоза	Суммарные выбросы
Крупный рогатый скот	36,2	25,1	35,0
в т. ч. коровы	49,6	19,9	46,7
Овцы	9,2	1,9	8,4
Свины	1,4	47,3	6,2
Прочие	3,6	5,8	3,7
Всего	100	100	100

Очевидно, что увеличение численности поголовья скота, наряду с постоянным поступлением питательных веществ из кормов, приводит к увеличению объемов навоза, который необходимо утилизировать. На долю хранящегося навоза приходится относительно небольшое количество прямых сельскохозяйственных парниковых газов, и технически возможно уменьшить больший процент этих выбросов [13].

Поскольку выброс метана увеличивается при повышении температуры хранящегося навоза, то соответствующее ее снижение может уменьшить выбросы на 30–50% [35]. При этом уровень снижения выбросов ПГ в результате применения этого метода варьируется в зависимости от видов используемой энергии и систем охлаждения.

Регулярный вывоз навоза во внешние хранилища является эффективной практикой, которая может быть реализована с использованием рифленых полов в сочетании с их очисткой, особенно в свиноводческих помещениях, а также при определенных условиях содержания КРС. В частности, регулярное очищение каналов под хлевом и постоянный вывоз навоза способствуют снижению выбросов метана и оксида азота на 55% и 41% соответственно [36].

Разделение твердых и жидких веществ в навозе — это технология переработки, которая частично отделяет твердые частицы от жидкого навоза с помощью гравитационных или механических систем, например, таких как центрифуги или фильтр-прессы. Органические компоненты с большим размером частиц следуют за твердым потоком в процессе сепарации, а затем складываются в кучи. Как показали некоторые исследования, потенциал снижения выбросов ПГ при использовании этой технологии достигает более 30% по сравнению с необработанным навозом [37].

Аэрируемое состояние хранилища ограничивает возможность выделения метана, однако потеря аммиака при компостировании и воздействии высоких температур может ускориться. Кроме того, оставшаяся жидкая фракция все еще является потенциальным источником дополнительных выбросов оксида азота. После исключения волокнистых и крупных кусков органического материала корка во время хранения не образуется, что приводит к увеличению испарения аммиака. Снижение выбросов ПГ в результате процесса разделения твердой и жидкой фракций может быть частично уравновешено выбросами аммиака, но важно отметить, что существует множество методов, которые позволяют решить эти проблемы. Например, обеспечить плотное укрытие хранилища жидкого навоза и его регулярное использование для внесения в почву [38].

Анаэробное сбраживание — это процесс биологической деградации, в результате которого из навоза в отсутствие кислорода образуется сброженный органический остаток и биогаз (в основном метан и углекислый газ). Биогаз, собранный из системы, часто используется для выработки электроэнергии и топлива для котлов или печей. С учетом применения сброженного навоза в качестве удобрения анаэробное сбраживание позволяет сократить выбросы парниковых газов более чем на 30% по сравнению с традиционными системами переработки навоза [39].

Тем не менее необходимо уделить дополнительное внимание рациональному использованию сброженного органического остатка, полученного из анаэробного сбраживания. Минерализация органического азота, происходящая в процессе биологического разложения, повышает содержание неорганического азота и кислотность стоков. В свою очередь, это может увеличить испарение аммиака [40]. При этом сочетание анаэробного сбраживания и разделения твердой и жидкой фаз снижает количество аммиака после сбраживания [36].

Рацион питания в значительной степени влияет на выделение азота у большинства сельскохозяйственных животных, поэтому содержание оксида азота в навозе может уменьшаться в зависимости от типа кормов. Низкобелковая диета эффективно снижает выбросы оксида азота при хранении навоза крупного рогатого скота. Однако при манипулировании пищевым азотом необходимо учитывать содержание азота в рационе [38]. Так, снижение количества белка может привести к увеличению количества ферментируемых углеводов, что повышает выбросы метана.

Рационы для всех видов животных должны быть сбалансированы по аминокислотам. Это позволяет сохранить продуктивность животных на должном уровне. Синтетические аминокислоты регулярно используются при балансировании рационов животных (свиней), которые содержат однокамерные желудки. Однако при использовании аминокислот в кормлении, как одного из методов сокращения выбросов парниковых газов, необходимо учитывать, что при производстве и применении соответствующих добавок происходит определенное воздействие на окружающую среду. Так, у жвачных животных добавление свободных

аминокислот приводит к быстрому разложению в рубце без значительного увеличения производительности животных. Напротив, защищенные аминокислоты противостоят химическим изменениям в рубце и могут достигать кишечного тракта, где они всасываются, увеличивая надой у молочных коров. Кормление протеином, близким к потребности животного, рекомендуется как эффективная стратегия снижения выбросов аммиака и оксида азота из навоза [37].

Сроки, количество и способ внесения удобрений являются важными факторами, влияющими на выбросы оксида азота в почву. Потери внесенных азотных удобрений до поглощения их культурой происходят в результате выщелачивания и денитрификации почв. Чтобы обеспечить поступление необходимого количества азота к растущей культуре, следует отказаться от внесения удобрений во время сезонов дождей или перед обильными ливнями. Такие методы могут помочь в оптимизации производства биомассы и снижении выбросов парниковых газов в почве [41].

Поскольку, как отмечалось выше, после внесения навоза в почву уменьшается количество выбросов метана, то сокращение времени хранения может существенно снизить объем выбросов. Однако частое внесение навоза в почву заметно повышает интенсивность выделения с полей углекислого газа и оксида азота. Для снижения этого отрицательного эффекта следует избегать внесения удобрений во время продолжительной влажной погоды, а также в периоды низкого поглощения азота растениями [13].

