

Научная статья
УДК 636.084.1: 636.085
doi: 10.28983/asj.y2023i1pp102-108

Влияние различных доз органического марганца на метаногенез и метаболические процессы в рубце мясных бычков

Виталий Александрович Рязанов, Баер Серекпаевич Нуржанов, Галимжан Калиханович Дускаев
ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук», г. Оренбург, Россия
e-mail: baer.nurzhanov@mail.ru

Аннотация. В статье отражены данные положительного влияния органического марганца на метаногенез и метаболические процессы в рубце бычков. Установлено, что внесение марганца в дозе 4,0 г на 1 кг сухого вещества в образец с отрубями в большей степени снижало выработку метана (на 26,4 %) относительно контроля.

Ключевые слова: пищеварение; метаногенез; переваримость; *in vitro*; рубцовая жидкость; марганец.

Для цитирования: Рязанов В. А., Нуржанов Б. С., Дускаев Г. К. Влияние различных доз органического марганца на метаногенез и метаболические процессы в рубце мясных бычков // Аграрный научный журнал. 2023. № 1. С. 102–108. <http://10.28983/asj.y2023i1pp102-108>.

VETERINARY MEDICINE AND ZOOTECHNICS

Original article

Effect of various doses of organic manganese on methanogenesis and metabolic processes in the rumen of meat bulls

Vitaly A. Ryazanov, Baer S. Nurzhanov, Galimzhan K. Duskaev
FGBNU "Federal Scientific Center for Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences", Orenburg, Russia
e-mail: baer.nurzhanov@mail.ru

Abstract. The article reflects data on the positive effect of organic manganese on methanogenesis and metabolic processes in the rumen of bulls. It was found that the introduction of manganese at a dose of 4,0 g per 1 kg of dry matter in a sample with bran to a greater extent reduced the production of methane by 26,4 % relative to the control.

Keywords: digestion; methanogenesis; digestibility; *in vitro*; ruminal fluid; manganese.

For citation: Ryazanov V. A., Nurzhanov B. S., Duskaev G. K. Effect of various doses of organic manganese on methanogenesis and metabolic processes in the rumen of meat bulls. Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal. 2023;(1):102–108. (In Russ.). <http://10.28983/asj.y2023i1pp102-108>.

Введение. Животноводство имеет важное экономическое значение. Но при этом оно оказывает большое влияние на окружающую среду, особенно выбросы парниковых газов (ПГ), таких как метан (особенно от производства жвачных животных) и закись азота (от использования навоза и обработки почвы для производства кормов). Метан (CH₄) является парниковым газом, вырабатываемым главным образом метаногенными микробами, обитающими в природных экосистемах (водно-болотных угодьях, океанах и озерах) и в желудочно-кишечном тракте беспозвоночных и позвоночных (термиты, жвачные животные) [1, 2].

Развитие животноводства сопровождается повышением концентрации парниковых газов в атмосфере и последующим изменением климата. С отраслевой точки зрения, жвачные животные выделяют значительно большее количество парниковых газов, чем свиньи и другие животные, питающиеся кормами с меньшим содержанием клетчатки [3]. В целом, принято считать, что рационы, богатые структурными углеводами (волокнистые корма низкого качества), при-





водят к более высоким выходам метана (выход CH_4 на единицу потребления сухого вещества), чем корма с низким содержанием структурных углеводов. Это связано с более медленной скоростью ферментации и более длительным временем удерживания кормов в рубце. Сокращение производства метана очень полезно для повышения энергетической эффективности рациона и защиты окружающей среды. Поэтому необходимо найти эффективный способ снижения продукции метана жвачными животными [4, 5].

