

УДК 57.044: +636.2

Научная статья



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-392-03-47-61

К.Н. Атландерова

Д.Е. Шошин ✉

К.А. Казаев

Федеральный научный центр
биологических систем
и агротехнологий РАН,
Оренбург, Россия

✉ daniilshoshin@mail.ru

Поступила в редакцию: 13.11.2024

Одобрена после рецензирования: 10.02.2025

Принята к публикации: 24.02.2025

© Атландерова К.Н., Шошин Д.Е.,
Казаев К.А.

Research article



DOI: 10.32634/0869-8155-2025-392-03-47-61

Ksenia N. Atlanderova

Daniil E. Shoshin ✉

Kirill A. Kazaev

Federal Research Centre of Biological
Systems and Agrotechnologies
of the Russian Academy of Sciences,
Orenburg, Russia

✉ daniilshoshin@mail.ru

Received by the editorial office: 13.11.2024

Accepted in revised: 10.02.2025

Accepted for publication: 24.02.2025

© Atlanderova K.N., Shoshin D.E., Kazaev K.A.

Динамика экстракции минералов из кормового субстрата *in vitro* при внесении в реакционную среду рубцового содержимого низкомолекулярных добавок

РЕЗЮМЕ

Запрет на применение антибиотиков в терапевтических целях побуждает к поиску высокоэффективных альтернатив, одной из которых являются фитобиотики. Однако перед масштабным внедрением их в практику необходимо проводить детальную оценку воздействия на различные аспекты жизнедеятельности.

Цель работы — изучение динамики элементного профиля рубца жвачных *in vitro* при внесении в корм ванилина, транскоричного альдегида, дигидроксикверцетина и 7-гидроксикумарина. Исследование проводилось на одноквадрупольном масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой Agilent 7900 ICP-MS (Agilent, США). Анализ таких элементов, как Cr, Fe и Zn, осуществляли в гелиевом режиме с использованием столкновительной ячейки. В ходе работы установлено, что ванилин в концентрациях от $1,225 \times 10^{-4}$ до $4,900 \times 10^{-4}$ моль/л снижает накопление меди, кобальта и свинца, стимулируя извлечение марганца, железа, алюминия и бария. Кверцетин и коричный альдегид, напротив, подавляют экстракцию почти всех исследованных элементов. Кумарин же в большей степени способствует извлечению минералов из целлюлозной матрицы растительных компонентов корма, за исключением меди, кобальта и цинка. При этом лучший эффект обнаруживает комбинация кверцетина и ванилина в концентрациях $2,450 \times 10^{-4}$ и $1,225 \times 10^{-4}$ моль/л соответственно. Все изученные вещества демонстрируют потенциал для коррекции гипо- и гиперэлементозов различной направленности.

Ключевые слова: фитобиотики, жвачные животные, рубец, элементный профиль, кверцетин, кумарин, ванилин, коричный альдегид

Для цитирования: Атландерова К.Н., Шошин Д.Е., Казаев К.А. Динамика экстракции минералов из кормового субстрата *in vitro* при внесении в реакционную среду рубцового содержимого низкомолекулярных добавок. *Аграрная наука*. 2025; 392(03): 47–61. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-392-03-47-61>

Dynamics of extraction of minerals from the feed substrate *in vitro* with including low molecular weight additives into rumen reaction medium

ABSTRACT

The ban on the use of antibiotics for therapeutic purposes encourages the search for highly effective alternatives, one of which is phytobiotics. However, before their large-scale implementation into practice, it is necessary to conduct a detailed assessment of the impact on various aspects of life.

The aim of the work was to study the dynamics of the elemental profile of the ruminant rumen *in vitro* when vanillin, transcoric aldehyde, dihydroxyquercetin and 7-hydroxycoumarin were introduced into feed.

The study was conducted on a single-quadrupole inductively coupled plasma mass spectrometer Agilent 7900 ICP-MS (Agilent, USA). The analysis of elements such as Cr, Fe and Zn was carried out in the helium mode using a collision cell. During the work, it was found that vanillin in concentrations from $1,225 \times 10^{-4}$ to $4,900 \times 10^{-4}$ mol/l reduces the accumulation of copper, cobalt and lead, stimulating the extraction of manganese, iron, aluminum and barium. Quercetin and cinnamic aldehyde, on the contrary, inhibit the extraction of almost all the studied elements. Coumarin, on the other hand, contributes more to the extraction of minerals from the cellulose matrix of plant components of the feed, with the exception of copper, cobalt and zinc. At the same time, the best effect is detected by a combination of quercetin and vanillin at concentrations of $2,450 \times 10^{-4}$ and $1,225 \times 10^{-4}$ mol/l, respectively. All the studied substances demonstrate the potential for the correction of hypo- and hyperelementoses of various types.

Key words: phytobiotics, ruminants, rumen, elemental profile, quercetin, coumarin, vanillin, cinnamon aldehyde

For citation: Atlanderova K.N., Shoshin D.E., Kazaev K.A. Dynamics of extraction of minerals from the feed substrate *in vitro* with including low molecular weight additives into rumen reaction medium. *Agrarian science*. 2025; 392(03): 47–61 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-392-03-47-61>

Введение/Introduction

Масштабная проблема антибиотикорезистентности и вводимые в виду этого запреты на применение бактерицидных препаратов в терапевтических целях или как стимуляторов роста в животноводческом секторе побуждают к активному поиску высокоэффективных альтернатив [1–3]. Среди последних выделяют нано- и ультрадисперсные частицы [4], антимикробные пептиды, органические кислоты, про- и пребиотики [5]. Подобные вещества, как правило, либо селективно подавляют рост и развитие патогенной микрофлоры [6, 7], либо способствуют активному размножению бактерий с нутрициологически полезными свойствами, среди которых целлюлозолитические, амилазные, молочнокислые, *Pseudobutyrvibrio*, *Lachnospira*, *Anaerovibrio* и др. [8, 9].

При этом, однако, всё большее внимание уделяется биологически активным веществам растительного происхождения — фитобиотикам [10]. В частности, из-за того факта, что различные представители царства флоры с древнейших времен используются в этнофармакологии не только как противомикробные, но и как гепатопротекторные, антиоксидантные, антистрессовые, микрофлоромодулирующие и иммуностимулирующие средства [11]. Они же, как правило, выступают и в качестве источника для открытия новых лекарственных препаратов. К примеру, аспирин впервые был получен из салицина, выделенного из коры дерева *Salix alba* L., алкалоид морфин, необходимый для синтеза болеутоляющего средства кодеина, — из опийного мака (*Papaver somniferum*), дигитоксин, кардиотонический гликозид, — из наперстянки (*Digitalis purpurea* L.), хинин, используемый для лечения малярии, лихорадки, несварения желудка, заболеваний полости рта и горла, — из коры *Cinchona succirubra* Pav., пилокарпин (препарат для лечения глаукомы) — из *Pilocarpus jaborandi* (Rutaceae).

Таким образом, фитобиотики сегодня представлены не только в форме экстрактов, перемолотого ботанического сырья, эфирных масел и живиц [12], но и в качестве очищенных молекулярных субстратов, содержащих алкалоиды, аминокислоты, витамины, гликозиды, горечи, танины, жирные масла, камеди, лактоны, фенольные кислоты, пектины, сапонины, смолы, терпены и терпеноиды, фитонциды, флавоноиды, антрахиноны и стероиды [13]. Все это по сути своей — вторичные метаболиты, синтезируемые растениями для защиты от вредоносных бактерий, простейших, насекомых, грибов и даже неблагоприятных погодных условий. Иными словами, это весьма

вариабельные, как по составу, так и по свойствам, вещества, что одновременно открывает фактически неограниченное поле для научных поисков и тем не менее накладывает определенный лимит на масштабное применение фитобиотиков в практике кормления [11], поскольку перед введением в рацион любой из возможных комбинаций необходимо проводить масштабную и комплексную оценку их эффектов *in vitro* и *in vivo* не только на продуктивность [14], но и на различные аспекты метаболического и физиологического статуса животных [15].

Цель работы — выявление динамики элементного профиля рубцовой жидкости крупного рогатого скота при включении в реакционную среду *in vitro* низкомолекулярных добавок на основе кверцетина дигидрата, 7-гидроксикумарина, ванилина и транскоричного альдегида, что позволит судить о степени экстракции минералов из корма в процессе пищеварения как компонентов акцессорных веществ, необходимых для функционирования ферментов, витаминов, гормонов и так далее [16], а также проследить степень инклюзии в биохимические процессы некоторых токсичных или условно токсичных элементов [17].

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Исследование проводилось на базе Центра коллективного пользования ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий РАН» (г. Оренбург)¹.

Манипуляции с животными и экспериментальные исследования с целью сведения к минимуму страданий были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями нормативных актов: модельного закона Межпарламентской ассамблеи государств — участников Содружества Независимых Государств «Об обращении с животными»², ст. 20 (Постановление МА государств — участников СНГ от 31.10.2007 № 29-17); протокола Женевской конвенции International Guiding Principles for Biomedical Research Involving Animals³; ГОСТ 33044-2014 «Принципы надлежащей лабораторной практики»⁴.

Протокол настоящего исследования одобрен Комитетом по биоэтике ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (протокол от 05.03.2021 № 1).

В серии из шести идентичных экспериментов оценивали влияние химически активных низкомолекулярных соединений на пищеварительный процесс в искусственном рубце (ANKOM Daisy II, США). Рубцовую жидкость для опыта отбирали у бычков казахской белоголовой породы

¹ <https://ckp-rf.ru/ckp/77384/>

² Модельный закон «Об обращении с животными»: принят на 29-м пленарном заседании Межпарламентской ассамблеи государств — участников СНГ (Постановление от 31 октября 2007 года № 29-17). Информационный бюллетень Межпарламентской ассамблеи государств — участников СНГ. 2007; 41: 49. <https://docs.cntd.ru/document/902092614?ysclid=m3u7apdzut910624878>

³ International Guiding Principles for Biomedical Research Involving Animals. Geneva, Switzerland: CIOMS. 1985; 28. https://olaw.nih.gov/sites/default/files/Guiding_Principles_2012.pdf

⁴ ГОСТ 33044-2014 Межгосударственный стандарт. Принципы надлежащей лабораторной практики. Введен 01.08.2015. М.: Стандартинформ. 2019; 18. <https://internet-law.ru/gosts/gost/58846/?ysclid=m3u78chci4676789713>

средней массой $266 \pm 1,53$ кг и возрастом 11–12 месяцев через хроническую фистулу ($d = 80$ мм, ANKOM Technology Corporation, США). Транспортировку осуществляли в течение 30 мин., поддерживая температурный режим $+38,5\text{--}39,5$ °C. Перед использованием рубцовую жидкость тщательно встряхивали и процеживали через четыре слоя марли. Заранее мешочки из полиамидной ткани ($n = 10$) взвешивали и нумеровали, в них помещали по 500 мг пшеничных отрубей (базовый субстрат) и запаивали. Рубцовую жидкость, разведенную буфером в соотношении 1:4, насыщали углекислым газом и по 2 л размещали в емкостях искусственного рубца, задавая программу (48 ч. при $+39,5$ °C). При этом в каждом эксперименте в реакционную среду в качестве объектов исследования вносили следующие вещества (или их комбинации):

1) Ванилин (CAS: 121-33-5, 99%; Acros Organics, США) — фенольный альдегид с молекулярной формулой $C_8H_8O_3$, в структуре которого присутствуют гидроксильная и эфирная функциональные группы, прикрепленные к ароматическому кольцу. Молярная масса — $152,15$ г/моль. Это основной компонент экстракта стручков орхидеи *Vanilla planifolia* с выраженными противоопухолевыми, нейропротекторными, антибиотическими и антиканцерогенными характеристиками [18].

