

doi:10.18286/1816-4501-2024-3-174-181

УДК: 636.32/.38.085.25+612.32:636.3

Влияние уровня концентратов на переваримость питательных веществ и количество метаногенов у овец

П. Д. Лахонин[✉], младший научный сотрудник

Н. С. Колесник, младший научный сотрудник

А. А. Зеленченкова, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник

ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста

42132, Россия, Московская область, Городской округ Подольск, поселок Дубровицы, дом 60

[✉]lakhonin.99@mail.ru

Резюме. В статье представлены результаты исследования влияния уровня концентратов на количество метаногенов и переваримость питательных веществ кормов у овец. Эксперимент проведен на овцах романовской породы с хроническими фистулами рубца по Басову. Опыт проведен методом групп периодов, длительность каждого 30 дней (n=6). В первый период овцы получали сено-концентратный рацион с содержанием 20 % концентратов, во второй – 30 % концентратов, в третий – 40 % концентратов по питательности. В конце каждого периода был проведен балансовый опыт и отобраны пробы содержимого рубца и кишечника (n=6). Увеличение доли концентратов в рационе не оказало существенного влияния на переваримость питательных веществ кормов. Отмечено наибольшее количество переваренного азота – 18,18 г. при вводе 40 % концентратов. При вводе 20 %, 30 % и 40 % концентратов в рацион овец количество выделенного CH₄ составило 21,10; 17,88 и 15,88 литр/сутки соответственно, то есть увеличение доли концентратов в структуре рациона в 2 раза способствует снижению выработки в желудочно-кишечном тракте CH₄ в 1,33 раза, что свидетельствует о снижении количества основных метаногенов как в рубце, так и в кишечнике. Полученные данные помогут в разработке стратегий по снижению выработки метана в организме жвачных животных для повышения эффективности использования энергии и снижения нагрузки на окружающую среду от сельского хозяйства.

Ключевые слова: овцы, концентраты, переваримость, микробиом, метаногены, метан.

Для цитирования: Лахонин П. Д., Колесник Н. С., Зеленченкова А. А., Влияние уровня концентратов на переваримость питательных веществ и количество метаногенов у овец // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. №3 (67). С. 174-181. doi:10.18286/1816-4501-2024-3-174-181

The effect of concentrate levels on nutrient digestibility and methanogen numbers in sheep

P. D. Lakhonin, N. S. Kolesnik, A. A. Zelenchenkova

L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry. 42132, Russia, Moscow Region, Podolsk Municipal District, Dubrovitsy, 60

[✉]lakhonin.99@mail.ru

Abstract. The article presents the results of a study on the effect of concentrate levels on methanogen numbers and the digestibility of feed nutrients in sheep. The experiment was carried out on Romanov sheep with chronic rumen fistulas according to Basov's method. The experiment was conducted using a period-group method, with each period lasting 30 days (n=6). In the first period, sheep received a hay-concentrate ration containing 20% of concentrates, in the second - 30% of concentrates, in the third - 40% of concentrates in nutritional value. At the conclusion of each period, a balance trial was conducted and samples of rumen and intestinal contents were taken (n=6). An increase in the proportion of concentrates in the diet did not have a significant effect on the digestibility of feed nutrients. The highest amount of digested nitrogen was observed - 18.18 g, with the introduction of 40% of concentrates. When 20%, 30% and 40% concentrates were introduced into the sheep diet, the amount of CH₄ released was 21.10; 17.88 and 15.88 liters/day, respectively, that is, an increase in the proportion of concentrates in the diet structure by 2 times reduces the production of CH₄ in the gastrointestinal tract by 1.33 times, which indicates a decrease in the numbers of basic methanogens both in the rumen and in the intestine. The findings will help in developing strategies to reduce methane production in ruminants to improve energy use efficiency and reduce the environmental impact of agriculture.

Keywords: sheep, concentrates, digestibility, microbiome, methanogens, methane.

For citation: Lakhonin P. D., Kolesnik N. S., Zelenchenkova A. A. The effect of concentrate levels on nutrient digestibility and methanogen numbers in sheep// Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2024;3(67): 174-181 doi:10.18286/1816-4501-2024-3-174-181

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации национального проекта "Наука и университеты" (FGGN-2022-0009).

Введение

Одной из важных проблем на сегодняшний день является изменение климата, связанное с антропогенными выбросами парниковых газов (ПГ) [1]. Во всем мире на долю животноводства приходится около 14...15 % от общего объема антропогенных выбросов ПГ, основным источником которых является метан (CH_4) (39,1 %) [2].

Метан находится на втором месте после углекислого газа (CO_2) по эффективности поглощения теплового излучения Земли. Доля влияния метана в создании парникового эффекта занимает примерно 30% от величины, занимаемой углекислым газом [3].

В основном CH_4 – побочный продукт микробной ферментации углеводов. В рубце жвачных животных находятся различные микробные популяции, представляющие группы простейших, бактерий и грибов, действующих на частички корма, разлагая полисахариды растений и производя летучие жирные кислоты (ЛЖК), а также углекислый газ (CO_2) и водород (H_2). Также в рубце имеются анаэробные метаногенные археи, продуцирующие метан посредством использования избытка H_2 и CO_2 в качестве основных субстратов [4, 5].