Известно, что пищевые добавки с природными антиоксидантами могут модулировать параметры ферментации, микробное разнообразие и микробный метагеном, а также снижать выработку метана жвачными животными [6, 7]. Поэтому метаногены в рубце привлекают все больший интерес исследователей. Это важно для понимания их разнообразия и структуры сообщества, взаимосвязи с другими микробами в рубце и эффективности корма, выбросов метана и ответов на диетические вмешательства, которые были направлены на снижение выбросов CH_4 в рубце [8]. Следовательно, правильное управление кормлением с адекватным потреблением минералов может предложить эффективный подход к поддержанию высокого уровня продуктивности и здоровья крупного рогатого скота в течение всего периода выращивания, а также поможет снизить выбросы метана [9, 10].

Известно, что соответствующие добавки микроэлементов могут улучшить иммунный ответ и здоровье копыт у крупного рогатого скота, а при гораздо более высоких дозах добавок свиньям и птице могут изменить микробную колонизацию кишечника, что приведет к улучшению здоровья кишечника [11, 12].

В будущем снижение выбросов может быть достигнуто с помощью генетики животных, разработки вакцин, программ раннего развития, составления диеты, использования альтернативных поглотителей водорода, химических ингибиторов и модификаторов ферментации. Следовательно, необходимо будет комбинировать стратегии для достижения значительного сокращения выбросов CH_4 , но необходимы дальнейшие исследования, чтобы определить, будут ли комбинированные антиметаногенные стратегии иметь последовательные аддитивные эффекты [13]. Однако опубликованные данные о связи между минеральным статусом и выбросами метана ограничены, в связи с чем исследования по данной теме являются актуальными.

Цель данной работы – изучение влияния различных дозировок органической формы марганца на метаболические процессы в рубце и метаногенез для выявления способности снижать выработку метана в рубце жвачных животных.

Методика исследований. Объектом исследования являлась рубцовая жидкость (РЖ), полученная от бычков казахской белоголовой породы (4 гол.) средней массой 250–265 кг, в возрасте 9–10 месяцев. В эксперименте использовали Биоплекс марганец в различных дозировках от производителя ООО «Оллтек» (Alltech, Россия). Это кормовая добавка, действующее вещество которой состоит из органических соединений марганца и протеинатов, получаемых путем инкубирования марганца, после очищения его гидролизатом.

Эксперимент проводили в четырех повторностях с использованием латинского квадрата 4×4 в лаборатории биологических испытаний и экспертиз Федерального научного центра биологических систем и агротехнологий Российской академии наук. Пробы содержимого рубца отбирали спустя 12 ч после кормления через хроническую фистулу рубца (ANKOM, $d = 80$ мм) резиновым шлангом наружным диаметром 40 мм в термос объемом 3 л. Транспортировку осуществляли в условиях низких температур (4–8 °С) в течение 20–30 мин. Рубцовую жидкость (предварительно подогретую до 39 °С) использовали сразу же при поступлении в лабораторию.

Исследования проводили методом *in vitro* с помощью установки – инкубатора ANKOM DaisyII (Ankom Technology Corp., Macedon, NY) по специализированной методике. Перед использованием пробу рубцовой жидкости фильтровали через 4 слоя марли и смешивали с буферным раствором в соотношении 1:4. Буферный раствор по химическому составу представляет собой слюну, поддерживает pH «искусственного рубца» близкую к физиологической. Перед смешиванием буферный раствор подогрели до 39 °С и насыщали углекислым газом.

Коэффициент переваримости сухого вещества *in vitro* вычисляли как разницу масс образца корма с мешочком до и после инкубации по следующей формуле:

$$K = (A - B) / C \times 100 \%,$$

где К – коэффициент переваримости сухого вещества корма, %; А – исходная масса 1 (образец корма с мешочком), мг; В – масса после инкубации (образец корма с мешочком), мг; С – исходная масса 2 (образец корма без массы мешочка), мг.

После инкубирования проводили отбор проб воздуха для определения уровня метана на приборе «Кристаллюкс-2000М» методом газовой хроматографии.