2) Кверцетин дигидрат (CAS: 6151-25-3, 95+%; Acros Organics, США) с молекулярной формулой $C_{15}H_{10}O_7 \times 2H_2O$ — входит в группу флавоноидов и представляет собой агликон без углеводной группы, что обуславливает его способность образовывать с сахарами различные гликозиды. Молярная масса — $338,30$ г/моль. Встречается в экстрактах и эфирных маслах многих растений. Обладает антиоксидантной, антибактериальной и противопаразитарной активностью вкупе с вазопротекторными и антииммуносупрессионными свойствами. Демонстрирует способность смягчать действие микотоксинов [19].

3) Транскайичный альдегид, или циннамаль (3-фенил-2-пропеналь в виде трансизомера; CAS: 104-55-2, 99%; Acros Organics, США) — основной компонент эфирного масла *Cinnamomum sp.*, монотерпеновый углеводород C_9H_8O . Благодаря наличию альдегидной группы с сопряжением по двойной связи в концевой цепи проявляет свойства ненасыщенных альдегидов. Молярная масса — $132,16$ г/моль. Применяется в народной медицине как антиоксидантное, противовоспалительное и антибактериальное средство при лечении диабета, заболеваний сердечно-сосудистой, дыхательной и пищеварительной системы, синдромов Паркинсона и Альцгеймера [20].

4) 7-гидроксикумарин (CAS: 93-35-6; Acros Organics, США) — лактон о-оксикайичной кислоты, гетероциклическое соединение из класса бензопириенов состава $C_9H_6O_3$, получаемое из бобов тонка — семян *Dipteryx odorata*. В нативном виде представляет собой бесцветные кристаллы, при

растворении в воде проявляет слабокислые свойства благодаря наличию связанной с конденсированной системой гидроксигруппы. Молярная масса — $162,14$ г/моль. Кумарины и их производные обладают широким спектром биологически активных свойств, в частности антикоагулянтными, бактерицидными, противовоспалительными, антиоксидантными, противовирусными и фермент-ингибирующими [21].

Дозировки опытных веществ (табл. 1) были установлены с помощью теста ингибирования люминесценции и системы Quorum Sensing у бактерий в предшествующих работах [22, 23].

Пробоподготовку осуществляли по следующей методике. Рубцовую жидкость по завершении инкубации с базовым субстратом (пшеничными отрубями) и исследуемыми веществами тщательно перемешивали, брали точный объем (0,5 мл), взвешивали с точностью до 0,0001 г во фторопластовую виалу, выдерживающей высокое давление и температуру. Добавляли 4 мл концентрированной азотной кислоты (ОСЧ). Виалу герметично закрывали и помещали в микроволновую систему пробоподготовки TOPEX+ (PreeKem, Китай). Здесь пробы подвергались термоокислительной деструкции под воздействием сверхвысокочастотного излучения, что приводило к разрушению неорганической и органической матриц, препятствующих проведению элементного анализа. Получившийся раствор переливали в мерную пробирку на 10 мл, смывали остатки со стенок виалы и доводили объем высокочистой водой. Из полученного раствора отбирали 1 мл, снова разбавляли в 10 раз высокочистой водой. Таким образом получали готовую пробу, идущую на анализ.

Стандартные растворы готовили из мультиэлементной смеси (Merck, Германия) с добавлением вручную приготовленного стандарта

Таблица 1. Концентрации используемых в экспериментах низкомолекулярных соединений
Table 1. Concentrations of low molecular weight compounds used in experiments

№ опыта	Активные вещества	Концентрации, моль/л
1	Ванилин	a) $1,225 \times 10^{-4}$ b) $2,450 \times 10^{-4}$ c) $4,900 \times 10^{-4}$
2	Кверцетин	a) $2,450 \times 10^{-4}$ b) $4,900 \times 10^{-4}$ c) $9,800 \times 10^{-4}$
3	Коричный альдегид	a) $1,525 \times 10^{-5}$ b) $3,050 \times 10^{-5}$ c) $6,100 \times 10^{-5}$
4	Кумарин	a) $1,225 \times 10^{-4}$ b) $2,450 \times 10^{-4}$ c) $4,900 \times 10^{-4}$
5	Коричный альдегид + кверцетин	$1,525 \times 10^{-5} + 2,450 \times 10^{-4}$
	Коричный альдегид + кумарин	$1,525 \times 10^{-5} + 1,225 \times 10^{-4}$
	Коричный альдегид + ванилин	$1,525 \times 10^{-5} + 1,225 \times 10^{-4}$
	Кверцетин + кумарин	$2,450 \times 10^{-4} + 1,225 \times 10^{-4}$
6	Кверцетин + ванилин	$2,450 \times 10^{-4} + 1,225 \times 10^{-4}$
	Коричный альдегид + кумарин + ванилин + кверцетин	$1,525 \times 10^{-5} + 1,225 \times 10^{-4} + 1,225 \times 10^{-4} + 2,450 \times 10^{-4}$

макроэлементов (K, Na, Mg, Ca). Разводили стандартные растворы 2,6%-ным раствором азотной кислоты (ОСЧ).

Элементный анализ проводили на одноква- друпольном масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой Agilent 7900 ICP-MS (Agilent, США). Анализ таких элементов, как Cr, Fe и Zn, осуществляли в гелиевом режиме с использова- нием столкновительной ячейки. Метод основан на разрушении пробы в условиях высокотемпера- турной аргоновой плазмы (в кварцевой горелке, генератор плазмы — радиочастотный излучатель на 27 МГц) и детектировании отдельных изотопов в виде отношения их массы к заряду. Концентра- цию искомых элементов выражали в мг элемента на 1 кг пробы с учетом суммы инструментальной ($\pm 5\%$) и методической ($\pm 3\%$) ошибок.

Статистическую обработку полученных дан- ных проводили с использованием Statistica 10.0 (StatSoft Inc., США) и программного обеспечения Microsoft Office. Достоверность различий сравни- ваемых показателей определяли по t-критерию Стьюдента. Достоверными считали значения при $p \leq 0,05$, $p \leq 0,01$, $p \leq 0,001$.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Рубцовый микробиом жвачных животных, как известно, представляет собой сложнейшую вы- сокодифференцированную и внутреннесвязан- ную экосистему из бактерий, простейших и гриб- ков, каждый представитель которой вносит тот или иной вклад в общую динамику метаболиче- ских и биохимических процессов, участвует в де- струкции и трансформации высокомолекулярных соединений в низкомолекулярные, опосредует целлюлозолитический, амилолитический, протео- литический и липолитический потенциал. Соот- ветственно этому, то есть степени расщепления органической матрицы, меняется и динамика экс- тракции минералов из корма, однако здесь следует учесть и другие параметры, такие как потребность отдельных видов прокариот и простейших в опре- деленных эссенциальных элементах, а также ан- тагонистические и синергетические взаимоотношения между послед- ними. Так, в первом опыте использо- вание ванилина в концентрации $1,225 \times 10^{-4}$ моль/л вело к сниже- нию уровня Cu на 52% ($p \leq 0,01$), Mg на 30% ($p \leq 0,01$), Co на 36% ($p \leq 0,05$), K на 21% ($p \leq 0,01$) относи- тельно контроля (табл. 2).

При этом концентрации Fe, Ni, Mn, Ba и Al выросли на 58% ($p \leq 0,01$), 72% ($p \leq 0,01$), 22% ($p \leq 0,01$), 22% ($p \leq 0,05$) и 132% ($p \leq 0,001$) соответ- ственно (рис. 1).

Такая динамика может быть обу- словлена несколькими причинами. Во-первых, ранее было показано,

Таблица 2. Содержание элементов в рубцовой жидкости (контрольные значения)
Table 2. The content of elements in the rumen fluid (control values)

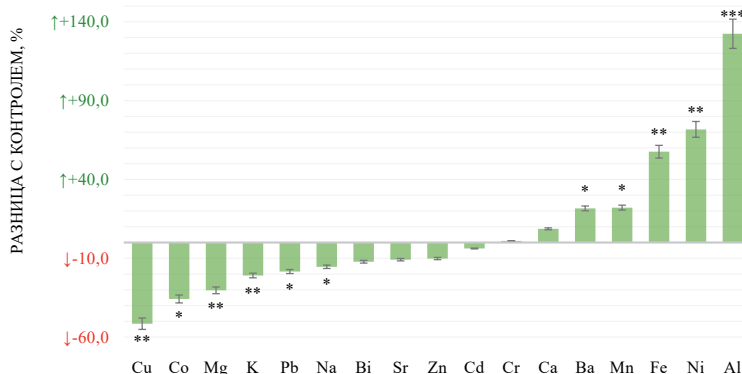
Элемент	Концентрация, мг/кг	Элемент	Концентрация, мг/кг
Na	2239,703 \pm 134,382	Sr	0,348 \pm 0,02
Mg	62,38 \pm 3,306	Cd	0,079 \pm 0,005
Al	7,49 \pm 0,434	Ba	0,189 \pm 0,01
K	1153,157 \pm 68,036	Pb	0,168 \pm 0,011
Ca	81,908 \pm 4,751	Bi	0,035 \pm 0,002
Mn	0,319 \pm 0,02	Cr	0,075 \pm 0,009
Co	0,011 \pm 0,001	Fe	4,317 \pm 0,233
Ni	0,09 \pm 0,006	Zn	0,726 \pm 0,155
Cu	1,408 \pm 0,075		

Примечание: далее по статье указана процентная разница опытных групп с представленными значениями.