Также стоит отметить, что выделение CH_4 представляет собой потерю до 12% энергии, поступающей с пищей в рубец [6]. Таким образом, сокращение выбросов кишечного CH_4 поможет повысить эффективность использования энергии и снизить нагрузку на окружающую среду от сельского хозяйства [7].

Решение проблемы выделения метана в животноводстве требует комплексного подхода. Ведется активная работа по разработке и внедрению инновационных методов и технологий, направленных на сокращение выбросов метана в атмосферу [8, 9]. Было опубликовано множество статей, связанных с CH_4 , от секвенирования генома метаногенов рубца до возможных подходов и методов, которые могут быть приняты для уменьшения выбросов ПГ [10, 11].

Научный и практический интерес представляют стратегии, влияющие на метаногенез путем управления кормлением и питанием [12]. К ним относят использование кормовых добавок различной природы (например, танинов), модификаторов рубца, а также корректировка качества и количества потребляемого рациона [13, 14]. Одной из таких стратегий является повышение доли концентрированных кормов в рационе, с увеличением которых повышается его энергетическая плотность, а доля структурных углеводов снижается так же, как и рН рубца. Это приводит к снижению выработки CH_4 на единицу потребляемого сухого вещества (СВ) и ферментированного корма [15].

Использование концентратов легко сочетается с другими стратегиями, направленными на снижение выделения CH_4 . Например, ингибиторы метаногенеза, такие как 3-нитрооксипропанол (3-NOP) демонстрируют синергию с концентратами, в результате чего потенциал полезного действия ингибиторов увеличивается при концентратном кормлении [16].

Цель исследования – изучить влияние на количество метаногенов и переваримость у овец при скормливании 20, 30 и 40% концентрированных кормов для установления наиболее эффективного использования энергии корма, а также возможности контроля выбросов метана в атмосферу.

Материалы и методы

Исследования по изучению влияния рационов с разным уровнем концентратов на образование метана в организме мелких жвачных животных проводились в условиях физиологического двора и в лабораториях ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста. Эксперимент проводился методом групп-периодов на двухгодовалых овцах романовской породы в количестве 6 голов, имеющих живую массу 52-58 кг, с хроническими фистулами по Басову.

В первый период овцы получали сено-концентратный рацион с содержанием 20 % концентратов, во второй – 30 % концентратов, в третий – 40 % концентратов по питательности. Рационы для животных были сбалансированы по питательной и энергетической ценности, уровню минеральных веществ.

Основной рацион (ОР) соответствовал требованиям для данного возраста и весового показателя по показателям энергетической и питательной ценности [17]. Состав и питательность рационов представлен в таблице 1.

Таблица 1. Состав и питательность рационов овец

Корма	Группа		
	I-период	II-период	III-период
Сено злаково-разнотравное, кг	1,3	1,2	1,1
Концентраты, кг	0,230	0,340	0,460
Поваренная соль, г	5,0	5,0	5,0
В рационе содержится:			
Обменная энергия (ОЭ), МДж	11,54	11,83	12,20
Сухое вещество (сух.в-во), кг	1,22	1,23	1,25
Сырой протеин (СП), г	158	167	177
Переваримый протеин (ПП), г	115	120	129
Сырой жир (СЖ), г	32	33	35
Сырая клетчатка (СК), г	277	257	237
Кальций (Са), г	7,1	7,2	7,5
Фосфор (Р), г	4,4	4,5	4,6

Основной рацион, микроклимат и условия содержания были одинаковыми для всех периодов и находились в пределах зоогигиенических норм.

После завершения периодов кормления были проведены балансовые опыты, в которых изучали переваримость питательных веществ сена и комбикорма, а также использование азота по общепринятой методике.

Для того, чтобы определить влияние разного количества концентратов в рационе на поедаемость корма, ежедневно на протяжении всего учётного периода производился индивидуальный учёт заданных кормов и их остатков. По окончании опыта отобраны средние пробы кормов, кала, мочи подвергались химическому анализу.

В образцах воздушно-сухого состояния определяли содержание: общего азота – методом Кельдаля (ГОСТ 13496.4-2019); содержание сырого протеина – путем умножения процентного содержания азота на коэффициент 6,25; сырого жира – экстрагированием серным эфиром в аппарате Сокслета по методу С.В. Рушковского (ГОСТ 32905-2014); сырой клетчатки – кипячением в слабых растворах кислот и щелочей по методу Геннеберга и Штомана (ГОСТ 31675-2012); безазотистых экстрактивных веществ – расчетным путем по разности между количеством органического вещества и содержанием в нем сырых протеина, жира, клетчатки, золы и гигролаги.