Уровень летучих жирных кислот (ЛЖК) в содержимом рубца определяли методом газовой хроматографии с пламенно-ионизационным детектированием на хроматографе газовом «Кристаллюкс-4000М». Для хроматографа с пламенно-ионизационным детектором и капиллярной колонкой выставляли параметры: программируемое повышение температуры термостата колонки от 60 до 260 °С, температура инжектора 250 °С, детектора 250 °С, подбирали необходимые скорости газов. Время анализа 40 мин, ввод пробы 1 мм³. В качестве образцов для градуировки использовали растворы смесей кислот с концентрациями 10, 25 и 50 мкг/см³. Регистрировали не менее двух хроматограмм каждого раствора, начиная с меньшей концентрации. Формы азота определяли на оборудовании Millab (Италия) методом Кьельдаля, состоящим из 3 этапов. Первый этап – минерализация пробы с помощью концентрированной серной кислоты, сульфата калия и сульфата меди. При этом органическое вещество окисляется в присутствии катализатора до СО₂ и Н₂О, а весь азот переходит в аммиак и связывается с серной кислотой, образуя сульфат аммония. Раствором щелочи нейтрализуется избыток серной кислоты для высвобождения аммиака. Второй этап – отгонка аммиака в приемную колбу со стандартным раствором борной кислоты. Третий этап – определение массовой доли азота с помощью титрования.

Результаты, полученные в исследовании, обработаны методом вариационной статистики с использованием критерия достоверности по Стьюденту (*t*-критерий) и пакета прикладных программ Statistica 10.0 (Stat Soft Inc., США).

Результаты исследований. В ходе исследований *in vitro* установлено, что уровень летучих жирных кислот в образцах при введении различных доз марганца был различным (табл. 1).

Таблица 1

Концентрация выделенных летучих жирных кислот в рубцовой жидкости *in vitro* при добавлении Mn

Название образца	Доза, г/кг СВ	Летучие жирные кислоты, ммоль/100 мл				
		уксусная	пропионовая	масляная	валерьяновая	капроновая
Отруби	–	0,07±0,0002	0,01±0,0001	0,02±0,0001	0,03±0,0004	0,008±0,0007
Отруби + Mn	3,0	0,75±0,004**	0,03±0,0003	0,64±0,006*	0,08±0,0002	0,13±0,004*
Отруби + Mn	4,0	0,20±0,001*	0,06±0,0002	0,13±0,002*	0,02±0,001	0,08±0,0002
Отруби + Mn	5,0	0,16±0,003*	0,05±0,0008	0,02±0,0011	0,05±0,0003	0,01±0,0003

Примечание: * $P \leq 0,05$; ** $P \leq 0,01$ в сравнении с контрольной группой; СВ – сухое вещество (здесь и далее).

По общему содержанию летучих жирных кислот в рубцовой жидкости образцы с марганцем превосходили образец с отрубями (контроль) на 0,152–1,49 ммоль/100 мл. Наибольшие значения летучих жирных кислот отмечали в образце с 3 г/кг сухого вещества марганца. Он превосходил контрольный образец по содержанию уксусной кислоты на 0,68 ммоль/100 мл, пропионовой – на 0,02 ммоль/100 мл, масляной – на 0,62 ммоль/100 мл, валерьяновой – на 0,05 ммоль/100 мл и капроновой – на 0,122 ммоль/100 мл. В то же время внесение марганца в дозе 4 г/кг сухого вещества способствовало снижению концентрации валерьяновой кислоты по сравнению с исход-



ным образцом на 33,3 %. Следует отметить, что при увеличении дозировки марганца количество установленных летучих жирных кислот снижалось прямо пропорционально.

Образцы с марганцем уступали контролю по содержанию общего, небелкового, аммиачного и белкового азота в рубцовой жидкости (табл. 2).