что ванилин ингибирует рост популяции простей- ших, при этом, однако, стимулируя размноже- ние *Ruminococcus flavefaciens*, *Prevotella bryantii*, *Butyrivibrio fibrisolvens*, *Prevotella ruminicola*, *Clostridium aminophilum* и *Ruminobacter amy- lophilus*. Они же в свою очередь активно разла- гают клетчатку [24], сбраживают сахара [25, 26] и расщепляют пептиды [27], вследствие чего из кормового субстрата высвобождается спектр макро- и микроэлементов (в частности, железо и алюминий выходят из гемицеллюлозных и пек- тиновых комплексов) [28]. Во-вторых, возмож- но образование нерастворимых агрегатов с ан- тагонистами внутри растительных волокон. Так, например, известно, что сера и молибден фор- мируют с медью прочный тиомолибдатный оса- док [29]. Более того, соединения алюминия влия- ют на растворимость в рубце цинка и других бивалентных катионов [30]. Соответственно, по- добное распределение не следует считать опти- мально выгодным, так как недостаток Cu, Mg, Co и K может негативно сказаться на функциональ- ном состоянии микробиоты рубца и организ- ма-хозяина. В частности, медь входит в состав (или является кофактором) таких ферментов, как

Рис. 1. Влияние ванилина в концентрации $1,225 \times 10^{-4}$ моль/л на элементный профиль рубцовой жидкости

Fig. 1. The effect of vanillin at a concentration of 1.225×10^{-4} mol/l on the elemental profile of the rumen fluid



цитохром-с-оксидаза, тирозиназа, аминоксидаза, супероксиддисмутаза Cu/Zn, и некоторых других, она участвует в производстве энергии и процессах биосинтеза, выполняет роль динамической сигнальной молекулы, ингибирует липолиз, регулирует работу калиевых каналов и активность Е3-убиквитинлигазы [31].

Магний, как второй после калия внутриклеточный катион в составе ферментативных субстратов, например АТФ-Mg и ГТФ-Mg, или через прямую активацию опосредует функционирование ДНК- и РНК-полимераз, эндо- и экзонуклеаз, топоизомеразы, хеликазы, лигазы, протеинкиназы, аденилат- и гуанилатциклаз, Na/K- и Ca^{2+} -АТФаз, креатинкиназы, гексокиназы, фосфофруктокиназы, альдолазы, фосфоглицераткиназы и пируваткиназы. Иными словами, он участвует в процессах репликации и репарации, транскрипции и трансляции, выступает ключевым фактором поддержания геномной и генетической стабильности, опосредует некоторые реакции гликолиза, влияя тем самым на доступность глюкозы в клетке. Магний же фигурирует в процессах клеточной адгезии, трансмембранном переносе электронов, как антагонист кальция — в сокращении и расслаблении мышц, высвобождении нейромедиаторов, выполняет структурную функцию в белках, полирибосомах, нуклеиновых кислотах и митохондриях [32].

Калий наряду с натрием регулирует водный и кислотно-щелочной баланс в организме, играет важную роль в передаче электрических импульсов в сердце, поддерживая мембранный потенциал, определяет функционал возбудимых тканей — нервной и мышечной [33].

Кобальт входит в состав коррина — модифицированного тетрапирольного кольца витамина B_{12} , природные формы которого — 1,5-дезоксиаденосилкобаламин, гидроксикобаламин, метилкобаламин и аденозилкобаламин — синтезируются бактериями и археями из родов *Bacillus*, *Escherichia*, *Fervidobacterium*, *Kosmotoga*, *Lactobacillus*, *Mesotoga*, *Nitrosopumilus*, *Petrotoga*, *Propionibacterium*, *Proteobacteria*, *Pseudomonas*, *Rhodobacter*, *Rhizobium*, *Salmonella*, *Sinorhizobium*, *Thermosiphon* и *Thermotoga*. При этом кобаламин необходим им для липидного и углеводного обмена, синтеза ДНК, а также для функционирования диолдегидратазы, этаноламинаммон-лиазы, глутамат- и метилмалонил-KoA-мутаза, метионинсинтазы и рибонуклеотидредуктазы, катализирующих ряд реакций трансметилирования и

перегруппировки. Однако только 3–13% кобальта рациона включаются в метаболизм жвачных бактериями рубца [34]. Соответственно, снижение доли экстракции перечисленных элементов может негативно сказаться на общезиологическом состоянии и продуктивности животных. Более того, значительное увеличение концентрации алюминия и бария в рубцовой жидкости потенциально может подавлять рост микрофлоры, упрощая метаболическую цепочку и снижая переваримость кормовых ингредиентов [35].

Аналогично применение ванилина в дозировке $2,450 \times 10^{-4}$ моль/л сопровождалось еще большим снижением уровня Cu — на 67% ($p \leq 0,01$), увеличением концентрации Ca на 37% ($p \leq 0,01$), Sr — на 26% ($p \leq 0,05$), Ba — на 14% ($p \leq 0,05$). Наблюдалась выраженная тенденция по увеличению уровня цинка (+ 23%). Сохранялась динамика в отношении Co, Mn, Fe и Al (рис. 2).

Внесение ванилина в реактор в количестве $4,900 \times 10^{-4}$ моль/л дополнительно вело к снижению концентрации Pb — на 38% ($p \leq 0,001$), Zn — на 35% ($p \leq 0,01$), Bi — на 18% ($p \leq 0,05$). Резко увеличивались: Cr — на 61% ($p \leq 0,05$), Mn — на 110% ($p \leq 0,001$) (рис. 3).

Рис. 2. Влияние ванилина в концентрации $2,450 \times 10^{-4}$ моль/л на элементный профиль рубцовой жидкости

Fig. 2. The effect of vanillin at a concentration of 2.450×10^{-4} mol/l on the elemental profile of the rumen fluid

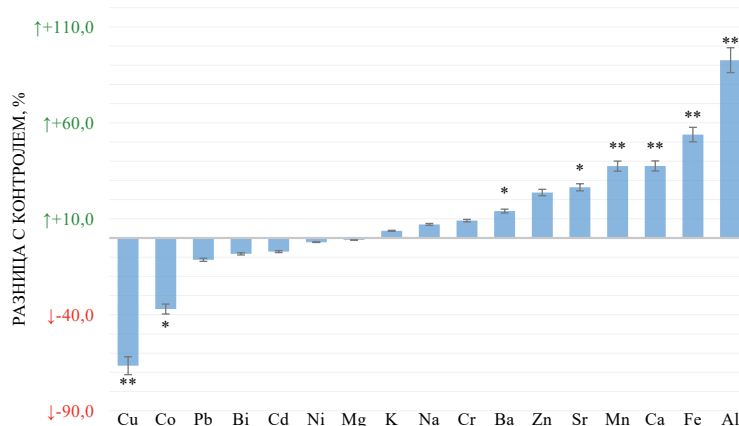
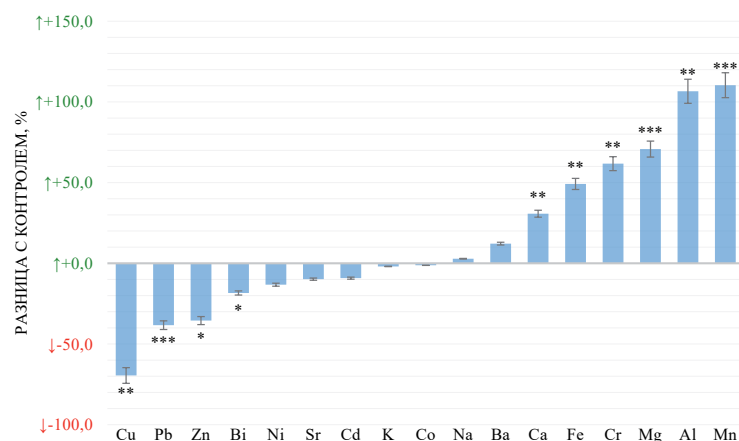


Рис. 3. Влияние ванилина в концентрации $4,900 \times 10^{-4}$ моль/л на элементный профиль рубцовой жидкости

Fig. 3. The effect of vanillin at a concentration of 4.900×10^{-4} mol/l on the elemental profile of the rumen fluid



И хотя нивелирование доли свинца и висмута как токсичных элементов, индуцирующих окислительный стресс путем повышения продукции активных форм кислорода (АФК) в митохондриальной цепи переноса электронов, выступает как положительный аспект [36, 37], всё еще сохраняются негативные тенденции по отношению к меди. При этой же дозировке, в отличие от предыдущих, достоверно снижается экстракция цинка, а он, как известно, необходим для формирования вторичной структуры почти 10% белков, закодированных в геноме млекопитающих (некоторые факторы транскрипции, внутриклеточные рецепторы гормонов, металлотионеины и многие энзимы). В составе ферментов (или как их кофактор) цинк участвует в метаболизме белков, углеводов, липидов и нуклеиновых кислот (карбоангидразы, щелочной фосфатазы, ферментов цикла мочевины), клеточной сигнализации, экспрессии генов (белка p53 и других белков репарации ДНК), мембранном транспорте, модуляции окислительно-восстановительного потенциала (Cu/Zn-супероксиддисмутазы, каталазы и пероксидазы) и клеточном дыхании [38].

Важно отметить, что введение в реакцию среду ванилина во всех концентрациях или дозозависимо способствовало улучшению экстракции Mn, Fe, Ca и Cr, что может быть полезным при коррекции соответствующих гипозэлементозов.

Марганец участвует в синтезе и активации многих оксидоредуктаз, трансфераз, гидролаз, лиаз, изомераз и лигаз, метаболизме глюкозы и липидов, катализе синтеза белков, витаминов C и группы B, кроветворении, регуляции эндокринной системы и иммунной функции. Кроме того, металлоферменты Mn, включая аргиназу, глутаминсинтетазу, фосфоенолпируватдекарбоксилазу и Mn-супероксиддисмутазу, также участвуя в перечисленных выше процессах, снижают окислительный стресс против свободных радикалов [39]. Марганец особо необходим для нормального роста и развития бактерий из родов *Lactiplantibacillus* и *Lacticaeibacillus* [40], способствующих лучшему усвоению сухого вещества корма в рубце жвачных животных [41]. Присутствие марганца положительно сказывается на бактериальной популяции, участвующей в переваривании клетчатки [29, 42]. Дефицит марганца в рационе ведет к возникновению костных и неврологических дефектов, нарушению фертильности и сахарному диабету [43].

Железо, недостаток которого сопровождается возникновением анемии [44], в организме млекопитающих большей частью представлено в виде гемопroteинов (гемоглобина или миоглобина, гемовых ферментов) или негемовых соединений (флавино-железных ферментов, трансферных ферментов, ферритина). Организм нуждается в железе для синтеза транспортных белков и гема, а также железосодержащих ферментов, участвующих в переносе электронов и окислительно-восстановительных процессах. Важнейшие ферменты в

метаболизме ДНК, включая различные геликазы, нуклеазы, гликозилазы, деметилазы и рибонуклеотидредуктазу, используют железо в качестве незаменимого кофактора для функционирования. Недавние результаты показали, что каталитическая субъединица ДНК-полимераз содержит консервативные цистеин-богатые мотивы, которые связывают кластеры «железо — сера» (Fe/S), необходимые для образования стабильных и активных комплексов [45].

Кальций не только является самым распространенным минералом в организме животных, слагая основу костной ткани [46], но и участвует во многих физиологических процессах: свертывании крови, сокращении мышц, передаче межклеточных сигналов, возбудимости и проницаемости цитоплазматических мембран, экзокринной секреции, нейротрансмиссии, стабилизации и активации ферментов [47]. Ионизированный кальций участвует в активации протеинкиназ, фосфорилировании ферментов и как посредник клеточного ответа на такие гормоны, как адреналин, глюкагон, вазопрессин, секретин и холецистокинин [48]. На уровне бактериома наряду с другими двухвалентными катионами Ca^{2+} явно играет структурную роль в формировании клеточной стенки, регуляции синтеза липидов и процессе репликации ДНК.