Также в конце каждого балансового опыта по 3 периодам у всех опытных животных отбирались пробы содержимого толстого отдела кишечника и рубца для генетического исследования рубцовой и толстокишечной микробиоты. Использовался метод ПЦР-РВ с флуоресцентной детекцией, воспроизводимой при помощи комплекта реагентов «Колонофлор-16 (премиум)» ООО «Альфалаб».

Расшифровку результатов амплификации реализовывали с использованием программного обеспечения, входящего в состав набора «Колонофлор-16 (премиум)», согласно инструкции производителя. В процессе исследования было проанализировано 30 видов микроорганизмов, в том числе метаногены, которые продуцируют CH_4 .

Для изучения метанообразования животное помещали в метаболическую камеру и содержали в ней в течение 2-х смежных суток.

Полученные в опыте материалы обработаны биометрически с использованием метода дисперсионного анализа (ANOVA) посредством программы STATISTICA, version 13 Ru, StatSoft, Inc., 2011 (www.statsoft.com). При этом вычислены следующие величины: среднеарифметическая (M), среднеквадратическая ошибка ($\pm m$) и уровень значимости (p). Результаты исследований считали высокостатистически достоверными при $p < 0,001$ и достоверными при $p < 0,01$ и $p < 0,05$. При $p < 0,1$ до $p > 0,05$ - тенденция к достоверности полученных данных. При $p > 0,1$ разницу считали недостоверной.

Результаты

Основываясь на результатах индивидуального учёта скармливаемых кормов и их остатков, количества выделенного кала и мочи, химического состава кормов и выделений была рассчитана переваримость питательных компонентов рациона. (табл. 2.).

Таблица 2. Переваримость питательных веществ рационов опытными овцами, % ($M \pm m$, n=6)

Питательные вещества	Группа		
	I-период	II-период	III-период
Сухое вещество	67,13 $\pm$ 1,10	65,01 $\pm$ 2,73	64,65 $\pm$ 0,55
Органическое вещество	68,25 $\pm$ 1,15	67,04 $\pm$ 2,62	67,70 $\pm$ 0,56
Протеин	68,02 $\pm$ 2,37	68,80 $\pm$ 2,63	69,25 $\pm$ 1,22
Жир	66,90 $\pm$ 2,38	66,45 $\pm$ 1,74	66,08 $\pm$ 1,74
Клетчатка	57,37 $\pm$ 3,06	58,52 $\pm$ 3,16	58,61 $\pm$ 2,40
БЭВ	72,95 $\pm$ 0,86	70,37 $\pm$ 4,02	71,71 $\pm$ 1,01

Исходя из данных таблицы 2, достоверно значимых отличий по переваримости питательных компонентов у животных из разных групп-периодов не обнаружено. Самая большая разница в общем количестве и коэффициентах переваримости наблюдается между первым и третьим периодом, где разница концентрированных кормов увеличилась в 2 раза: с 20% до 40%.

Важные физиологические процессы в организме животного можно рассмотреть как функцию белкового питания (азотистого обмена). Избыток и недостаток протеина ведёт к снижению эффективности использования питательных веществ из рациона, тем самым увеличивая энергетические потери. Баланс азота за период балансового опыта представлен в таблице 3.

Таблица 3. Баланс и переваримость азота ($M \pm m$, n=6)

Показатель	Группа		
	1-период (20% конц.)	2-период (30% конц.)	3-период (40% конц.)
Принято с кормом, г	21,50	24,41	25,54
Выделено с калом, г	5,27 $\pm$ 0,48	6,98 $\pm$ 0,67	7,36 $\pm$ 0,32
Переварено, г	16,23 $\pm$ 0,49	17,43 $\pm$ 0,60	18,18 $\pm$ 0,05
Выделено с мочой, г	6,15 $\pm$ 0,78	5,89 $\pm$ 0,70	8,42 $\pm$ 1,05
Коэффициент переваримости, %			
- от принятого	75,4 $\pm$ 4,55	71,4 $\pm$ 1,05	71,18 $\pm$ 4,21

По данным таблицы 3, в 1 опытной группе прослеживается наименьшее количество азота, поступившего с кормом. Это значение на 2,91 г ниже по сравнению со 2 группой и на 4,04 г - по сравнению с 3 группой. Подобная тенденция относительно других групп прослеживается и в переваривании азота. В 1 периоде показатель переваренного азота был самым низким. При этом коэффициент переваримости в первом периоде был наибольшим по

сравнению с остальными, но во втором и третьем периодах количество переваренного азота всё же увеличивалось с увеличением доли питательности концентратов соответственно.

В нашем исследовании было проанализировано влияние 20%, 30% и 40% концентратов в рационе на микробиом рубцового и кишечного содержимого овец (рис.1-2).