Современные хранилища обеспечивают гибкий подход при выборе времени для внесения навоза на поля. А минералогический анализ содержания навоза позволяет более точно отрегулировать внесение в почву соответствующих питательных веществ и тем самым минимизировать негативное воздействие на окружающую среду [17].

Использование ингибиторов нитрификации потенциально может снизить вымывание азота за счет преобразования аммиака в нитрат. Однако этот положительный эффект ослабляется из-за увеличения косвенных выбросов оксида азота, которые возникают из-за повышенного улетаживания аммиака [41]. В целом, ингибиторы нитрификации были продемонстрированы как достаточно эффективный метод снижения выбросов оксида азота.

2.4. Снижение выбросов путем повышения эффективности выращивания скота

Существует прямая связь между интенсивностью выбросов парниковых газов и эффективностью использования животных. Чем выше продуктивность животных, тем ниже воздействие на окружающую среду (в расчете на единицу продукции). Однако для повышения указанной эффективности необходимо высококачественное управление данным процессом, в том числе необходимо более полно использовать генетический потенциал скота. Так, соответствующие исследования показали, что генетическое улучшение, которое было достигнуто при выращивании бройлеров за последние 20 лет и обеспечило увеличение суточного прироста, а также конверсия кормов, существенно снизили выбросы ПГ на единицу веса [42].

Также необходимо отметить, что животные определенного генотипа, отобранные для увеличения производства, смогут реализовать свой потенциал только при достаточно высоких затратах на их содержание. Очевидно, что для этого нужно иметь в распоряжении необходимые ресурсы. Другими словами, новые породы, полученные в том числе при скрещивании, могут привести к существенному сокращению выбросов парниковых газов. Однако эти породы скота должны соответствовать всем тем производственным

системам, которые обеспечивают их содержание. Также необходимо учитывать климатические условия и ряд других факторов [43].

Низкая плодовитость означает, что для достижения производственных показателей в стаде требуется больше племенного скота. В свою очередь, для поддержания размера стада требуется больше замен животных. Это в определенной степени увеличивает выбросы парниковых газов. Исследования показали, что повышение плодовитости молочного скота приводит к снижению выбросов метана на 10–24% и оксида азота на 9–17%. Тем не менее увеличение репродуктивной нагрузки повышает метаболические требования, связанные с беременностью и лактацией. Это может негативно сказаться на здоровье животных и повысить риск метаболических заболеваний, а также снизить иммунную функцию и тем самым уменьшить плодовитость скота [17].

Ухудшение здоровья скота связано как с поведенческими, так и с метаболическими изменениями, которые могут влиять на выбросы ПГ несколькими способами. Например, животным, борющимся с инфекцией, требуется больше энергии для их содержания, поскольку болезнь снижает потребление корма или способность его переваривать. Соответственно, это приводит к снижению скорости роста скота, в результате чего затрачивается гораздо больше времени для достижения необходимой стадии выращивания и использования скота. В недавнем исследовании, проведенном в Великобритании, изучались экономически эффективные способы сокращения выбросов ПГ за счет улучшения здоровья крупного рогатого скота. Эти исследования показали, что болезни КРС могут увеличить выбросы парниковых газов до 24% на единицу произведенного молока и до 113% на единицу говяжьей туши [43].

Что касается оптимизации продуктивности скота, данная стратегия уже доказала свою эффективность в развитых и развивающихся странах относительно существенно смягчения последствий для окружающей среды. Однако эффективность этого подхода тоже зависит от нескольких факторов. Например, таких, как уровень генетического потенциала животного, степень внедрения современных технологий управления и применение ресурсосберегающего оборудования на всех этапах содержания и выращивания скота [42].

Благодаря использованию новых видов органических и минеральных удобрений, внедрению элементов улучшенного земледелия и современных управленческих решений при осуществлении аграрной и экологически обоснованной оптимизации применения азотных удобрений, можно существенно сократить выбросы ПГ при одновременном сохранении урожайности культур и повышении рентабельности их возделывания [44].

2.5. Экологизация сельского хозяйства

Несколько немецких ученых осуществили оценку количества ПГ, поступающих в атмосферу при производстве мяса промышленным способом и с помощью так называемого «органического» и «экологического» сельского хозяйства. Сторонники такого подхода рекомендуют минимизировать использование химических удобрений, искусственной подкормки и содержать животных в «природных» условиях. Они считают, что продукты, полученные этим путем, наносят меньший вред окружающей среде — в частности, снижается объем выбросов парниковых газов.

Однако в ходе указанной выше оценки выяснилось следующее. При «органическом» сельском хозяйстве животные не только медленнее растут, но и набирают меньшую живую массу. В результате при производстве того же количества

мяса выделяется больше метана, чем при выращивании животных обычным способом. Для исправления ситуации предложено ввести дополнительный налог на продукцию животноводства, так как, по мнению упомянутых ученых, действующие на нее цены неоправданно низки и не позволяют компенсировать ущерб, который наносится окружающей среде [45].

2.6. Компьютерные модели для прогнозирования выбросов парниковых газов

Проведение исследований, связанных с изучением особенностей выделения ПГ от кишечной ферментации скота, хранения и переработки навоза, является сложным процессом. В частности, сбор и измерение ПГ отнимают много времени, а количественная оценка этих газов часто требует дорогостоящего оборудования. Кроме того, предложения о смягчении последствий, разработанные для конкретной экологической зоны, не обязательно будут пригодны в другом регионе.