Хром участвует в регуляции углеводного и липидного обмена, способствует превращению избыточного количества сахаров в жиры, стимулирует синтез жирных кислот и холестерина из ацетата в печени, входит в состав низкомолекулярного органического комплекса — фактора толерантности к глюкозе, вместе с инсулином действует как регулятор уровня сахара в крови, способствует структурной целостности молекул нуклеиновых кислот, регулирует работу сердечной мышцы и функционирование кровеносных сосудов, способствует выведению из организма токсинов, солей тяжелых металлов, радионуклидов. Дефицит хрома сопряжен с непереносимостью глюкозы и инсулинорезистентностью [49].

Интересно, что при минимальных концентрациях ванилина возрастала экстракция никеля, однако этот эффект был тем меньше, чем выше были дозировки. Хотя никель и не выполняет определенных функций в организме млекопитающих, он необходим многим бактериям, археям и простейшим эукариотам как кофактор ряда ферментов — [NiFe]-гидрогеназы, [NiFe]-дегидрогеназы окиси углерода, ацетил-КоА-декарбонилазы/синтазы, метил-КоМ-редуктазы, уреазы, Ni-супероксиддисмутазы, лактатрацемазы, глиоксилазы I и ациредуктондиоксигеназы, катализирующих, соответственно, окисление молекулярного водорода до протонов и электронов, окисление CO в CO_2 , синтез ацетил-КоА, восстановление метил-S-коэнзима M ($CH_3-S-CoM$) с образованием метана, гидролиз мочевины с образованием аммиака и карбамата (саморазлагается на аммиак и

угольную кислоту), дисмутацию супероксидных анионов в перекись водорода и кислород, взаимопревращение между изомерами L- и D-молочной кислоты, преобразование гемитиоацетата в S-D-лактоилглутатион, переход ациредуктона в формиат, монооксид углерода и метилтиобутировую кислоту [50].

Таким образом, в ходе первого опыта было показано, что ванилин наиболее способствует экстракции из кормового субстрата марганца, железа, кальция и алюминия, напротив, подавляя извлечение меди, кобальта и свинца. Во втором эксперименте использование кверцетина в концентрации $2,450 \times 10^{-4}$ моль/л вело к снижению содержания большинства анализируемых элементов (рис. 4), максимальному в отношении Zn (-60%, $p \leq 0,01$). Уровень токсичного для микробиоты Pb упал на 51% ($p \leq 0,01$). Содержание Al и Bi в пробах достоверно увеличилось на 34% ($p \leq 0,01$) и 95% ($p \leq 0,01$) соответственно.

Распределение элементов в рубцовой жидкости при дозировке кверцетина $4,900 \times 10^{-4}$ моль/л выглядит более выгодным для процесса пищеварения (рис. 5): уменьшаются относительно первого случая потери макро- и микроэлементов. В то же время концентрация Fe повышается на 19% ($p \leq 0,05$), что может способствовать размножению некоторых видов бактерий, в том числе бутиратпродуцирующих *Selenomonas ruminantium* [51].

Эффектов от дальнейшего увеличения концентрации кверцетина ($9,800 \times 10^{-4}$ моль/л) не выявлено — элементные сдвиги аналогичны таковым при минимальной дозе (рис. 6).

Подобная динамика может быть обусловлена более выраженным в сравнении с ожидаемым бактерицидным эффектом кверцетина, что проявляется в повреждении клеточной мембраны или нарушении ее проницаемости, угнетении синтеза нуклеиновых кислот (ингибировании ДНК-гиразы прокариот) и белков, митохондриальной дисфункции

Рис. 4. Влияние кверцетина в концентрации $2,450 \times 10^{-4}$ моль/л на элементный профиль рубцовой жидкости

Fig. 4. The effect of quercetin at a concentration of 2.450×10^{-4} mol/l on the elemental profile of the rumen fluid

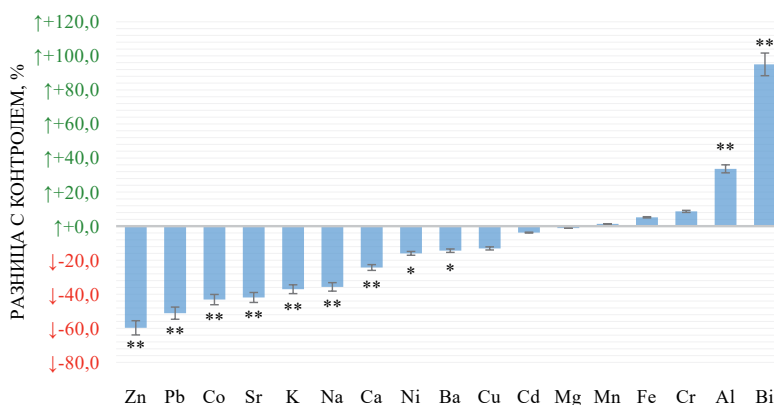


Рис. 5. Влияние кверцетина в концентрации $4,900 \times 10^{-4}$ моль/л на элементный профиль рубцовой жидкости

Fig. 5. The effect of quercetin at a concentration of 4.900×10^{-4} mol/l on the elemental profile of the rumen fluid

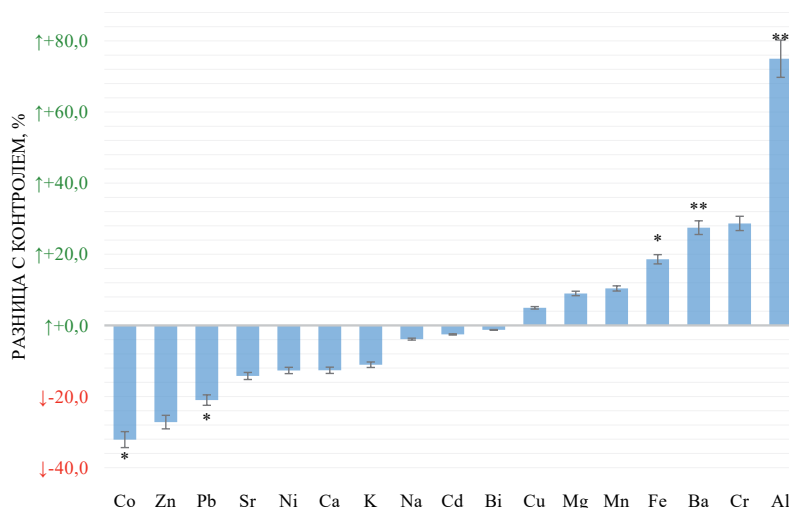
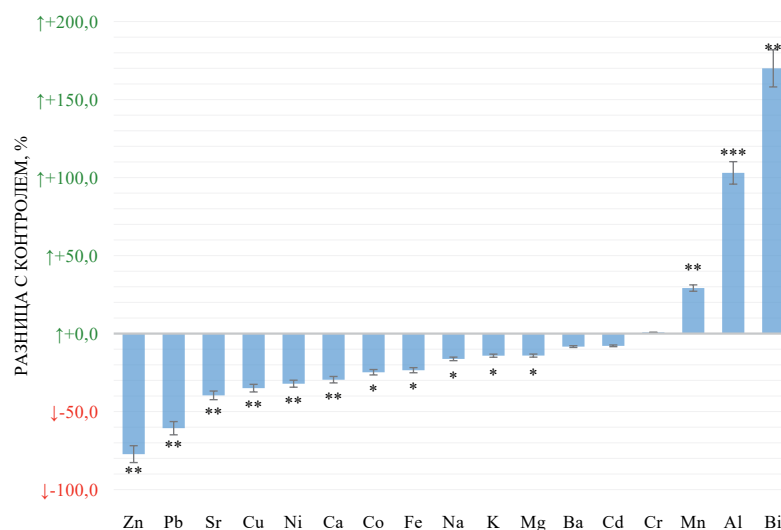


Рис. 6. Влияние кверцетина в концентрации $9,800 \times 10^{-4}$ моль/л на элементный профиль рубцовой жидкости

Fig. 6. The effect of quercetin at a concentration of 9.800×10^{-4} mol/l on the elemental profile of the rumen fluid



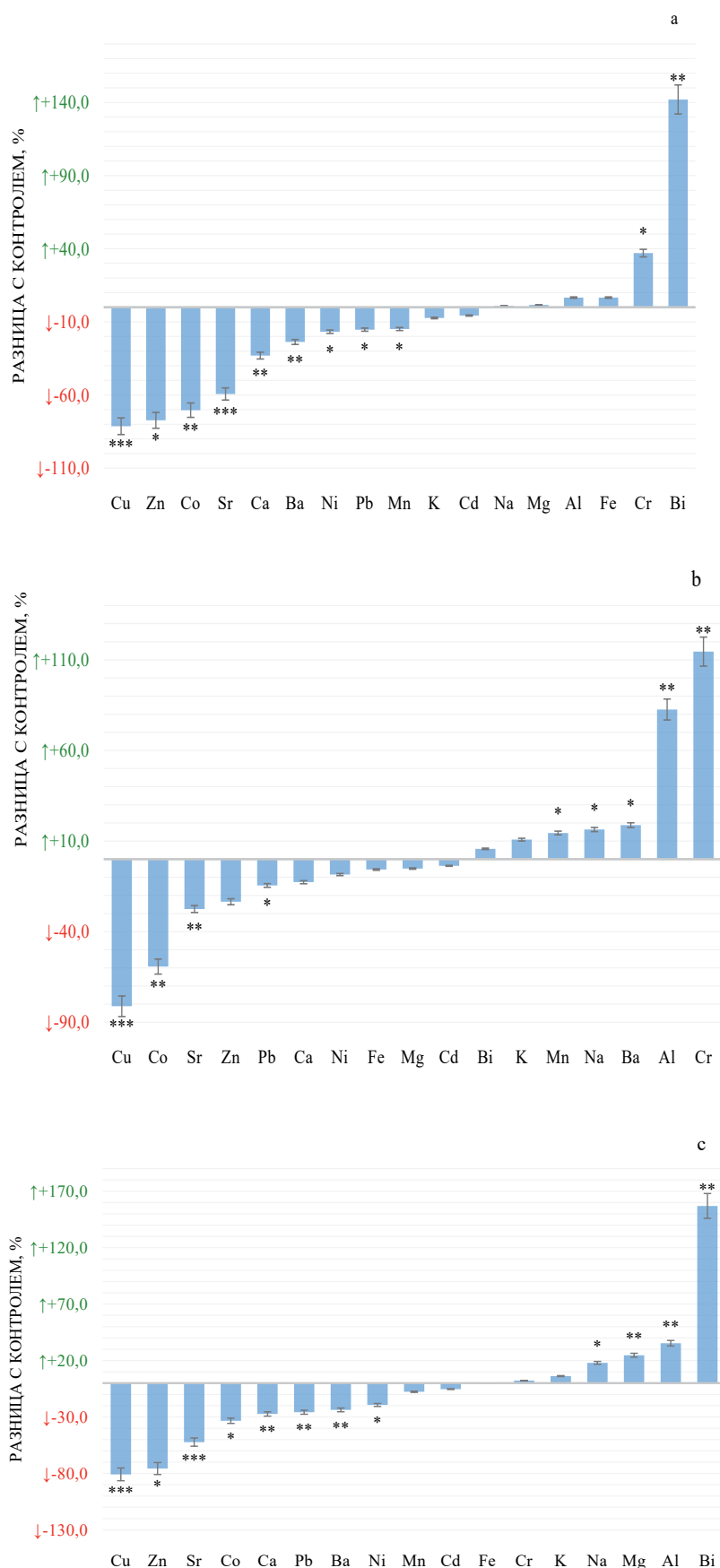
или в предотвращении образования биопленки [52]. Последнее может возникнуть в случае различных изменений химической структуры молекулы в реакционной среде рубцового содержимого [53] либо же при быстром разложении кверцетина микробиотой на 3,4-дигидроксифенилуксусную кислоту и 4-метилкатехол [54, 55].