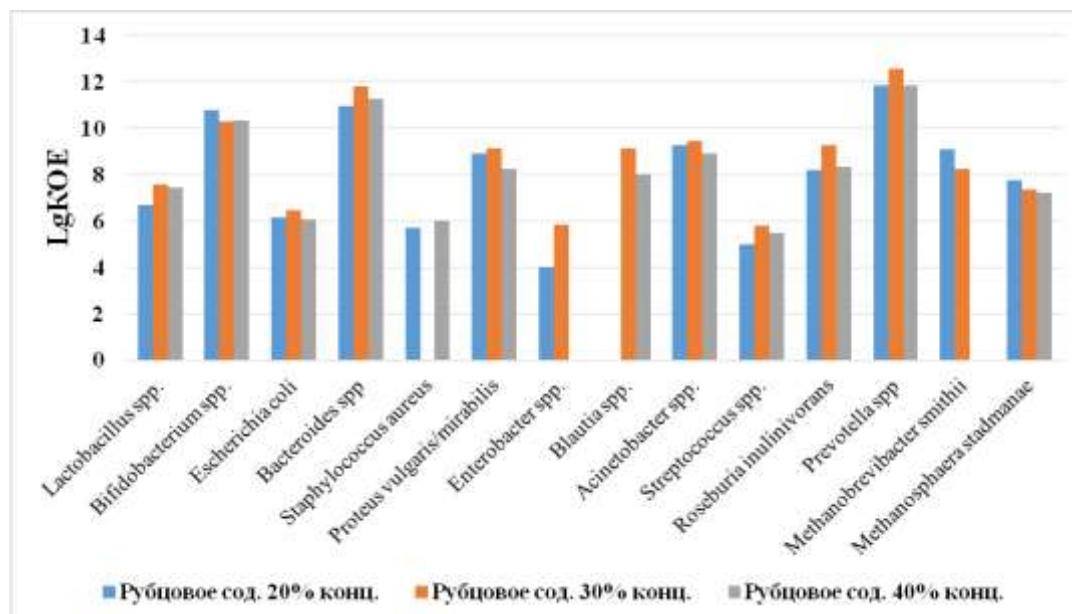


Рис.1. Микробиота рубцового содержимого овец (n=6) при разном уровне концентратов в рационе

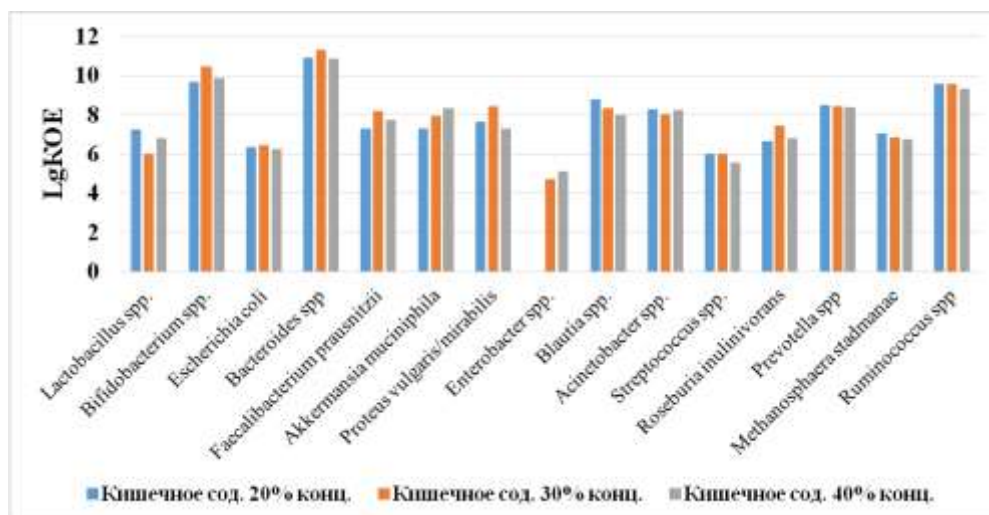


Рис.2. Микробиота кишечного содержимого овец (n=6) при разном уровне концентратов в рационе

При скормливания рационов, содержащих разный процент концентрированных кормов, прослеживается количественное изменение следующих бактерий: *Lactobacillus spp.*, *Bifidobacterium spp.*, *Escherichia coli*, *Bacteroides spp.*, *Staphylococcus aureus*, *Proteus vulgaris/mirabilis*, *Enterobacter spp.*, *Blautia spp.*, *Acinetobacter spp.*, *Streptococcus spp.*, *Roseburia inulinivorans*, *Prevotella spp.*, *Methanobrevibacter smithii*, *Methanosphaera stadmanae*.

В кишечном же содержимом наблюдается увеличение *Bifidobacterium spp.*, *Faecalibacterium prausnitzii*, *Akkermansia muciniphila*, *Enterobacter spp.*, *Roseburia inulinivorans*, *Ruminococcus spp.*, и снижение *Lactobacillus spp.*, *Blautia spp.*, *Acinetobacter spp.*, *Proteus vulgaris/mirabilis*, *Streptococcus spp.*, *Prevotella spp.*, *Methanobrevibacter smithii* и *Methanosphaera stadmanae*.

Образование метана в рубце в главную очередь связано с метаболической активностью метаногенных архей. Они представляют из себя микроорганизмы, которые генерируют метан в качестве побочного продукта их жизнедеятельности. К таким археям относятся *Methanobrevibacter smithii* и *Methanosphaera stadtmanae*. [18, 19].