Таблица 2

Содержание азота в рубцовой жидкости *in vitro* при различных дозировках Mn

Название образца	Доза, г/кг СВ	Форма азота, мг/%				
		общий	небелковый	аммиачный	мочевинный	белковый
Отруби	–	92,4± 1,4	21,0± 1,2	4,2±1,3	4,13±1,5	71,4±1,7
Отруби + Mn	3,0	38,2±1,1	16,9±1,4	2,2±1,7	5,7±1,9*	19,8±1,6
Отруби + Mn	4,0	41,1±1,3	16,5±1,5**	2,3±1,2	6,1±1,8	18,7±1,8*
Отруби + Mn	5,0	37,8±1,8**	17,5±1,3	2,1±1,1	6,0±1,9*	20,3±1,1

Так, доза марганца в 5 г/кг сухого вещества способствовала наименьшей выработке общего азота – на 59,09 % ($P \leq 0,01$), небелкового – на 16,60 %, белкового – на 71,56 % по сравнению с контрольным образцом, содержащим отруби в чистом виде. Лишь по содержанию мочевино-го азота опытные образцы превосходили образец с чистыми отрубями на 38,01–47,69 %. Анализируя опытные образцы между собой, можно отметить, что доза 4 г/кг СВ марганца способствовала увеличению в рубцовой жидкости общего азота на 7,05 и 8,02 % по сравнению с дозами 3 и 5 г/кг СВ марганца.

Внесение марганца 4,0 г на 1 кг сухого вещества в образец с отрубями в большей степени снижало (на 26,4 %) выработку метана, чем другие его дозировки. Так, доза 3,0 г показала повышение уровня метана в рубцовой жидкости на 11,5 % ($P \leq 0,05$), а доза 5,0 г – на 63,6 % ($P \leq 0,05$) относительно контроля (табл. 3).

Таблица 3

Концентрация метана и углекислого газа *in vitro*

Название образца	Доза, г/кг СВ	Концентрация метана (CH ₄)	
		CH ₄ , г/м ³	эквивалент CO ₂ е/г
Отруби	–	12,1±2,2	302,5±1,1
Отруби + Mn	3,0	13,5±1,7*	337,5±1,9*
Отруби + Mn	4,0	8,9±2,6	222,5±1,2
Отруби + Mn	5,0	19,8±1,3**	495,0±2,3*

В образце, имеющем в своем составе органический марганец в дозе 5 г на 1 кг сухого вещества отрубей, установлено наибольшее количество углекислого газа (CO₂) – на 192,5 е/г (38,80 %); 157,5 е/г (31,81 %); 272,5 е/г (55,05 %) соответственно по сравнению с контрольным образцом и вариантами отруби + Mn 3,0 г/кг и отруби + Mn 4,0 г/кг сухого вещества. Во всех группах была отмечена прямая зависимость между уровнем CH₄ и CO₂.

Внесение марганца в образцы с отрубями способствовало снижению переваримости сухого вещества отрубей на 1,0–3,5 % по сравнению с контролем (табл. 4). Причем данное снижение увеличивалось по мере увеличения дозы внесенного марганца.

Несмотря на то, что в литературе уделяется большое внимание данной тематике, все же между различными экспериментами существуют существенные расхождения в отношении величины эффективности и неблагоприятного воздействия на переваривание и ферментацию корма.



Переваримость сухого вещества отрубей *in vitro* с добавлением Mn

Название образца	Доза, г/кг СВ	Переваримость СВ, %
Отруби	–	63,4±0,82
Отруби + Mn	3,0	62,4±4,0
Отруби + Mn	4,0	61,5±2,7**
Отруби + Mn	5,0	59,9±2,6*

В задачу нашего исследования входило снижение выработки метана в рубце жвачных животных с использованием органического марганца и оценка его влияния на метаболические процессы в рубце и метаногенез.