Похожие данные были получены и в третьем эксперименте (коричный альдегид). Только концентрация $3,050 \times 10^{-5}$ моль/л (рис. 7b) способствовала повышению уровней экстракции Mn, Na и Cr на 14% ($p \leq 0,05$), 16% ($p \leq 0,05$) и 115% ($p \leq 0,01$) соответственно. Во всех трех дозировках коричневого альдегида наблюдалось одинаковое, достоверное и существенное снижение содержания Cu (81%, $p \leq 0,001$). Коричный альдегид (подобно кверцетину) повреждает поверхностные структуры клеток прокариот и ингибирует кворум-сенсинг, но, кроме того, изменяет липидный профиль, подавляет активность АТФазы, деление клеток и мембранные порины [56]. Помимо прочего, как было показано с помощью количественного протеомного анализа на примере грибка *P. expansum*, коричный альдегид подавлял большую часть из 146 выявленных дифференциально экспрессируемых белков, участвующих в метаболизме углеводов, а также активность 6 ключевых регуляторных ферментов гидролиза целлюлозы, цикла Кребса, гликолиза и пентозофосфатного пути, что может существенно сказаться на высвобождении минеральных элементов из целлюлозной матрицы растительных клеток [57].

Транскоричный альдегид ингибировал карбоксилтрансферазный компонент ацетил-КоА карбоксилазы *Escherichia coli*, но не влиял на активность компонента биотинкарбоксилазы. Паттерны ингибирования указывали на то, что эти продукты связываются с сайтом связывания биотина карбоксилтрансферазы с транскоричным альдегидом. Отметим,

Рис. 7. Влияние коричневого альдегида в различных концентрациях на элементный профиль рубцовой жидкости: а — $1,525 \times 10^{-5}$ моль/л; б — $3,050 \times 10^{-5}$ моль/л; в — $6,100 \times 10^{-5}$ моль/л

Fig. 7. The effect of cinnamonaldehyde in various concentrations on the elemental profile of the rumen fluid: a — 1.525×10^{-5} mol/l; b — 3.050×10^{-5} mol/l; c — 6.100×10^{-5} mol/l



что здесь во всех дозировках снижалась степень экстракции эссенциальных Co, Cu и Zn, а также токсичных Pb и Sr.

В четвертом эксперименте (кумарин) наиболее выгодным для микробиоты рубца следует считать элементный профиль при концентрации действующего вещества в $2,450 \times 10^{-4}$ моль/л (рис. 8b).

В этом случае повышение уровня Mg на 14% ($p \leq 0,05$) дает дополнительный базис питания для многих простейших и грибов рубцовой жидкости, в частности для *Anaeromyces mucronatus*, *Neocallimastix spp.*, *Piromyces spp.*, *Orpinomyces spp.* и *Caecomyces spp.*, которые участвуют в процессах расщепления целлюлозы. При этом, однако, была значительно выражена тенденция по накоплению в рубцовой жидкости висмута, что при условии метаболизации микробиотой в летучие соединения может нанести определенный вред экосистеме рубца из-за повышенной токсической нагрузки [58]. Кумарин подвергается постепенной деградации, как и вышеописанные соединения [59].

В пятом эксперименте формирование различных комбинаций малых молекул вело к ожидаемо дифференцируемым результатам (рис. 9). Так комплексы коричневого альдегида с кверцетином и кумарином способствовали максимальному нивелированию степени экскреции минералов из базового субстрата относительно контроля. Напротив, сочетание кверцетина с ванилином или кумарином стимулировало этот процесс. Такой эффект можно объяснить исходя из взаимодополняющих свойств фитобиотиков, однако для полной уверенности в возможности синергетических функций необходим детальный анализ биохимических превращений исследуемых веществ в рубце жвачных.

Наконец, в шестом эксперименте (рис. 10) при комбинации четырех веществ наблюдалось достоверное увеличение концентрации многих макро- и микроэлементов — K (+113%, $p \leq 0,01$),

Рис. 8. Влияние кумарина в различных концентрациях на элементный профиль рубцовой жидкости: а — $1,225 \times 10^{-4}$ моль/л; б — $2,450 \times 10^{-4}$; в — $4,900 \times 10^{-4}$

Fig. 8. The effect of coumarin in various concentrations on the elemental profile of the rumen fluid: a — 1.225×10^{-4} mol/l; b — 2.450×10^{-4} ; c — 4.900×10^{-4}

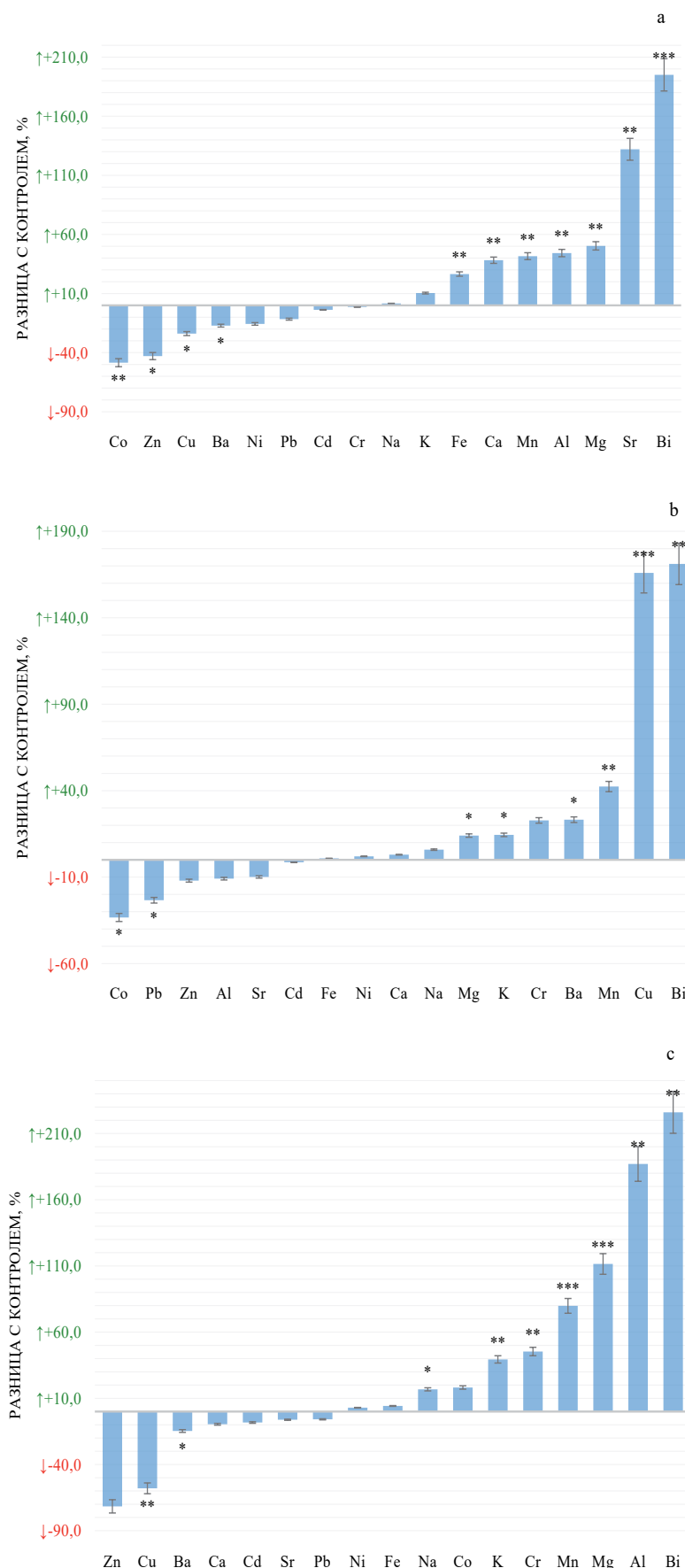


Рис. 9. Влияние комбинаций изучаемых веществ на элементный профиль рубцовой жидкости: а — коричный альдегид + кверцетин ($1,525 \times 10^{-5} + 2,450 \times 10^{-4}$ моль/л); б — коричный альдегид + кумарин ($1,525 \times 10^{-5} + 1,225 \times 10^{-4}$ моль/л); в — коричный альдегид + ванилин ($1,525 \times 10^{-5} + 1,225 \times 10^{-4}$ моль/л), г — кверцетин + кумарин ($2,450 \times 10^{-4} + 1,225 \times 10^{-4}$ моль/л), д — кверцетин + ванилин ($2,450 \times 10^{-4} + 1,225 \times 10^{-4}$ моль/л)

Fig. 9. The effect of combinations of the studied substances on the elemental profile of the rumen fluid: a — cinnamon aldehyde + quercetin ($1.525 \times 10^{-5} + 2.450 \times 10^{-4}$ mol/l); b — cinnamon aldehyde + coumarin ($1.525 \times 10^{-5} + 1.225 \times 10^{-4}$ mol/l); c — cinnamon aldehyde + vanillin ($1.525 \times 10^{-5} + 1.225 \times 10^{-4}$ mol/l), d — quercetin + coumarin ($2.450 \times 10^{-4} + 1.225 \times 10^{-4}$ mol/L), e — quercetin + vanillin ($2.450 \times 10^{-4} + 1.225 \times 10^{-4}$ mol/L)