В ходе исследований было отмечено, что с увеличением уровня концентратов снижается и количество основных метаногенов, таких как *Methanobrevibacter smithii*, *Methanosphaera stadtmanae* в рубце и в кишечнике.

Methanobrevibacter smithii были наиболее зависящими от концентратного типа кормления. С увеличением количества концентратов (40%) их количество заметно снизилось в рубцовом содержимом, в содержимом кишечника снижение же начало происходить уже при 30%.

Более устойчивыми оказались *Methanosphaera stadtmanae*. При повышении количества концентратов их количество оставалось на относительно высоком уровне. На рисунках 3 и 4 представлены количественные изменения *Methanobrevibacter smithii* и *Methanosphaera stadtmanae* при разном уровне ввода концентратов.

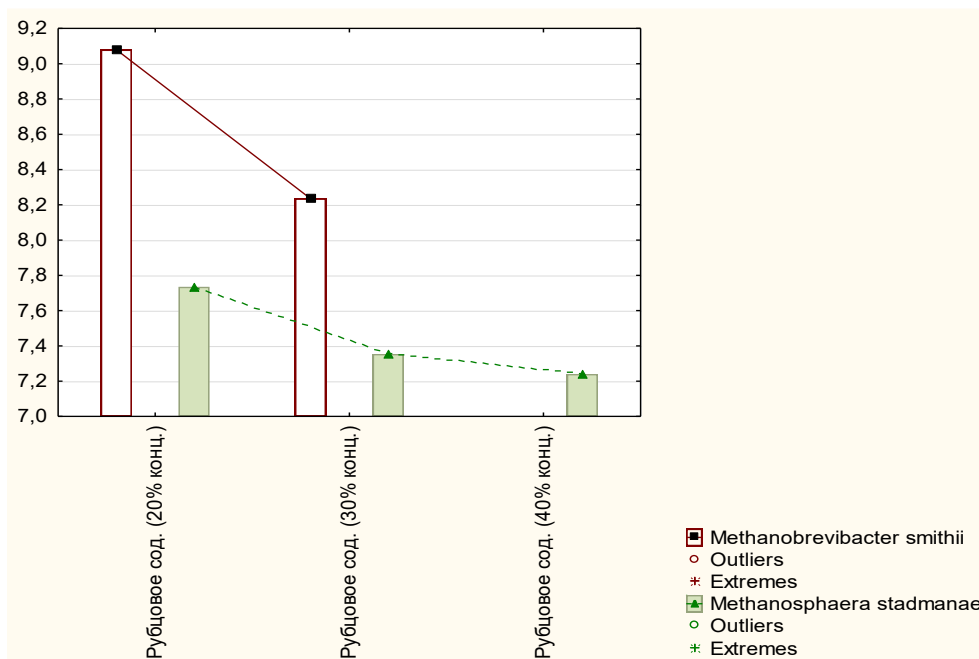


Рис. 3. Количество метаногенов ($\lg_{10}$ КОЕ / мл) в рубцовом содержимом при различных уровнях концентратов в рационе

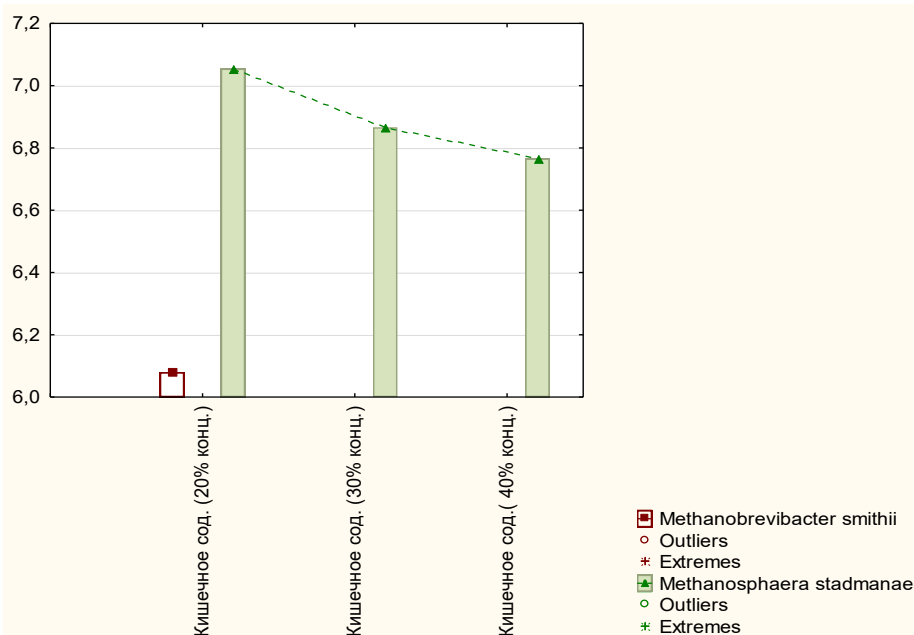


Рис. 4. Количество метаногенов ($\lg_{10}$ КОЕ / мл) в кишечном содержимом при различных уровнях концентратов в рационе

В ходе изучения метаногенеза у овец было выяснено, что при увеличении доли концентратов снижается выделение метана ввиду количественного изменения метаногенов в ЖКТ овец.