О способности растительных веществ смещать соотношение ацетата к бутирату описывается в работе [14], где указывается на способность фитонутриентов и фитобиотиков смещать ферментацию в сторону образования пропионата и бутирата с ингибированием метаногенеза. Наши данные свидетельствуют, что наибольшие значения летучих жирных кислот наблюдались в образце с марганцем в дозе 3 г/кг сухого вещества.

В ходе опыта было установлено, что внесение марганца в дозировке 4,0 г на 1 кг сухого вещества образца с отрубями в большей степени снижало выработку метана (на 26,4 %) по сравнению с контролем. Есть некоторые свидетельства того, что минеральные добавки снижают выделение кишечного метана за счет уменьшения плотности метаногенных архей [15]. Эффективность конкретной диетической стратегии смягчения воздействия CH_4 зависит от ее воздействия на поток и концентрацию H_2 в рубце, микробное сообщество, пути ферментации, время пребывания корма в рубце и взаимодействие между этими факторами [13].

Для снижения выделений метана при кормлении жвачных чаще используются фенольные соединения, дубильные вещества и сапонины [16]. Тем не менее, антиметаногенные эффекты кормовых добавок различаются в зависимости от их молекулярной структуры, при этом некоторые соединения аналогично приводят к одновременному снижению усвояемости корма. Также высокая растворимость некоторых микроэлементов в рубце может изменить усвояемость питательных веществ и ферментацию [17].

В нашем эксперименте были получены схожие результаты. Мы наблюдали уменьшение переваримости сухого вещества корма на 1,0–3,5 % при увеличении дозы внесения органического марганца, начиная с малой дозы. Аналогично ряд авторов отмечают, что состав корма может повлиять на популяцию микробов рубца, ответственных за выработку метана. Однако измененная среда рубца, в свою очередь, может повлиять на переваримость [9, 18] и использование питательных веществ рациона [19, 20].

Заключение. С целью снижения концентрации метана в рубце жвачных животных (на 26,4 %) можно использовать в кормлении органический марганец в дозировке 4,0 г на 1 кг сухого вещества концентрированных кормов.

Необходимы дальнейшие исследования для разработки стратегий, направленных как на смягчение воздействия метана, так и на улучшение продуктивности животных.

Исследования выполнены в соответствии с планом НИР на 2021–2023 гг. ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (№ 0761-2019-0005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rojas-Downing M. M., Nejadhashemi A.P., Harrigan T., Woznicki S. A. Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation // *Clim. Risk Manage.* 2017. Vol. 16. P. 145–163. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.02.001>.