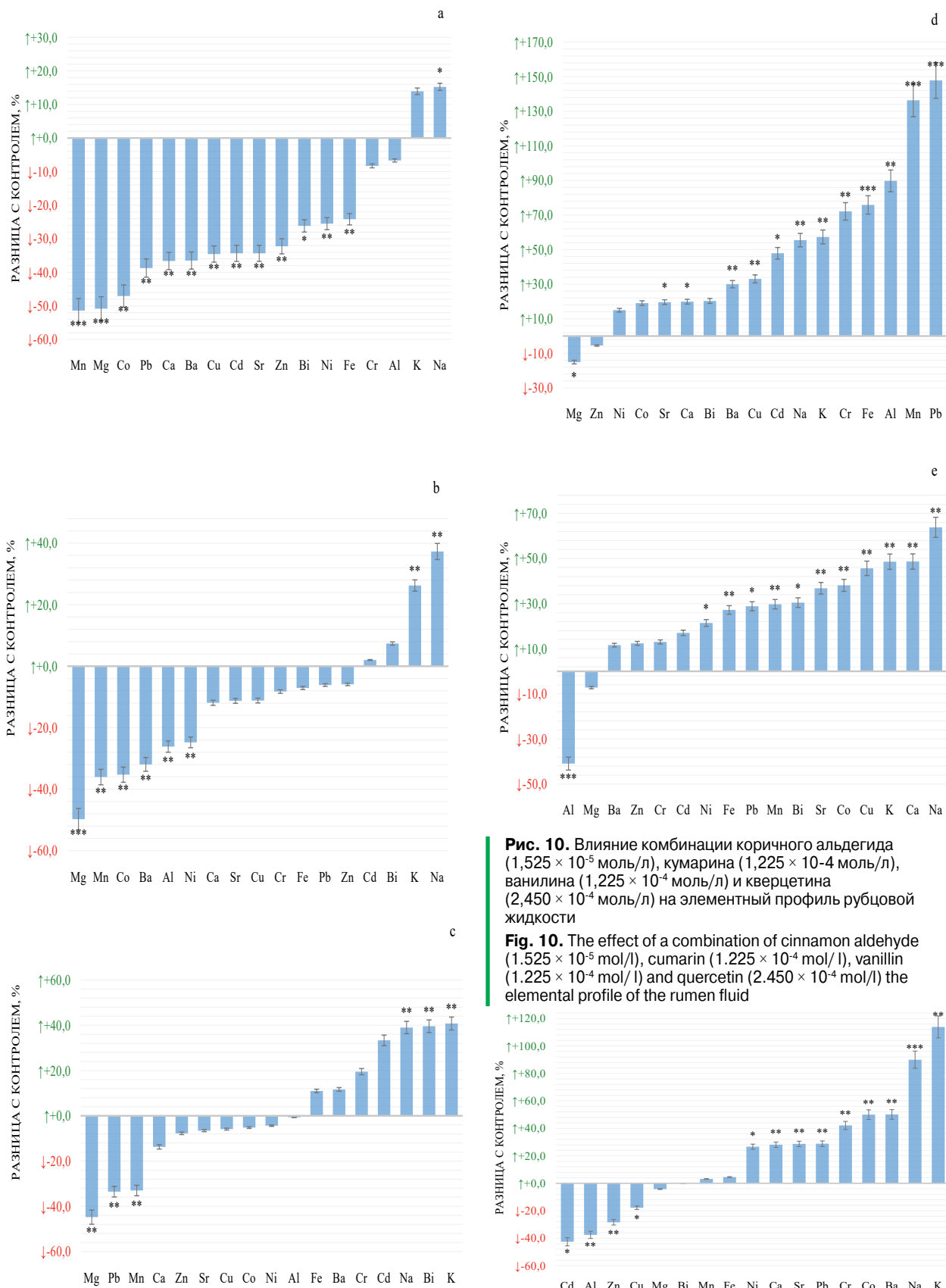
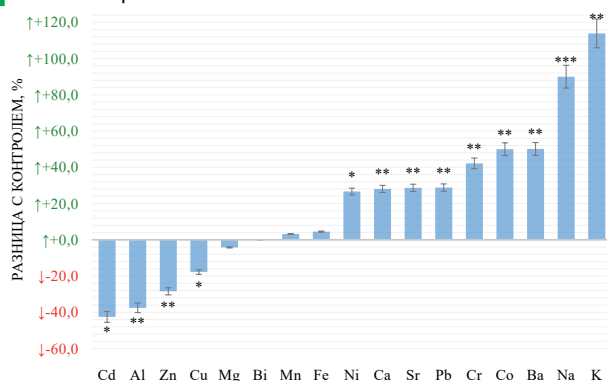


Рис. 10. Влияние комбинации корицевого альдегида ($1,525 \times 10^{-5}$ моль/л), кумарина ($1,225 \times 10^{-4}$ моль/л), ванилина ($1,225 \times 10^{-4}$ моль/л) и кверцетина ($2,450 \times 10^{-4}$ моль/л) на элементный профиль рубцовой жидкости

Fig. 10. The effect of a combination of cinnamon aldehyde (1.525×10^{-5} mol/l), coumarin (1.225×10^{-4} mol/l), vanillin (1.225×10^{-4} mol/l) and quercetin (2.450×10^{-4} mol/l) the elemental profile of the rumen fluid



Na (+90%, $p \leq 0,001$), Co (+50%, $p \leq 0,01$), Cr (+42%, $p \leq 0,01$), Ca (+28%, $p \leq 0,01$) Ni (+27%, $p \leq 0,05$), но также и некоторых токсичных — Pb (+29%, $p \leq 0,01$), Sr (+29%, $p \leq 0,01$), Ba (+50%, $p \leq 0,01$). Уменьшались уровни алюминия (-38%, $p \leq 0,01$), кадмия (-43%, $p \leq 0,05$), цинка (-28%, $p \leq 0,01$), меди (-18%, $p \leq 0,05$).

Таким образом, среди представленных комбинаций наибольшим стимулирующим эффектом в отношении увеличения степени экстракции минеральных составляющих из корма является добавка кверцетина + ванилин, что в свою очередь дает возможность рекомендовать ее к использованию в составе рациона жвачных животных. Этот же факт косвенно позволяет судить об интенсификации пищеварительных процессов.

Выводы/Conclusions

Фитобиотические добавки, в том числе малые молекулы растительного происхождения, демонстрируют существенный потенциал в области управления биохимическими и микробиологическими процессами в рубце жвачных, в том числе влияют на элементный профиль его содержимого, то есть на степень экстракции минералов из кормового субстрата. Показано, что ванилин в концентрации от $1,225 \times 10^{-4}$ до

$4,900 \times 10^{-4}$ моль/л снижает накопление меди, кобальта и свинца, стимулируя извлечение марганца, железа, алюминия и бария. Кверцетин и коричневый альдегид, напротив, подавляют экстракцию почти всех исследованных элементов. Кумарин же в большей степени способствует извлечению минералов из целлюлозной матрицы растительных компонентов корма, за исключением меди, кобальта и цинка. При этом лучший эффект обнаруживает комбинация кверцетина и ванилина — в концентрациях $2,450 \times 10^{-4}$ и $1,225 \times 10^{-4}$ моль/л соответственно. Такой комплекс, судя по всему, позволяет значительно разнообразить микрофлору рубцовой жидкости и способствовать перераспределению элементного профиля в пользу более активной биохимической трансформации компонентов поступающей пищи. Проведенное исследование демонстрирует, что фитобиотики и их комплексы потенциально могут быть использованы при коррекции гипо- и гиперэлементозов различной направленности у жвачных. Однако для более глубокого анализа механизмов интенсификации экстракции макро- и микроэлементов необходимо проведение детального анализа качественного и количественного состава микробиоты методом *in vitro* или *in situ* [60, 61].

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда № 22-76-10008. <https://rscf.ru/project/22-76-10008/>

FUNDING

This research was funded by Russian Science Foundation No. 22-76-10008. <https://rscf.ru/project/22-76-10008/>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Han D. *et al.* Application and substitution of antibiotics in animal feeding. *Medycyna Weterynaryjna*. 2024; 80(1): 5–11. <https://doi.org/10.21521/mw.6830>
- Meek R.W., Vyas H., Piddock L.J.V. Nonmedical Uses of Antibiotics: Time to Restrict Their Use?. *PLoS Biology*. 2015; 13(10): e1002266. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002266>
- Oliveira N.A., Gonçalves B.L., Lee S.H., Oliveira C.A.F., Corassin C.H. Use of Antibiotics in Animal Production and its Impact on Human Health. *Journal of Food Chemistry and Nanotechnology*. 2020; 6(1): 40–47. <https://doi.org/10.17756/jfcn.2020-082>
- Шошин Д.Е., Сизова Е.А., Камирова А.М. Бактериальная люминесценция марганец- и кобальтсодержащих ультрадисперсных частиц (Mn_2O_3 и Co_3O_4) в рубцовой жидкости. *Сельскохозяйственная биология*. 2023; 58(6): 1122–1136. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2023.6.1122rus>
- Ebeid T. *et al.* Impact of probiotics and/or organic acids supplementation on growth performance, microbiota, antioxidative status, and immune response of broilers. *Italian Journal of Animal Science*. 2021; 20(1): 2263–2273. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2021.2012092>
- Shoshin D.E., Sizova E.A., Kamirova A.M. Morphological changes and luminescence of *Escherichia coli* in contact with Mn_2O_3 and Co_3O_4 ultrafine particles as components of a mineral feed additive. *Veterinary World*. 2024; 17(8): 1880–1888. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2024.1880-1888>

REFERENCES

- Han D. *et al.* Application and substitution of antibiotics in animal feeding. *Medycyna Weterynaryjna*. 2024; 80(1): 5–11. <https://doi.org/10.21521/mw.6830>
- Meek R.W., Vyas H., Piddock L.J.V. Nonmedical Uses of Antibiotics: Time to Restrict Their Use?. *PLoS Biology*. 2015; 13(10): e1002266. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002266>
- Oliveira N.A., Gonçalves B.L., Lee S.H., Oliveira C.A.F., Corassin C.H. Use of Antibiotics in Animal Production and its Impact on Human Health. *Journal of Food Chemistry and Nanotechnology*. 2020; 6(1): 40–47. <https://doi.org/10.17756/jfcn.2020-082>
- Shoshin D.E., Sizova E.A., Kamirova A.M. Bacterial luminescence of manganese- and cobalt-containing ultrafine particles (Mn_2O_3 and Co_3O_4) in the rumen fluid. *Agricultural Biology*. 2023; 58(6): 1122–1136. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2023.6.1122eng>
- Ebeid T. *et al.* Impact of probiotics and/or organic acids supplementation on growth performance, microbiota, antioxidative status, and immune response of broilers. *Italian Journal of Animal Science*. 2021; 20(1): 2263–2273. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2021.2012092>
- Shoshin D.E., Sizova E.A., Kamirova A.M. Morphological changes and luminescence of *Escherichia coli* in contact with Mn_2O_3 and Co_3O_4 ultrafine particles as components of a mineral feed additive. *Veterinary World*. 2024; 17(8): 1880–1888. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2024.1880-1888>