При введении 20 %, 30 % и 40 % концентратов выделенный метан (литр / сутки) составил 21,10, 17,88 и 15,88 соответственно (рис. 5).

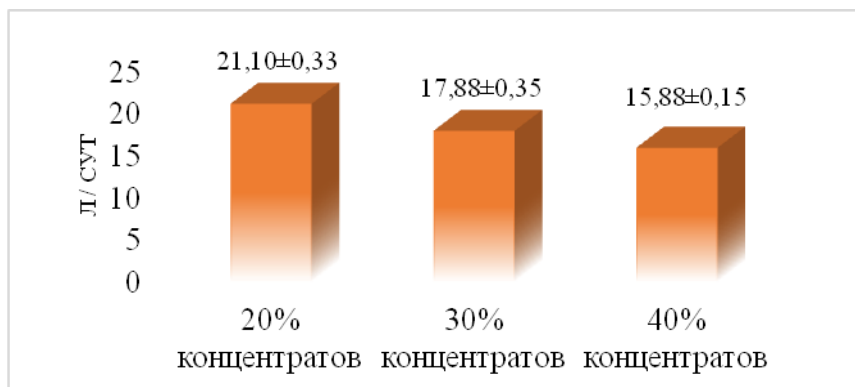


Рис. 5. Выделение парниковых газов из организма овец при различных уровнях концентратов в рационе

При повышении количества концентрированных кормов в 2 раза, выработка метана сократилась в 1,33 раза.

Обсуждение

С ростом доли концентратов в рационе происходят следующие закономерные изменения в микробиальном сообществе рубца: количество лактобактерий (*Lacto-bacillus spp.*), стрептококков (*Streptococcus spp.*) и *Prevotella spp.* увеличивается, в то время как бифидобактерий (*Bifidobacterium spp.*) и метаногенов (*Methanobrevibacter smithii*, *Methanosphaera stadmanae*) уменьшается за счёт увеличения доли поступающих в организм углеводов. Лактобактерии в рубце ферментируют моносахара до молочной кислоты, снижая pH рубца [20], что в свою очередь способствует угнетению активности метаногенных архей. Ввиду того, что *Prevotella*, вероятно, является одним из основных продуцентов пропионата и сукцината, рост её количества приводит к увеличению уровня пропионата, образующегося при высококонцентратном типе кормления [21], что мы и наблюдаем в наших исследованиях.

В результате нашего исследования оказалось, что рационы с высоким содержанием концентратов производят меньше метана, чем с низким содержанием. Однако стоит отметить, что эффективность данной стратегии снижения выделения метана варьируется. В работе Van Lingen H. J. et al. [22] сообщалось о выделении метана крупным рогатым скотом на уровне 20,7 г/кг сухого вещества корма для рационов с высоким содержанием фуража ($\geq 25\%$) по сравнению с выделением метана порядка 15,2 г/кг сухого вещества для низкофуражных ($\leq 18\%$)

рационов. Эксперименты, в которых концентраты скармливались животным при пастбищном содержании, дали противоречивые результаты [23]. В работе Jiao et al [24] было показано снижение выделения метана, однако в более поздних исследованиях сообщается об отсутствии изменений в каких-либо показателях, связанных с эмиссией метана [25, 26].

Необходимы дальнейшие исследования, чтобы выяснить, как способы обработки и состав концентратов влияют на выделение метана, и определить оптимальные для безопасного снижения выбросов метана без потери продуктивности составы рационов.

Заключение

Итогом эксперимента по изучению влияния уровня концентратов на переваримость и количество метаногенов у овец стало положительное воздействие дозировки концентрированных кормов (40%) на снижение образования метаногенов и соответственно на снижение количества выделяемого животными метана.

Ввод в рацион 20 %, 30 %, 40 % концентратов не оказал значимого влияния на процесс пищеварения и переваримость питательных веществ кормов у подопытных животных. Но при этом отмечается наибольшее количество переваренного азота – 18,18 г. при вводе 40 % концентратов.

Количество выделенного метана при вводе 40% концентратов было ниже в 1,33 раза, чем при 20%, что свидетельствует о снижении количества основных метаногенов *Methanobrevibacter smithii*, *Methanosphaera stadmanae* как в рубце, так и в кишечнике.

Литература

- Cardoso-Gutierrez E. et al. Effect of tannins from tropical plants on methane production from ruminants: A systematic review // Veterinary and Animal Science. 2021. Vol. 14. P. 100214.
- Gerber P. J. Technical options for the mitigation of direct methane and nitrous oxide emissions from livestock: a review // Animal. 2013. Vol. 7. No. s2. P. 220-234.