Пищевые привычки животных и доступные кормовые ресурсы также могут быть неодинаковыми в разных аграрных зонах. Помимо этого, в ряде случаев именно климатические условия, преобладающие в конкретной местности, становятся решающим фактором, влияющим на уровень ПГ в атмосфере.

Таким образом, самые разнообразные факторы, связанные с деятельностью в сфере животноводства, вносят вклад в выбросы парниковых газов и, следовательно, оказывают определенное влияние на изменение климата.

В связи со сложностью различных сельскохозяйственных систем затрудняются поиск и выбор универсальных стратегий по смягчению негативных последствий на природную среду. Вполне вероятны ситуации, когда та или иная стратегия будет определена с помощью действительно удачных экспериментов. Но к моменту их завершения, возможно, выяснится, что другие компоненты, которым ранее не придавалось серьезного значения, могут весьма сильно повлиять на объем выбросов газов.

Это означает, что часто дорогостоящие исследования необходимо повторять неоднократно — с целью выбора тех стратегий, которые могут стать экономически эффективными и менее трудоемкими, что в существенной мере обеспечит широкое их применение.

Таким образом, существует настоятельная необходимость в разработке более простых экономически эффективных технологий для количественной оценки выбросов ПГ и поиска соответствующих решений для сохранения благоприятного климата.

Компьютерные имитационные модели являются ценным инструментом для изучения обратной связи и установления прямой связи между смягчением последствий от выбросов парниковых газов и адаптацией к изменению (сохранению) климата в производственных системах, предназначенных для содержания жвачных животных. Эти модели предлагают значительные возможности для решения конкретных климатических проблем, обусловленных деятельностью в сфере животноводства [46].

В настоящее время разрабатываются и применяются различные инструменты и модели для оценки выбросов ПГ от животноводческих хозяйств в форме моделирования с применением соответствующих коэффициентов [47–51].

Эти модели получили широкое признание в научном сообществе благодаря усилиям, направленным на улучшение понимания влияния различных систем в производственной

сфере сельского хозяйства. Кроме того, указанные модели могут служить реальной альтернативой дорогостоящим, трудоемким и технически сложным экспериментам в полевых условиях и животноводческих помещениях [44].

3. Заключение

Сельское хозяйство, в частности, животноводство, требует значительного количества природных ресурсов и способствуют глобальному потеплению за счет выбросов метана и оксида азота.

Для удовлетворения растущих потребностей населения в продовольствии необходимо повысить продуктивность животноводства и снизить интенсивность выбросов ПГ на единицу продукции. Одним из основных способов достижения данной экологической цели является выработка и широкое применение стратегий по снижению выбросов этих газов при учете необходимости удовлетворения спроса на продукцию животноводства, обусловленного ростом населения.

Большинство подобных стратегий направлены на повышение продуктивности животных, что в целом ряде случаев невозможно без соблюдения принятых стандартов здоровья животных. Для усиления эффективности принимаемых мер необходимо учитывать сложные взаимодействия между многими компонентами аграрной деятельности, чтобы исключить неблагоприятные экологические компромиссы.

При определении общей устойчивости стратегии смягчения последствий выбросов ПГ и повышения ее эффективности необходимо учитывать крайнюю неоднородность сельскохозяйственного сектора АПК, которая может варьироваться в зависимости от различных систем животноводства, климатических и других условий. Как правило, ни одна мера в отдельности не будет охватывать весь потенциал сокращения выбросов, в то время как для достижения наилучшего результата потребуются их комбинация, выбранная из всего спектра существующих вариантов.

Однако стандартные процедуры, которыми можно было бы руководствоваться во всех основных случаях, пока не определены. Поэтому та или иная положительная практика снижения воздействия на окружающую среду должна восприниматься с учетом многих особенностей деятельности в сфере животноводства, на которую воздействует большое количество разнообразных факторов.

Смягчение последствий может происходить непосредственно за счет сокращения количества выбрасываемых парниковых газов или косвенно за счет повышения эффективности производства. Таким образом, для увеличения эффективности стратегий смягчения вышеуказанных последствий необходимо учитывать сложные взаимодействия между компонентами системы животноводства, чтобы избежать негативного воздействия на окружающую среду.