7. Mba I.E., Nweze E.I. Nanoparticles as therapeutic options for treating multidrug-resistant bacteria: research progress, challenges, and prospects. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2021; 37: 108.
<https://doi.org/10.1007/s11274-021-03070-x>
8. Сизова Е.А., Нечитайло К.С., Лебедев С.В. Фитобиотики как потенциальные регуляторы функциональной активности микробиома кишечника у цыплят-бройлеров (мини-обзор). *Сельскохозяйственная биология*. 2022; 57(6): 1071–1082.
<https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.6.1071rus>
9. Urban J. *et al.* Enhancing broiler chicken health and performance: the impact of phytochemicals on growth, gut microbiota, antioxidants, and immunity. *Phytochemistry Reviews*. 2024.
<https://doi.org/10.1007/s11101-024-09994-0>
10. Шейда Е.В., Рязанов В.А., Дускаев Г.К., Рахматуллин Ш.Г., Кван О.В. Влияние *Artemisiae absinthii herba* и *Inulae rhizomata et radices* на процессы ферментации и метаногенез в рубце молодняка крупного рогатого скота. *Аграрная наука*. 2023; (3): 46–51.
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-368-3-46-51>
11. Mohammadi Gheisar M., Kim I.H. Phytochemicals in poultry and swine nutrition (a review). *Italian Journal of Animal Science*. 2018; 17(1): 92–99.
<https://doi.org/10.1080/1828051X.2017.1350120>
12. Багно О.А., Прохоров О.Н., Шевченко С.А., Шевченко А.И., Дядичкина Т.В. Фитобиотики в кормлении сельскохозяйственных животных (обзор). *Сельскохозяйственная биология*. 2018; 53(4): 687–697.
<https://doi.org/10.15389/agrobiology.2018.4.687rus>
13. Рязанов В.А., Курилкина М.Я., Дускаев Г.К., Габидулин В.М. Фитобиотики как альтернатива антибиотикам в животноводстве. *Животноводство и кормопроизводство*. 2021; 104(4): 108–123.
<https://doi.org/10.33284/2658-3135-104-4-108>
14. Zaikina A.S., Buryakov N.P., Buryakova M.A., Zagarin A.Yu., Razhev A.A., Aleshin D.E. Impact of Supplementing Phytochemicals as a Substitute for Antibiotics in Broiler Chicken Feed on Growth Performance, Nutrient Digestibility, and Biochemical Parameters. *Veterinary Sciences*. 2022; 9(12): 672.
<https://doi.org/10.3390/vetsci9120672>
15. Atlanderova K., Shoshin D., Kazaev K. Amino acid status and nitrogen forms of rumen contents *in vitro* when phytochemical components are added to the reaction medium. *E3S Web of Conferences*. 2024; 548: 02006.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454802006>
16. Bhalakiya N., Haque N., Patel P., Joshi P. Role of Trace Minerals in Animal Production and Reproduction. *International Journal of Livestock Research*. 2019; 9(9): 1–12.
17. Mousavi Khaneghah A., Fakhri Y., Nematollahi A., Pirhadi M. Potentially toxic elements (PTEs) in cereal-based foods: A systematic review and meta-analysis. *Trends in Food Science & Technology*. 2020; 96: 30–44.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.007>
18. Arya S.S., Rookes J.E., Cahill D.M., Lenka S.K. Vanillin: a review on the therapeutic prospects of a popular flavouring molecule. *Advances in Traditional Medicine*. 2021; 21(3): 415–432.
<https://doi.org/10.1007/s13596-020-00531-w>
19. Salehi B. *et al.* Therapeutic Potential of Quercetin: New Insights and Perspectives for Human Health. *ACS Omega*. 2020; 5(20): 11849–11872.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01818>
20. Blaszczyk N., Rosiak A., Kalużna-Czaplińska J. The Potential Role of Cinnamon in Human Health. *Forests*. 2021; 12(5): 648.
<https://doi.org/10.3390/f12050648>
21. Garg S.S., Gupta J., Sharma S., Sahu D. An insight into the therapeutic applications of coumarin compounds and their mechanisms of action. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2020; 152: 105424.
<https://doi.org/10.1016/j.ejps.2020.105424>
22. Шошин Д.Е., Атландерова К.Н., Дускаев Г.К., Сизова Е.А. Малые молекулы в тесте ингибирования бактериальной люминесценции. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2023; 15(4): 29–55.
<https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-4-29-55>
7. Mba I.E., Nweze E.I. Nanoparticles as therapeutic options for treating multidrug-resistant bacteria: research progress, challenges, and prospects. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2021; 37: 108.
<https://doi.org/10.1007/s11274-021-03070-x>
8. Sizova E.A., Nechitailo K.S., Lebedev S.V. Phytochemicals as potential regulators of the gut microbiome composition and functional activity in broiler chickens (a mini-review). *Agricultural Biology*. 2022; 57(6): 1071–1082.
<https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.6.1071eng>
9. Urban J. *et al.* Enhancing broiler chicken health and performance: the impact of phytochemicals on growth, gut microbiota, antioxidants, and immunity. *Phytochemistry Reviews*. 2024.
<https://doi.org/10.1007/s11101-024-09994-0>
10. Sheida E.V., Ryazanov V.A., Duskaev G.K., Rakhmatullin Sh.G., Kvan O.V. Influence of *Artemisiae absinthii herba* and *Inulae rhizomata et radices* on fermentation processes and methanogenesis in the rumen of young cattle. *Agrarian science*. 2023; (3): 46–51 (in Russian).
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-368-3-46-51>
11. Mohammadi Gheisar M., Kim I.H. Phytochemicals in poultry and swine nutrition (a review). *Italian Journal of Animal Science*. 2018; 17(1): 92–99.
<https://doi.org/10.1080/1828051X.2017.1350120>
12. Bagno O.A., Prokhorov O.N., Shevchenko S.A., Shevchenko A.I., Dyadichkina T.V. Use of phytochemicals in farm animal feeding (review). *Agricultural Biology*. 2018; 53(4): 687–697.
<https://doi.org/10.15389/agrobiology.2018.4.687eng>
13. Ryazanov V.A., Kurilkina M.Ya., Duskaev G.K., Gabidulin V.M. Phytochemicals as an alternative to antibiotics in animal husbandry (review). *Animal husbandry and fodder production*. 2021; 104(4): 108–123 (in Russian).
<https://doi.org/10.33284/2658-3135-104-4-108>
14. Zaikina A.S., Buryakov N.P., Buryakova M.A., Zagarin A.Yu., Razhev A.A., Aleshin D.E. Impact of Supplementing Phytochemicals as a Substitute for Antibiotics in Broiler Chicken Feed on Growth Performance, Nutrient Digestibility, and Biochemical Parameters. *Veterinary Sciences*. 2022; 9(12): 672.
<https://doi.org/10.3390/vetsci9120672>
15. Atlanderova K., Shoshin D., Kazaev K. Amino acid status and nitrogen forms of rumen contents *in vitro* when phytochemical components are added to the reaction medium. *E3S Web of Conferences*. 2024; 548: 02006.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454802006>
16. Bhalakiya N., Haque N., Patel P., Joshi P. Role of Trace Minerals in Animal Production and Reproduction. *International Journal of Livestock Research*. 2019; 9(9): 1–12.
17. Mousavi Khaneghah A., Fakhri Y., Nematollahi A., Pirhadi M. Potentially toxic elements (PTEs) in cereal-based foods: A systematic review and meta-analysis. *Trends in Food Science & Technology*. 2020; 96: 30–44.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.007>
18. Arya S.S., Rookes J.E., Cahill D.M., Lenka S.K. Vanillin: a review on the therapeutic prospects of a popular flavouring molecule. *Advances in Traditional Medicine*. 2021; 21(3): 415–432.
<https://doi.org/10.1007/s13596-020-00531-w>
19. Salehi B. *et al.* Therapeutic Potential of Quercetin: New Insights and Perspectives for Human Health. *ACS Omega*. 2020; 5(20): 11849–11872.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01818>
20. Blaszczyk N., Rosiak A., Kalużna-Czaplińska J. The Potential Role of Cinnamon in Human Health. *Forests*. 2021; 12(5): 648.
<https://doi.org/10.3390/f12050648>
21. Garg S.S., Gupta J., Sharma S., Sahu D. An insight into the therapeutic applications of coumarin compounds and their mechanisms of action. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2020; 152: 105424.
<https://doi.org/10.1016/j.ejps.2020.105424>
22. Shoshin D.E., Atlanderova K.N., Duskaev G.K., Sizova E.A. Small molecules in the bacterial luminescence inhibition test. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2023; 15(4): 29–55 (in Russian).
<https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-4-29-55>