2. Implementing an appropriate metric for the assessment of greenhouse gas emissions from livestock production: A national case study / S. J. Hörtenhubera et al. 2022. Vol.16. Article 100638. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2022.100638>.
3. Exploring the landscape of livestock ‘Facts’ / G. R. Salmon et al. // *Global Food Security*. 2020. Vol. 25. Article 100329.
4. Mitigating the carbon footprint and improving productivity of ruminant livestock agriculture using a red seaweed / R. D. Kinley et al. // *J. Clean. Prod.* 2020. No. 259. Article 120836.
5. Supplementation of DHA-Gold pre and/or postnatally to goat kids modifies in vitro methane production and rumen morphology until 6 mo old / A. Ruiz-González et al. // *J Anim Sci*. 2018. No 96(11). P. 4845–4858. doi: 10.1093/jas/sky307.
6. The effects of selenium on rumen fermentation parameters and microbial metagenome in goats / X. Tian, X. Wang, J. Li et al. // *Fermentation*. 2022. Vol. 8. P. 240.
7. Erickson P. S., Kalscheur K. F. Nutrition and feeding of dairy cattle // *Anim Agric*. 2020. No. 157. P. 80. 10.1016/B978-0-12-817052-6.00009-4.
8. Trace mineral source impacts rumen trace mineral metabolism and fiber digestion in steers fed a medium-quality grass hay diet / O. Guimaraes et al. // *J. Anim Sci*. 2021. No. 99(9). P. 220. doi: 10.1093/jas/skab220.
9. Mineral status and enteric methane production in dairy cows during different stages of lactation / Lubomíra Grešáková et al. // *BMC Vet Res*. 2021. Vol.17. P. 287. doi: 10.1186/s12917-021-02984-w.
10. Daniel J. B., Kvidera S. K., Martin-Tereso J. Total-tract digestibility and milk productivity of dairy cows as affected by trace mineral source // *J. Dairy Sci*. 2020. No. 103. P. 9081–9089. doi: 10.3168/jds.2020-18754.
11. Source of supplemental dietary copper, zinc, and manganese affects fecal microbial relative abundance in lactating dairy cows / M. J. Faulkner et al. // *Journal of Dairy Science*. 2017. No. 100(2). P. 1037–1044.
12. The effects of high dose of two manganese supplements (organic and inorganic) on the rumen microbial ecosystem / S. Kišidayová et al. // *PLoS One*. 2018. No. 13(1). 0191158. doi: 10.1371/journal.pone.0191158.
13. Review: Fifty years of research on rumen methanogenesis: lessons learned and future challenges for mitigation / K. A. Beauchemin et al. // *Animal*. 2020. No. 14(S1). P. 2–16. doi: 10.1017/S1751731119003100.
14. Host-mediated effects of phytonutrients in ruminants: A review / J. Oh et al. // *J. Dairy Sci*. 2017. No. 100(7). P. 5974–5983. doi: 10.3168/jds.2016-12341.
15. Effects of mineral salt supplement on enteric methane emissions, ruminal fermentation and methanogen community of lactating cows / X. Li et al. // *J. Anim Sci*. 2017. No. 88(8). P. 1049–1057. doi: 10.1111/asj.12738.
16. Feeding dairy cows with no or reduced amounts of forage Proceedings of the 10th Nordic Feed Science Conference, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden, Department of Animal Nutrition and Management / C. F. Børsting et al. // *Swedish University of Agricultural Sciences*. 2019. P. 87–91.
17. Methane production, rumen fermentation, and diet digestibility of Holstein and Jersey dairy cows being divergent in residual feed intake and fed at 2 forage-to-concentrate ratios / D. W. Olijhoek et al. // *J. Dairy Sci*. 2018. No. 101. P. 9926–9940. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-14278>.
18. Changes in in vitro gas and methane production from rumen fluid from dairy cows during adaptation to feed additives in vivo / G. Klop et al. // *Animal*. 2017. Vol. 11. P. 591–599. doi: 10.1017/S1751731116002019.
19. Evaluation of effects of rumen fluid in combination with probiotic preparations and vanillin on the luminescence of a recombinant strain *E. coli* / I. Karimov et al. // Paper presented at the E3S Web of Conferences. 2020. No. 143. doi:10.1051/e3sconf/202014302034.
20. Evaluation of the effects of plant extracts on cattle rumen microbiome / E.V. Yausheva et al. // Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. No. 341(1). doi:10.1088/1755-1315/341/1/012165.

REFERENCES

1. Rojas-Downing M. M., Nejadhashemi A. P., Harrigan T., Woznicki S. A. Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation. *Clim. Risk Manage*. 2017;(16):145–163. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.02.001>.
2. Implementing an appropriate metric for the assessment of greenhouse gas emissions from livestock production: A national case study / S. J. Hörtenhubera et al. 2022;(16):100638<https://doi.org/10.1016/j.animal.2022.100638>.
3. Exploring the landscape of livestock ‘Facts’ / G.R. Salmon, M. MacLeod, J.R. Claxton et al. *Global Food Security*. 2020;(25):100329.