В настоящее время в целом ряде стран, заботящихся о своей экологии, наряду с оценкой доли сельскохозяйственного производства в общем объеме выбросов парниковых газов, ведутся исследования по разработке и совершенствованию методик эколого-экономической оценки воздействий, оказываемых животноводством на окружающую среду. Однако данные исследования достаточно трудоемки, что в существенной мере затрудняет их широкое применение. Таким образом, существует настоятельная необходимость в разработке более простых экономически эффективных технологий для количественной оценки выбросов ПГ и поиска соответствующих решений для сохранения благоприятного климата.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Ungerfeld, E. M., Beauchemin, K. A., Muñoz, C. (2022). Current perspectives on achieving pronounced enteric methane mitigation from ruminant production. *Frontiers in Animal Science*, 2, Article 795299. <https://doi.org/10.3389/fanim.2021.795299>
- Glasson, C. R. K., Kinley, R. D., de Nys, R., King, N., Adams, S. L., Packer, M. A. et al. (2022). Benefits and risks of including the bromoform containing seaweed *Asparagopsis* in feed for the reduction of methane production from ruminants. *Algal Research*, 64, Article 102673. [10.1016/j.algal.2022.102673](https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102673)
- Gros, V., Williams, J., Aardenne, J. A., Salisbury, G., Hofmann, R., Lawrence, M. G. et al. (2003). Origin of anthropogenic hydrocarbons and halocarbons measured in the summertime European outflow. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 3(4), 1893–1923. <https://doi.org/10.5194/acp-3-1223-2003>
- Berlin, J., Sund, V. (2010). Environmental life cycle assessment (LCA) of ready meals: LCA of two meals; pork and chicken a screening assessment of six ready meals. Göteborg: SIK – Institutet för livsmedel och bioteknik, 2010.
- Kiehl, J. T., Kevin, E. Trenberth, K.E. (1997). Earths Annual Global Mean Energy. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(2), 197–208. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<0197:EAGMEB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0197:EAGMEB>2.0.CO;2)
- Moares, L. E., Strathe A. B., Fadel, J. G., Casper, D. P., Kebreab, E. (2014). Prediction of enteric methane emissions from cattle. *Global Change Biology*, 20(7), 2140–2148. <https://doi.org/10.1111/gcb.12471>
- Dourmad, J.-Y., Rigolot, C., van der Werf, H. (17–20 May, 2008). *Emission of greenhouse gas, developing management and animal farming systems to assist mitigation*. Livestock and Global Climate Change, 2008, Hammamet, Tunisia, hal-01460853f
- Gerber, P. J., Hristov, A. N., Henderson, B., Makkar, H., Oh, J., Lee, C. et al. (2013). Technical options for mitigation of direct methane and nitrous oxide emissions from livestock: a review. *Animal: an International Journal of Animal Bioscience*, 7(Suppl 2), 220–234. <https://doi.org/10.1017/S1751731113000876>
- Beauchemin, K. A., Ungerfeld, E. M., Eckard, R. J., Wang, M. (2020). Review: Fifty years of research on rumen methanogenesis: lessons learned and future challenges for mitigation. *Animal*, 14(S1), S2–S16. <https://doi.org/10.1017/S1751731119003100>
- McAllister, T. A., Newbold, C. J. (2008). Redirecting rumen methane to reduce methanogenesis. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48(1–2), 7–13. <https://doi.org/10.1071/EA07218>
- Eckard, R. J., Grainger, C., de Klein, C. A. M. (2010). Options for the abatement of methane and nitrous oxide from ruminant production: a review. *Livestock Science*, 130(1–3), 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.02.010>
- Knapp, J. R., Laur, G. L., Vadas, P. A., Weiss, W.P., Tricarico, J.M. (2014). Invited review: enteric methane in dairy cattle production: quantifying the opportunities and impact of reducing emissions. *Journal of Dairy Science*, 97(6), 3231–3261. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7234>
- Pereira, L. G. R., Machado, F. S., Campos, M. M., Guimarães, R., Tomich, T. R., Reis, L. G. et al. (2015). Enteric methane mitigation strategies in ruminants: A review. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 28(2), 124–143. <https://doi.org/10.17533/udea.rccp.v28n2a02>
- Gerber, P. J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J. et al. (2013). Tackling climate change through live- stock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Rome: FAO. Retrieved from <https://www.fao.org/3/i3437e/i3437e.pdf> Accessed June 18, 2022
- Beauchemin, K. A., McAllister, T. A., McGinn, S. M. (2009). Dietary mitigation of enteric methane from cattle. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 4.35, 1–18. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR20094035>
- Herrero, M., Conant, R. T., Havlik, P., Thornton, P. K., Conant, R. T., Smith, P. et al. (2016). Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector. *Nature Climate Change*, 6(5), 452–461. <https://doi.org/10.1038/nclimate2925>
- Llonch, P., Haskell, M. J., Dewhurst, R. J., Turner, S. P. (2017). Current available strategies to mitigate greenhouse gas emissions in livestock systems: An animal welfare perspective. *Animal*, 11(2), 274–284. <https://doi.org/10.1017/S1751731116001440>
- Бельчикова, Е. (2021). Создана добавка для коровьего корма, которая снижает выбросы метана и поможет заработать фермерам. Электронный ресурс <https://yandex.ru/turbo/techinsider.ru/s/science/news-699933-sozdana-dobavka-dlya-korovego-korma-kotoraya-snizit-vybrosy-metana-i-pomozhet-zarabotat-fermeram/> Дата обращения 10.06.2022
- Самарджич, М., Валентини, Р., Васенев, И. И. (2014). Экологическая оценка удельной эмиссии парниковых газов при производстве и потреблении мясной продукции в условиях Центрального региона России. *Достижения науки и техники АПК*, 9, 61–64.
- Eugene, M., Klumpp, K., Sauvart, S. (2021) Methane mitigating options with forages fed to ruminants. *Grass Forage Science*. 76(2), 196–204. <https://doi.org/10.1111/gfs.12540>