3. Ульбаев Т. С., Коротеев М. П., Артамонова И. В. Роль метана в парниковом эффекте // Природообустройство. 2009. №. 1. С. 44-49.
4. Hook, S.E., Wright, A.-D.G., McBride, B.W. Methanogens: methane producers of the rumen and mitigation strategies / Hook, S.E., Wright, A.-D.G., McBride, B.W. // Archaea. – 2010. – P. 1–11.
5. Samal L., Dash S. K. Nutritional Interventions to Reduce Methane Emissions in Ruminants //Animal Feed Science and Nutrition-Production, Health and Environment. – IntechOpen, 2022.
6. Dong L. F. et al. Effects of diet forage proportion on maintenance energy requirement and the efficiency of metabolizable energy use for lactation by lactating dairy cows // Journal of Dairy Science. – 2015. – Vol. 98. – №. 12. – P. 8846-8855.
7. Dong L., Li B., Diao Q. Effects of dietary forage proportion on feed intake, growth performance, nutrient digestibility, and enteric methane emissions of Holstein heifers at various growth stages // Animals. – 2019. – Vol. 9. – №. 10. – P. 725.
8. Eckard R. J., Clark H. Potential solutions to the major greenhouse-gas issues facing Australasian dairy farming // Animal Production Science. – 2018. – Vol. 60. – №. 1. – P. 10-16.
9. Arndt C. et al. Full adoption of the most effective strategies to mitigate methane emissions by ruminants can help meet the 1.5 C target by 2030 but not 2050 // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2022. – Vol. 119. – №. 20. – P. e2111294119.
10. Henderson G., Cook G. M., Ronimus R. S. Enzyme-and gene-based approaches for developing methanogen-specific compounds to control ruminant methane emissions: a review // Animal Production Science. 2016. Vol. 58. No. 6. – P. 1017-1026.
11. Seshadri R. et al. Cultivation and sequencing of rumen microbiome members from the Hungate1000 Collection // Nature biotechnology. 2018. Vol. 36. No. 4. P. 359-367.
12. Vargas J. Feeding strategies to mitigate enteric methane emission from ruminants in grassland systems //Animals. 2022. Vol. 12. No. 9. P. 1132.
13. Метанообразование в рубце и методы его снижения с использованием алиментарных факторов (обзор) / Н. В. Боголюбова, А. А. Зеленченкова, Н. С. Колесник и др. // Сельскохозяйственная биология. 2022. Т. 57. №. 6. С. 1025.
14. Min B. RDietary mitigation of enteric methane emissions from ruminants: A review of plant tannin mitigation options // Animal Nutrition. – 2020. Vol. 6. – No. 3. P. 231-246.
15. Janssen P. H. Influence of hydrogen on rumen methane formation and fermentation balances through microbial growth kinetics and fermentation thermodynamics //Animal Feed Science and Technology. 2010. Vol. 160. No. 1-2. P. 1-22.
16. Schilde M. Effects of 3-nitrooxypropanol and varying concentrate feed proportions in the ration on methane emission, rumen fermentation and performance of periparturient dairy cows // Archives of Animal Nutrition. – 2021. Vol. 75. No.. 2. P. 79-104.
17. Калашников А. П. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных. Изд. 3-е, М., 2003.
18. Skillman L. C. 16S rDNA directed PCR primers and detection of methanogens in the bovine rumen //Letters in applied microbiology. 2006. Vol. 42. No. 3P. 222-228.
19. Moissl-Eichinger CArchaea are interactive components of complex microbiomes //Trends in microbiology. 2018. Vol. 26. No. 1. P. 70-85.
20. Колоскова Е. М. Исследование микробиома рубца у овец с использованием молекулярно-генетических методов (обзор) // Проблемы биологии продуктивных животных. 2020. №. 4. С. 5-26.
21. Russell J. B., Rychlik J. L. Factors that alter rumen microbial ecology // Science. 2001. Vol. 292. No. 5519. P. 1119-1122.
22. Van Lingen H. J. Prediction of enteric methane production, yield and intensity of beef cattle using an intercontinental database // Agriculture, Ecosystems & Environment. 2019. Vol. 283. P. 106575.
23. Beauchemin K. A. Invited review: Current enteric methane mitigation options // Journal of Dairy Science. – 2022. Vol. 105. No. 12. P. 9297-9326.
24. Jiao H. P. Effect of concentrate feed level on methane emissions from grazing dairy cows // Journal of Dairy Science. 2014. Vol. 97. No. 11. P. 7043-7053.
25. Arndt C. Full adoption of the most effective strategies to mitigate methane emissions by ruminants can help meet the 1.5 C target by 2030 but not 2050 // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2022. Vol. 119. No. 20. P. e2111294119.
26. Vargas J. eFeeding strategies to mitigate enteric methane emission from ruminants in grassland systems // Animals. 2022. Vol. 12. No. 9. P. 1132.

References

1. Cardoso-Gutierrez E. et al. Effect of tannins from tropical plants on methane production from ruminants: A systematic review // Veterinary and Animal Science. – 2021. – Vol. 14. – P. 100214.