4. Mitigating the carbon footprint and improving productivity of ruminant livestock agriculture using a red seaweed / R. D. Kinley et al. *J. Clean. Prod.* 2020;(259):120836.
5. Supplementation of DHA-Gold pre and/or postnatally to goat kids modifies in vitro methane production and rumen morphology until 6 mo old / A. Ruiz-González et al. *J Anim Sci.* 2018;96(11):4845–4858. doi: 10.1093/jas/sky307.
6. The effects of selenium on rumen fermentation parameters and microbial metagenome in goats / X. Tian et al. *Fermentation.* 2022;(8):240.
7. Erickson P. S., Kalscheur K. F. Nutrition and feeding of dairy cattle. *Anim Agric.* 2020;(157):80. 10.1016/B978-0-12-817052-6.00009-4.
8. Trace mineral source impacts rumen trace mineral metabolism and fiber digestion in steers fed a medium-quality grass hay diet / O. Guimaraes et al. *J. Anim Sci.* 2021;99(9):220. doi: 10.1093/jas/skab220.
9. Mineral status and enteric methane production in dairy cows during different stages of lactation / Ľubomíra Grešáková et al. *BMC Vet Res.* 2021;(17): 287. doi: 10.1186/s12917-021-02984-w.
10. Daniel J. B., Kvidera S. K., Martin-Tereso J. Total-tract digestibility and milk productivity of dairy cows as affected by trace mineral source. *J. Dairy Sci.* 2020;(103):9081–9089. doi: 10.3168/jds.2020-18754.
11. Source of supplemental dietary copper, zinc, and manganese affects fecal microbial relative abundance in lactating dairy cows / M. J. Faulkner et al. *Journal of Dairy Science.* 2017;100(2):1037–1044.
12. The effects of high dose of two manganese supplements (organic and inorganic) on the rumen microbial ecosystem / S. Kišidayová et al. *PLoS One.* 2018; 13(1):0191158. doi: 10.1371/journal.pone.0191158.
13. Review: Fifty years of research on rumen methanogenesis: lessons learned and future challenges for mitigation / K. A. Beauchemin et al. *Animal.* 2020; 14(S1): 2–16. doi: 10.1017/S1751731119003100.
14. Host-mediated effects of phytonutrients in ruminants: A review / J. Oh et al. *J. Dairy Sci.* 2017;100(7):5974–5983. doi: 10.3168/jds.2016-12341.
15. Effects of mineral salt supplement on enteric methane emissions, ruminal fermentation and methanogen community of lactating cows / X. Li et al. *J. Anim Sci.* 2017;88(8):1049–1057. doi: 10.1111/asj.12738.
16. Feeding dairy cows with no or reduced amounts of forage Proceedings of the 10th Nordic Feed Science Conference, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden, Department of Animal Nutrition and Management / C. F. et al. Swedish University of Agricultural Sciences. 2019. P. 87–91.
17. Methane production, rumen fermentation, and diet digestibility of Holstein and Jersey dairy cows being divergent in residual feed intake and fed at 2 forage-to-concentrate ratios / D. W. Olijhoek et al. *J. Dairy Sci.* 2018;(101):9926–9940. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-14278>.
18. Changes in in vitro gas and methane production from rumen fluid from dairy cows during adaptation to feed additives in vivo / G. Klop et al. *Animal.* 2017;(11):591–599. doi: 10.1017/S1751731116002019.
19. Evaluation of effects of rumen fluid in combination with probiotic preparations and vanillin on the luminescence of a recombinant strain *E. coli* / I. Karimov, K. Kondrashova, G. Duskaev et al. *Paper presented at the E3S Web of Conferences.* 2020;143. doi:10.1051/e3sconf/202014302034.
20. Evaluation of the effects of plant extracts on cattle rumen microbiome / E. V. Yausheva et al. *Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2019;341(1). doi:10.1088/1755-1315/341/1/012165.

Статья поступила в редакцию 17.11.2022; одобрена после рецензирования 23.11.2022; принята к публикации 29.11.2022.

The article was submitted 17.11.2022; approved after reviewing 23.11.2022; accepted for publication 29.11.2022.