- Pal, A., Kamthania, M. C., Kumar, A. (2014). Bioactive compounds and properties of seaweeds – a review. *Open Access Library Journal*, 1(04), Article e752. <https://doi.org/10.4236/oalib.1100752>
- Gaillard, C., Bhatti, H. S., Garrido, M., Lind, V., Roleda, M. Y., Weisbjerg, M. R. (2018). Amino acid profiles of nine seaweed species and their in-situ degradability in dairy cows. *Animal Feed Science and Technology*, 24, 210–222. <https://doi.org/10.1016/j.anifeeds.2018.05.003>
- Nunes, N., Valente, S., Ferraz, S., Barreto, M. C., Pinheiro de Carvalho, M. A. A. (2018) Nutraceutical potential of *Asparagopsis taxiformis* extracts and assessment of a downstream purification strategy. *Heliyon*, 4(11), Article e00957. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00957>
- Roque, B. M., Venegas, M., Kinley, R. D., de Nys R., Duarte, T. L., Yang, X. et al. (2021). Red seaweed (*Asparagopsis taxiformis*) supplementation reduces enteric methane by 80 percent in beef steers. *PLoS ONE*, 16(3 March), Article e024782017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247820>
- Duan, X.-J., Zhang, W.-W., Li, X.-M., Wang, B.-G. (2006). Evaluation of antioxidant property of extract and fractions obtained from a red alga, *Polysiphonia urceolata*. *Food Chemistry*, 95(1), 37–43 <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.12.015>
- Morais, T., Inacio, A., Coutinho, T., Ministro, M., Cotas J., Pereira L. et al. (2020). Seaweed potential in the animal feed: a review. *Marine Science and Engineering*, 8, Article 559. <https://doi.org/10.3390/mjse8080559>
- Roque, B. M., Salwen, J. K., Kinley, R., Kebreab, E. (2019). Inclusion of *Asparagopsis armata* in lactating dairy cow's diet reduces enteric methane emission by over 50 percent. *Journal of Cleaner Production*, 234, 132–138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.193>
- Kinley, R. D., Martinez-Fernandez, G., Mathews, M. K., de Nys, R. D., Magnusson, M., Tomkins, N. W. (2020). Mitigating the carbon footprint and improving the productivity of ruminant livestock agriculture using red seaweed. *Journal of Cleaner Production*, 259, Article 120836. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120836>
- Machado, L., Tomkins, N., Magnusson, M., Midgley, D. J., de Nys, R., Rosewarne, C. P. (2018). In vitro response of rumen microbiota to the anti-methanogenic red macroalga *Asparagopsis taxiformis*. *Microbial Ecology*, 75, 811–818. <https://doi.org/10.1007/s00248-017-1086-8>
- Tomkins, N. W., Colegate, S. M., Hunter, R. A. (2009). A bromochloromethane formulation reduces enteric methanogenesis in cattle-fed grain-based diets. *Animal Production Science*, 49(12), 1053–1058. <https://doi.org/10.1071/EA08223>
- Wang, Y., Xu, Z., Bach, S. J., McAllister, T. A. (2009). Sensitivity of *Escherichia coli* to seaweed (*Ascophyllum nodosum*) phlorotannins and terrestrial tannins. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 22(2), 238–245. <https://doi.org/10.5713/ajas.2009.80213>
- Saggar, S. (2010). Estimation of nitrous oxide emissions from ecosystems and its mitigation technologies. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 136(3–4), 189–191. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.01.007>
- Environmental Protection Agency (2010). Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990–2008. Washington (DC): U. S. Environmental Protection Agency. Retrieved from https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/508_complete_ghg_1990_2008.pdf Accessed June 15, 2022
- Гриднева, Т. Т. (2012). Эмиссия вредных газов при производстве животноводческой продукции. *Вестник ВНИИМЖ*, 4(8), 61–69.
- Borhan, M. S., Mukhtar, S., Capareda, S., Rahman, S. (2012). Greenhouse gas emissions from housing and manure management systems at confined live- stock operations. Chapter in a book: Waste Management – An Integrated Vision, Rijeka (Croatia): InTech. 259–296. <https://dx.doi.org/10.5772/51175>
- Sajeev, E. P. M., Winiwarter, W., Amon, B. (2018). Greenhouse gas and ammonia emissions from different stages of liquid manure management chains: Abatement options and emission interactions. *Journal of Environmental Quality*, 47(1), 30–41. <https://doi.org/10.2154/jeq.2017.05.0199>
- Montes, F., Meinen, R., Dell, C., Rotz, A., Hristov, A. N., Oh, J. et al. (2013). Special topics – Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: II. A review of manure management mitigation options. *Journal of Animal Science*, 91(11), 5070–5094. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6584>
- Holly, M. A., Larson, R. A., Powell, J. M., Ruark, M. D., Aguirre-Villegas, H. (2017). Greenhouse gas and ammonia emissions from digested and separated dairy manure during storage and after land application. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 239, 410–419. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.007>
- Battini, F., Agostini, A., Boulamanti, A. K., Giuntoli, J., Amaducci, S. (2014). Mitigating the environmental impacts of milk production via anaerobic digestion of manure: case study of a dairy farm in the Po Valley. *Science of the Total Environment*, 481(1), 196–208. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.038>
- Petersen, S. O., Sommer, S. G. (2011). Ammonia and nitrous oxide interactions: Roles of manure organic matter management. *Animal Feed Science and Technology*, 166–167, 503–513. <https://doi.org/10.1016/j.anifeeds.2011.04.077>
- Lam, S.K., Suter, H., Mosier, A.R., Chen, D. (2016). Using nitrification inhibitors to mitigate agricultural N₂O emission: a double-edged sword? *Global Change Biology*, 23(2), 485–489. <https://doi.org/10.1111/gcb.13338>
- Grossi, G., Goglio, P., Vitali, A., Williams, A.G. (2019). Livestock and climate change: impact of livestock on climate and mitigation strategies. *Animal Frontiers*, 9(1), 69–76. <https://doi.org/10.1093/af/vfy034>