2. Gerber P. J. et al. Technical options for the mitigation of direct methane and nitrous oxide emissions from livestock: a review // *Animal*. – 2013. – Vol. 7. – No. s2. – P. 220-234.
3. Ulbaev T. S., Koroteev M. P., Artamonova I. V. Role of methane in the greenhouse effect. – 2009. – No. 1. – P. 44-49 (in Russ).
4. Hook, S.E., Wright, A.-D.G., McBride, B.W. Methanogens: methane producers of the rumen and mitigation strategies / Hook, S.E., Wright, A.-D.G., McBride, B.W. // *Archaea*. – 2010. – 2010. – P. 1–11.
5. Samal L., Dash S. K. Nutritional Interventions to Reduce Methane Emissions in Ruminants // *Animal Feed Science and Nutrition-Production, Health and Environment*. IntechOpen, 2022.
6. Dong L. F. et al. Effects of diet forage proportion on maintenance energy requirement and the efficiency of metabolizable energy use for lactation by lactating dairy cows // *Journal of Dairy Science*. 2015. Vol. 98. No. 12. P. 8846-8855.
7. Dong L., Li B., Diao Q. Effects of dietary forage proportion on feed intake, growth performance, nutrient digestibility, and enteric methane emissions of Holstein heifers at various growth stages // *Animals*. – 2019. Vol. 9. No. 10. – P. 725.
8. Eckard R. J., Clark H. Potential solutions to the major greenhouse-gas issues facing Australasian dairy farming // *Animal Production Science*. 2018. Vol. 60. No. 1. P. 10-16.
9. Arndt C. et al. Full adoption of the most effective strategies to mitigate methane emissions by ruminants can help meet the 1.5 C target by 2030 but not 2050 // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2022. Vol. 119. No. 20. P. e2111294119.
10. Henderson G., Cook G. M., Ronimus R. S. Enzyme-and gene-based approaches for developing methanogen-specific compounds to control ruminant methane emissions: a review // *Animal Production Science*. 2016. Vol. 58. No. 6. P. 1017-1026.
11. Seshadri R. et al. Cultivation and sequencing of rumen microbiome members from the Hungate1000 Collection // *Nature biotechnology*. 2018. Vol. 36. No. 4. P. 359-367.
12. Vargas J. et al. Feeding strategies to mitigate enteric methane emission from ruminants in grassland systems // *Animals*. 2022. Vol. 12. No. 9. P. 1132.
13. Bogolyubova N. V., Zelenchenkova A. A., Kolesnik N. S., Lakhonin P. D. Rumen methane production and its reduction using nutritional factors (review). 2022. Vol. 57. No. 6. P. 1025 (in Russ).
14. Min B. R. Dietary mitigation of enteric methane emissions from ruminants: A review of plant tannin mitigation options // *Animal Nutrition*. – 2020. Vol. 6. No. 3. P. 231-246.
15. Janssen P. H. Influence of hydrogen on rumen methane formation and fermentation balances through microbial growth kinetics and fermentation thermodynamics // *Animal Feed Science and Technology*. 2010. Vol. 160. No. 1-2. P. 1-22.
16. Schilde M. et al. Effects of 3-nitrooxypropanol and varying concentrate feed proportions in the ration on methane emission, rumen fermentation and performance of periparturient dairy cows // *Archives of Animal Nutrition*. – 2021. Vol. 75. No. 2. P. 79-104.
17. Kalashnikov A. PNORMS and rations for feeding farm animals. Ed. 3rd, Moscow. 2003 (in Russ).
18. Skillman L. C. 16S rDNA directed PCR primers and detection of methanogens in the bovine rumen // *Letters in applied microbiology*. 2006. Vol. 42. No. 3. P. 222-228.
19. Moissl-Eichinger C. et al. Archaea are interactive components of complex microbiomes // *Trends in microbiology*. 2018. Vol. 26. No. 1. P. 70-85.
20. Koloskova E. M. et al. Study of the rumen microbiome in sheep using molecular genetic methods (review) // *Problems of biology of productive animals*. – 2020. – No. 4. – P. 5-26.
21. Russell J. B., Rychlik J. L. Factors that alter rumen microbial ecology // *Science*. 2001. Vol. 292. No. 5519. P. 1119-1122.
22. Van Lingen H. J. Prediction of enteric methane production, yield and intensity of beef cattle using an intercontinental database // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2019. Vol. 283. P. 106575.
23. Beauchemin K. A. Invited review: Current enteric methane mitigation options // *Journal of Dairy Science*. – 2022. Vol. 105. No. 12. P. 9297-9326.
24. Jiao H. P. Effect of concentrate feed level on methane emissions from grazing dairy cows // *Journal of Dairy Science*. 2014. Vol. 97. No. 11. P. 7043-7053.
25. Arndt C. Full adoption of the most effective strategies to mitigate methane emissions by ruminants can help meet the 1.5 C target by 2030 but not 2050 // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2022. Vol. 119. No. 20. P. e2111294119.
26. Vargas J. eFeeding strategies to mitigate enteric methane emission from ruminants in grassland systems // *Animals*. 2022. Vol. 12. No. 9. P. 1132.