43. Williams, A., Chatterton, J., Hateley, G., Curwen, A., Elliott, J. (2015). A systems-life cycle assessment approach to modelling the impact of improvements in cattle health on greenhouse gas emissions. *Advances in Animal Biosciences*, 6(1), 29–31. <https://doi.org/10.1017/S2040470014000478>
44. Васенев И. И., Бузылев, А. В., Велик, А. В. (2007). Геоинформационно-методическое обеспечение агроэкологической оптимизации и прецезионного земледелия в условиях черноземной зоны России. *Известия Тимирязевской Сельскохозяйственной Академии*, 2, 28–55.
45. Pieper, M., Michalke, A., Gaugler, T. (2020). Calculation of external climate costs for food highlights inadequate pricing of animal products. *Nature Communications*, 11(1), Article 6117. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19474-6>
46. Jose, V.S., Sejian, V., Bagath, M., Ratnakaran, A. P., Lees, A.M., Al-Hosni, Y.A.S. et al. (2016). Modeling of Greenhouse Gas Emission from Livestock. *Frontiers in Environmental Science*, 4(APR), Article 27. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00027>
47. Petersen, S. O., Blanchard, M., Chadwick, D., Del Prado, A., Edouard, N., Mosquera, J. et al. (2013). Manure management for greenhouse gas mitigation. *Animal*, 7(SpecialIssue2), 266–282. <https://doi.org/10.1017/S1751731113000736>
48. Amani, P., Schiefer, G. (2011). Review on suitability of available LCIA methodologies for assessing environmental impact of the food sector. *International Journal on Food System Dynamics*, 2(2), 194–206. <https://doi.org/10.18461/ijfsd.v2i2.228>
49. Gibbons, J. M., Ramsden, S. J., Blake, A. (2006). Modelling uncertainty in greenhouse gas emissions from UK agriculture at the farm level. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 112(4), 347–355. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.08.029>
50. De Vries, M., de Boer, I.J.M. (2010). Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments. *Livestock Science*, 128(1–3), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.11.007>
51. Bryant, J.R., Snow, V.O. (2008). Modelling pastoral farm agro-ecosystems: A review. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 51(3), 349–363. <https://doi.org/10.1080/00288230809510466>

REFERENCES

1. Ungerfeld, E.M., Beauchemin, K.A., Muñoz, C. (2022). Current perspectives on achieving pronounced enteric methane mitigation from ruminant production. *Frontiers in Animal Science*, 2, Article 795299. <https://doi.org/10.3389/fanim.2021.795200>
2. Glasson, C.R.K., Kinley, R.D., de Nys, R., King, N., Adams, S. L., Packer, M. A. et al. (2022). Benefits and risks of including the bromoform containing seaweed *Asparagopsis* in feed for the reduction of methane production from ruminants. *Algal Research*, 64, Article 102673. [10.1016/j.algal.2022.102673](https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102673)
3. Gros, V., Williams, J., Aardenne, J.A., Salisbury, G., Hofmann, R., Lawrence, M.G. et al. (2003). Origin of anthropogenic hydrocarbons and halocarbons measured in the summertime European outflow. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 3(4), 1893–1923. <https://doi.org/10.5194/acp-3-1223-2003>
4. Berlin, J., Sund, V. (2010). Environmental life cycle assessment (LCA) of ready meals: LCA of two meals; pork and chicken a screening assessment of six ready meals. Göteborg: SIK – Institutet för livsmedel och bioteknik, 2010.
5. Kiehl, J.T., Kevin, E. Trenberth, K.E. (1997). Earths Annual Global Mean Energy. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(2), 197–208. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<0197:EAGMEB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0197:EAGMEB>2.0.CO;2)
6. Moares, L.E., Strathe A. B., Fadel, J.G., Casper, D.P., Kebreab, E. (2014). Prediction of enteric methane emissions from cattle. *Global Change Biology*, 20(7), 2140–2148. <https://doi.org/10.1111/gcb.12471>
7. Dourmad, J.-Y., Rigolot, C., van der Werf, H. (17–20 May, 2008). *Emission of greenhouse gas, developing management and animal farming systems to assist mitigation*. Livestock and Global Climate Change, 2008, Hammamet, Tunisia, hal-01460853f
8. Gerber, P.J., Hristov, A.N., Henderson, B., Makkar, H., Oh, J., Lee, C. et al. (2013). Technical options for mitigation of direct methane and nitrous oxide emissions from livestock: a review. *Animal: an International Journal of Animal Bioscience*, 7(Suppl 2), 220–234. <https://doi.org/10.1017/S1751731113000876>
9. Beauchemin, K.A., Ungerfeld, E.M., Eckard, R.J., Wang, M. (2020). Review: Fifty years of research on rumen methanogenesis: lessons learned and future challenges for mitigation. *Animal*, 14(S1), S2–S16. <https://doi.org/10.1017/S1751731119003100>
10. McAllister, T.A., Newbold, C.J. (2008). Redirecting rumen methane to reduce methanogenesis. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48(1–2), 7–13. <https://doi.org/10.1071/EA07218>
11. Eckard, R.J., Grainger, C., de Klein, C.A.M. (2010). Options for the abatement of methane and nitrous oxide from ruminant production: a review. *Livestock Science*, 130(1–3), 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.02.010>
12. Knapp, J.R., Laur, G.L., Vadas, P.A., Weiss, W.P., Tricarico, J.M. (2014). Invited review: enteric methane in dairy cattle production: quantifying the opportunities and impact of reducing emissions. *Journal of Dairy Science*, 97(6), 3231–3261. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7234>
13. Pereira, L.G.R., Machado, F.S., Campos, M.M., Guimarães, R., Tomich, T. R., Reis, L.G. et al. (2015). Enteric methane mitigation strategies in ruminants: A review. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 28(2), 124–143. <https://doi.org/10.17533/udea.rccp.v28n2a02>
14. Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J. et al. (2013). Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Rome: FAO. Retrieved from <https://www.fao.org/3/i3437e/i3437e.pdf> Accessed June 18, 2022
15. Beauchemin, K.A., McAllister, T.A., McGinn, S.M. (2009). Dietary mitigation of enteric methane from cattle. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 4.35, 1–18. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR20094035>
16. Herrero, M., Conant, R.T., Havlik, P., Thornton, P. K., Conant, R. T., Smith, P. et al. (2016). Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector. *Nature Climate Change*, 6(5), 452–461. <https://doi.org/10.1038/nclimate2925>
17. Llonch, P., Haskell, M.J., Dewhurst, R.J., Turner, S.P. (2017). Current available strategies to mitigate greenhouse gas emissions in livestock systems: An animal welfare perspective. *Animal*, 11(2), 274–284. <https://doi.org/10.1017/S1751731116001440>
18. Belchikova, E. (2021). Created a cow feed additive that will reduce methane emissions and help farmers earn money. Retrieved from <https://yandex.ru/turbo/techinsider.ru/s/science/news-699935-sozdana-dobavka-dlya-korovego-korma-kotoraya-snizit-vybrosy-metana-i-pomozhet-zarabotat-fermeram/> Accessed June 10, 2022 (In Russian)
19. Samardzic, M., Valentini, R., Vasenev, I.I. (2014). Environmental assessment of specific greenhouse gas emissions by meat production and consumption in the Central Region of Russia's conditions. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*, 9, 61–64. (In Russian)
20. Eugene, M., Klumpp, K., Sauvant, S. (2021) Methane mitigating options with forages fed to ruminants. *Grass Forage Science*, 76(2), 196–204. <https://doi.org/10.1111/gfs.12540>
21. Pal, A., Kamthania, M.C., Kumar, A. (2014). Bioactive compounds and properties of seaweeds-a review. *Open Access Library Journal*, 1(04), Article e752. <https://doi.org/10.4236/oalib.1100752>
22. Gaillard, C., Bhatti, H.S., Garrido, M., Lind, V., Roleda, M.Y., Weisbjerg, M.R. (2018). Amino acid profiles of nine seaweed species and their in-situ degradability in dairy cows. *Animal Feed Science and Technology*, 24, 210–222. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.05.003>
23. Nunes, N., Valente, S., Ferraz, S., Barreto, M.C., Pinheiro de Carvalho, M.A.A. (2018) Nutritional potential of *Asparagopsis taxiformis* extracts and assessment of a downstream purification strategy. *Heliyon*, 4(11), Article e00957. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00957>
24. Roque, B.M., Venegas, M., Kinley, R.D., de Nys R., Duarte, T. L., Yang, X. et al. (2021). Red seaweed (*Asparagopsis taxiformis*) supplementation reduces enteric methane by 80 percent in beef steers. *PLoS ONE*, 16(3March), Article e024782017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247820>
25. Duan, X.-J., Zhang, W.-W., Li, X.-M., Wang, B.-G. (2006). Evaluation of antioxidant property of extract and fractions obtained from a red alga, *Polysiphonia urceolata*. *Food Chemistry*, 95(1), 37–43 <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.12.015>
26. Morais, T., Inacio, A., Coutinho, T., Ministro, M., Cotas J., Pereira L. et al. (2020). Seaweed potential in the animal feed: a review. *Marine Science and Engineering*, 8, Article 559. <https://doi.org/10.3390/mjse8080559>
27. Roque, B.M., Salwen, J.K., Kinley, R., Kebreab, E. (2019). Inclusion of *Asparagopsis armata* in lactating dairy cow's diet reduces enteric methane emission by over 50 percent. *Journal of Cleaner Production*, 234, 132–138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.193>
28. Kinley, R.D., Martinez-Fernandez, G., Mathews, M.K., de Nys, R.D., Magnusson, M., Tomkins, N.W. (2020). Mitigating the carbon footprint and improving the productivity of ruminant livestock agriculture using red seaweed. *Journal of Cleaner Production*, 259, Article 120836. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120836>
29. Machado, L., Tomkins, N., Magnusson, M., Midgley, D.J., de Nys, R., Rosewarne, C.P. (2018). In vitro response of rumen microbiota to the anti-methanogenic red macroalga *Asparagopsis taxiformis*. *Microbial Ecology*, 75, 811–818. <https://doi.org/10.1007/s00248-017-1086-8>
30. Tomkins, N.W., Colegate, S.M., Hunter, R.A. (2009). A bromochloromethane formulation reduces enteric methanogenesis in cattle-fed grain-based diets. *Animal Production Science*, 49(12), 1053–1058. <https://doi.org/10.1071/EA08223>
31. Wang, Y., Xu, Z., Bach, S.J., McAllister, T.A. (2009). Sensitivity of *Escherichia coli* to seaweed (*Ascophyllum nodosum*) phlorotannins and terrestrial tannins. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 22(2), 238–245. <https://doi.org/10.5713/ajas.2009.80213>
32. Sagar, S. (2010). Estimation of nitrous oxide emissions from ecosystems and its mitigation technologies. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 136(3–4), 189–191. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.01.007>
33. Environmental Protection Agency (2010). Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990–2008. Washington (DC): U. S. Environ-

- mental Protection Agency. Retrieved from https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/508_complete_ghg_1990_2008.pdf Accessed June 15, 2022
34. Gridneva, T.T. (2012). Emission of harmful gases livestock product. *Bulletin of the All-Russian Scientific Research Institute of Animal Husbandry Mechanization*, 4(8), 61–69. (In Russian)
 35. Borhan, M.S., Mukhtar, S., Capareda, S., Rahman, S. (2012). Greenhouse gas emissions from housing and manure management systems at confined livestock operations. Chapter in a book: Waste Management — An Integrated Vision, Rijeka (Croatia): InTech. 259–296. <https://dx.doi.org/10.5772/51175>
 36. Sajeev, E.P.M., Winiwarter, W., Amon, B. (2018). Greenhouse gas and ammonia emissions from different stages of liquid manure management chains: Abatement options and emission interactions. *Journal of Environmental Quality*, 47(1), 30–41. <https://doi.org/10.2134/jeq2017.05.0199>
 37. Montes, F., Meinen, R., Dell, C., Rotz, A., Hristov, A.N., Oh, J. et al. (2013). Special topics — Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: II. A review of manure management mitigation options. *Journal of Animal Science*, 91(11), 5070–5094. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6584>
 38. Holly, M.A., Larson, R.A., Powell, J.M., Ruark, M.D., Aguirre-Villegas, H. (2017). Greenhouse gas and ammonia emissions from digested and separated dairy manure during storage and after land application. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 239, 410–419. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.007>
 39. Battini, F., Agostini, A., Boulamanti, A.K., Giuntoli, J., Amaducci, S. (2014). Mitigating the environmental impacts of milk production via anaerobic digestion of manure: case study of a dairy farm in the Po Valley. *Science of the Total Environment*, 481(1), 196–208. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.038>
 40. Petersen, S.O., Sommer, S. G. (2011). Ammonia and nitrous oxide interactions: Roles of manure organic matter management. *Animal Feed Science and Technology*, 166–167, 503–513. <https://doi.org/10.1016/j.anifeeds.2011.04.077>
 41. Lam, S.K., Suter, H., Mosier, A.R., Chen, D. (2016). Using nitrification inhibitors to mitigate agricultural N₂O emission: a double-edged sword? *Global Change Biology*, 23(2), 485–489. <https://doi.org/10.1111/gcb.13338>
 42. Grossi, G., Goglio, P., Vitali, A., Williams, A.G. (2019). Livestock and climate change: impact of livestock on climate and mitigation strategies. *Animal Frontiers*, 9(1), 69–76. <https://doi.org/10.1093/af/vfy034>
 43. Williams, A., Chatterton, J., Hateley, G., Curwen, A., Elliott, J. (2015). A systems-life cycle assessment approach to modelling the impact of improvements in cattle health on greenhouse gas emissions. *Advances in Animal Biosciences*, 6(1), 29–31. <https://doi.org/10.1017/S2040470014000478>
 44. Vasenyov I. I., Buzlyov A. V., Belik A. V. (2007). Geo-informational and methodical grounds for agroecological optimization and precise farming under conditions of black-earth-zone in Russian Federation. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*, 2, 28–55. (In Russian)
 45. Pieper, M., Michalke, A., Gaugler, T. (2020). Calculation of external climate costs for food highlights inadequate pricing of animal products. *Nature Communications*, 11(1), Article 6117. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19474-6>
 46. Jose, V.S., Sejian, V., Bagath, M., Ratnakaran, A. P., Lees, A.M., Al-Hosni, Y.A.S. at al. (2016). Modeling of Greenhouse Gas Emission from Livestock. *Frontiers in Environmental Science*, 4(APR), Article 27. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00027>
 47. Petersen, S. O., Blanchard, M., Chadwick, D., Del Prado, A., Edouard, N., Mosquera, J. at al. (2013). Manure management for greenhouse gas mitigation. *Animal*, 7(Specialissue2), 266–282. <https://doi.org/10.1017/S1751731113000736>
 48. Amani, P., Schiefer, G. (2011). Review on suitability of available LCIA methodologies for assessing environmental impact of the food sector. *International Journal on Food System Dynamics*, 2(2), 194–206. <https://doi.org/10.18461/ijfsd.v2i2.228>
 49. Gibbons, J. M., Ramsden, S. J., Blake, A. (2006). Modelling uncertainty in greenhouse gas emissions from UK agriculture at the farm level. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 112(4), 347–355. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.08.029>
 50. De Vries, M., de Boer, I.J.M. (2010). Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments. *Livestock Science*, 128(1–3), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.11.007>
 51. Bryant, J.R., Snow, V.O. (2008). Modelling pastoral farm agro-ecosystems: A review. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 51(3), 349–363. <https://doi.org/10.1080/00288230809510466>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Петрунина Ирина Всеволодовна — старший научный сотрудник, Центр «Экономико-аналитических исследований и информационных технологий», Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, г. Москва, ул. Талалихина, д.26 Тел.: +7-495-676-95-11 доб. 253 E-mail: i.petrulina@fnfps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7287-3511	Irina V. Petrunina, Senior Researcher, Center of Economic and Analytical Research and Information Technologies, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhina str., 109316, Moscow, Russia Tel.: +7-495-676-95-11 (253) E-mail: i.petrulina@fnfps.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7287-3511
Горбунова Наталья Анатольевна — кандидат технических наук, ученый секретарь, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, г. Москва, ул. Талалихина, д.26 Тел.: +7-495-676-95-11 доб. 316 E-mail: n.gorbunova@fnfps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4249-9316	Nataliya A. Gorbunova, Candidate of Technical Sciences, Scientific Secretary, V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhina str., 109316, Moscow, Russia Tel.: +7-495-676-95-11 (316) E-mail: n.gorbunova@fnfps.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4249-9316
Критерии авторства	Contribution
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.