23. Власенко Л.В., Атландерова К.Н., Дускаев Г.К., Шошин Д.Е. Влияние фитохимических веществ на сигнальные молекулы системы Quorum Sensing у бактерий. *Международный вестник ветеринарии*. 2023; (2): 25–31. <https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2023.2.25>
24. Hua D., Hendriks W.H., Xiong B., Pellikaan W.F. Starch and Cellulose Degradation in the Rumen and Applications of Metagenomics on Ruminant Microorganisms. *Animals*. 2022; 12(21): 3020. <https://doi.org/10.3390/ani12213020>
25. Fraga M., Fernández S., Perelmutter K., Pomiés N., Cajarville C., Zunino P. The use of *Prevotella bryantii* 3C5 for modulation of the ruminal environment in an ovine model. *Brazilian Journal of Microbiology*. 2018; 49(S1): 101–106. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2018.07.004>
26. Rodríguez Hernáez J. et al. The first complete genomic structure of *Butyrivibrio fibrisolvens* and its chromid. *Microbial Genomics*. 2018; 4(10): e000216. <https://doi.org/10.1099/mgen.0.000216>
27. Ward B.K., Dufault R.J., Hassell R., Cutulle M.A. Upscaled Bioammonium/Ammonia Production by *Clostridium Aminophilum* Cultured with Soy Protein Isolate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2017; 65(14): 2930–2935. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b00113>
28. Liu Y., Kong D., Wu H.-L., Ling H.-Q. Iron in plant–pathogen interactions. *Journal of Experimental Botany*. 2021; 72(6): 2114–2124. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa516>
29. Hilal E.Y., Elkhairy M.A.E., Osman A.O.A. The Role of Zinc, Manganese and Copper in Rumen Metabolism and Immune Function: A Review Article. *Open Journal of Animal Sciences*. 2016; 6(4): 304–324. <https://doi.org/10.4236/ojas.2016.64035>
30. Schlattl M., Buffler M., Windisch W. Clay Minerals Affect the Solubility of Zn and Other Bivalent Cations in the Digestive Tract of Ruminants In Vitro. *Animals*. 2021; 11(3): 877. <https://doi.org/10.3390/ani11030877>
31. Tsang T., Davis C.I., Brady D.C. Copper biology. *Current Biology*. 2021; 31(9): R421–R427. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.03.054>
32. De Baaij J.H.F., Hoenderop J.G.J., Bindels R.J.M. Magnesium in Man: Implications for Health and Disease. *Physiological Reviews*. 2015; 95(1): 1–46. <https://doi.org/10.1152/physrev.00012.2014>
33. Palmer B.F., Clegg D.J. Physiology and pathophysiology of potassium homeostasis. *Advances in Physiology Education*. 2016; 40(4): 480–490. <https://doi.org/10.1152/advan.00121.2016>
34. Hu X., Wei X., Ling J., Chen J. Cobalt: An Essential Micronutrient for Plant Growth?. *Frontiers in Plant Science*. 2021; 12: 768523. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.768523>
35. Alvino L., Pacheco-Herrero M., López-Lorente Á.I., Quiñones Z., Cárdenas S., González-Sánchez Z.I. Toxicity evaluation of barium ferrite nanoparticles in bacteria, yeast and nematode. *Chemosphere*. 2020; 254: 126786. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126786>
36. Assi M.A., Hezmee M.N.M., Haron A.W., Sabri M.Y.M., Rajion M.A. The detrimental effects of lead on human and animal health. *Veterinary World*. 2016; 9(6): 660–671. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2016.660-671>
37. Tahir I., Alkheraije K.A. A review of important heavy metals toxicity with special emphasis on nephrotoxicity and its management in cattle. *Frontiers in Veterinary Science*. 2023; 10: 1149720. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1149720>
38. Mezzaroba L., Alfieri D.F., Simão A.N.C., Reiche E.M.V. The role of zinc, copper, manganese and iron in neurodegenerative diseases. *NeuroToxicology*. 2019; 74: 230–241. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2019.07.007>
39. Li L., Yang X. The Essential Element Manganese, Oxidative Stress, and Metabolic Diseases: Links and Interactions. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. 2018; 1: 7580707. <https://doi.org/10.1155/2018/7580707>
40. Bosma E.F., Rau M.H., van Gijtenbeek L.A., Siedler S. Regulation and distinct physiological roles of manganese in bacteria. *FEMS Microbiology Reviews*. 2021; 45(6): fuab028. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuab028>
23. Vlasenko L.V., Atlanderova K.N., Duskaev G.K., Shoshin D.E. The effect of phytochemicals on the signaling molecules of the “Quorum Sensing” system in bacteria. *International Bulletin of Veterinary Medicine*. 2023; (2): 25–31 (in Russian). <https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2023.2.25>
24. Hua D., Hendriks W.H., Xiong B., Pellikaan W.F. Starch and Cellulose Degradation in the Rumen and Applications of Metagenomics on Ruminant Microorganisms. *Animals*. 2022; 12(21): 3020. <https://doi.org/10.3390/ani12213020>
25. Fraga M., Fernández S., Perelmutter K., Pomiés N., Cajarville C., Zunino P. The use of *Prevotella bryantii* 3C5 for modulation of the ruminal environment in an ovine model. *Brazilian Journal of Microbiology*. 2018; 49(S1): 101–106. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2018.07.004>
26. Rodríguez Hernáez J. et al. The first complete genomic structure of *Butyrivibrio fibrisolvens* and its chromid. *Microbial Genomics*. 2018; 4(10): e000216. <https://doi.org/10.1099/mgen.0.000216>
27. Ward B.K., Dufault R.J., Hassell R., Cutulle M.A. Upscaled Bioammonium/Ammonia Production by *Clostridium Aminophilum* Cultured with Soy Protein Isolate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2017; 65(14): 2930–2935. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b00113>
28. Liu Y., Kong D., Wu H.-L., Ling H.-Q. Iron in plant–pathogen interactions. *Journal of Experimental Botany*. 2021; 72(6): 2114–2124. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa516>
29. Hilal E.Y., Elkhairy M.A.E., Osman A.O.A. The Role of Zinc, Manganese and Copper in Rumen Metabolism and Immune Function: A Review Article. *Open Journal of Animal Sciences*. 2016; 6(4): 304–324. <https://doi.org/10.4236/ojas.2016.64035>
30. Schlattl M., Buffler M., Windisch W. Clay Minerals Affect the Solubility of Zn and Other Bivalent Cations in the Digestive Tract of Ruminants In Vitro. *Animals*. 2021; 11(3): 877. <https://doi.org/10.3390/ani11030877>
31. Tsang T., Davis C.I., Brady D.C. Copper biology. *Current Biology*. 2021; 31(9): R421–R427. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.03.054>
32. De Baaij J.H.F., Hoenderop J.G.J., Bindels R.J.M. Magnesium in Man: Implications for Health and Disease. *Physiological Reviews*. 2015; 95(1): 1–46. <https://doi.org/10.1152/physrev.00012.2014>
33. Palmer B.F., Clegg D.J. Physiology and pathophysiology of potassium homeostasis. *Advances in Physiology Education*. 2016; 40(4): 480–490. <https://doi.org/10.1152/advan.00121.2016>
34. Hu X., Wei X., Ling J., Chen J. Cobalt: An Essential Micronutrient for Plant Growth?. *Frontiers in Plant Science*. 2021; 12: 768523. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.768523>
35. Alvino L., Pacheco-Herrero M., López-Lorente Á.I., Quiñones Z., Cárdenas S., González-Sánchez Z.I. Toxicity evaluation of barium ferrite nanoparticles in bacteria, yeast and nematode. *Chemosphere*. 2020; 254: 126786. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126786>
36. Assi M.A., Hezmee M.N.M., Haron A.W., Sabri M.Y.M., Rajion M.A. The detrimental effects of lead on human and animal health. *Veterinary World*. 2016; 9(6): 660–671. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2016.660-671>
37. Tahir I., Alkheraije K.A. A review of important heavy metals toxicity with special emphasis on nephrotoxicity and its management in cattle. *Frontiers in Veterinary Science*. 2023; 10: 1149720. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1149720>
38. Mezzaroba L., Alfieri D.F., Simão A.N.C., Reiche E.M.V. The role of zinc, copper, manganese and iron in neurodegenerative diseases. *NeuroToxicology*. 2019; 74: 230–241. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2019.07.007>
39. Li L., Yang X. The Essential Element Manganese, Oxidative Stress, and Metabolic Diseases: Links and Interactions. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. 2018; 1: 7580707. <https://doi.org/10.1155/2018/7580707>
40. Bosma E.F., Rau M.H., van Gijtenbeek L.A., Siedler S. Regulation and distinct physiological roles of manganese in bacteria. *FEMS Microbiology Reviews*. 2021; 45(6): fuab028. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuab028>

41. Ellis J.L. *et al.* The effect of lactic acid bacteria included as a probiotic or silage inoculant on in vitro rumen digestibility, total gas and methane production. *Animal Feed Science and Technology*. 2016; 211: 61–74.
<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.10.016>
42. Vigh A., Criste A., Gragnic K., Moquet L., Gerard C. Ruminal Solubility and Bioavailability of Inorganic Trace Mineral Sources and Effects on Fermentation Activity Measured in Vitro. *Agriculture*. 2023; 13(4): 879.
<https://doi.org/10.3390/agriculture13040879>
43. Baj J. *et al.* Consequences of Disturbing Manganese Homeostasis. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023; 24(19): 14959.
<https://doi.org/10.3390/ijms241914959>
44. Wysocka D., Snarska A., Sobiech P. Iron in cattle health. *Journal of Elementology*. 2020; 25(3): 1175–1185.
<https://doi.org/10.5601/jelem.2020.25.2.1960>
45. Puig S., Ramos-Alonso L., Romero A.M., Martínez-Pastor M.T. The elemental role of iron in DNA synthesis and repair. *Metallomics*. 2017; 9(11): 1483–1500.
<https://doi.org/10.1039/c7mt00116a>
46. Díaz-Tocados J.M. *et al.* Effect of a calcium-rich diet on mineral and bone metabolism in rats. *Revista de Osteoporosis y Metabolismo Mineral*. 2022; 14(1): 48–54.
<https://doi.org/10.4321/S1889-836X2022000100006>
47. Wilkens M.R., Nelson C.D., Hernandez L.L., McArt J.A.A. *Symposium review: Transition cow calcium homeostasis — Health effects of hypocalcemia and strategies for prevention. Journal of Dairy Science*. 2020; 103(3): 2909–2927.
<https://doi.org/10.3168/jds.2019-17268>
48. Matikainen N., Pekkarinen T., Ryhänen E.M., Schalin-Jäntti C. Physiology of Calcium Homeostasis: An Overview. *Endocrinology and Metabolism Clinics of North America*. 2021; 50(4): 575–590.
<https://doi.org/10.1016/j.ecl.2021.07.005>
49. Al-Fartusie F.S., Mohssan S.N. Essential Trace Elements and Their Vital Roles in Human Body. *Indian Journal of Advances in Chemical Science*. 2017; 5(3): 127–136.
50. Alfano M., Cavazza C. Structure, function, and biosynthesis of nickel-dependent enzymes. *Protein Science*. 2020; 29(5): 1071–1089.
<https://doi.org/10.1002/pro.3836>
51. Wang Y., Jiang M., Zhang Z., Sun H. Effects of over-load iron on nutrient digestibility, haemato-biochemistry, rumen fermentation and bacterial communities in sheep. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 2020; 104(1): 32–43.
<https://doi.org/10.1111/jpn.13225>
52. Nguyen T.L.A., Bhattacharya D. Antimicrobial Activity of Quercetin: An Approach to Its Mechanistic Principle. *Molecules*. 2022; 27(8): 2494.
<https://doi.org/10.3390/molecules27082494>
53. Shamsudin N.F. *et al.* Antibacterial Effects of Flavonoids and Their Structure-Activity Relationship Study: A Comparative Interpretation. *Molecules*. 2022; 27(4): 1149.
<https://doi.org/10.3390/molecules27041149>
54. Kim D., Kuppusamy P., Jung J.S., Kim K.H., Choi K.C. Microbial Dynamics and In Vitro Degradation of Plant Secondary Metabolites in Hanwoo Steer Rumen Fluids. *Animals*. 2021; 11(8): 2350.
<https://doi.org/10.3390/ani11082350>
55. Phale P.S., Malhotra H., Shah B.A. Degradation strategies and associated regulatory mechanisms/features for aromatic compound metabolism in bacteria. *Advances in Applied Microbiology*. 2020; 112: 1–65.
<https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2020.02.002>
56. Vasconcelos N.G., Croda J., Simionatto S. Antibacterial mechanisms of cinnamon and its constituents: A review. *Microbial Pathogenesis*. 2018; 120: 198–203.
<https://doi.org/10.1016/j.micpath.2018.04.036>
57. Lai T., Sun Y., Liu Y., Li R., Chen Y., Zhou T. Cinnamon Oil Inhibits *Penicillium expansum* Growth by Disturbing the Carbohydrate Metabolic Process. *Journal of Fungi*. 2021; 7(2): 123.
<https://doi.org/10.3390/jof7020123>
58. Slikkerveer A., de Wolff F.A. Toxicity of Bismuth and Its Compounds. Chang L.W. (ed.). *Toxicology of Metals*. Boca Raton: CRC Press. 1996; 1: 439–454.
<https://doi.org/10.1201/9781003418917-39>
41. Ellis J.L. *et al.* The effect of lactic acid bacteria included as a probiotic or silage inoculant on in vitro rumen digestibility, total gas and methane production. *Animal Feed Science and Technology*. 2016; 211: 61–74.
<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.10.016>
42. Vigh A., Criste A., Gragnic K., Moquet L., Gerard C. Ruminal Solubility and Bioavailability of Inorganic Trace Mineral Sources and Effects on Fermentation Activity Measured in Vitro. *Agriculture*. 2023; 13(4): 879.
<https://doi.org/10.3390/agriculture13040879>
43. Baj J. *et al.* Consequences of Disturbing Manganese Homeostasis. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023; 24(19): 14959.
<https://doi.org/10.3390/ijms241914959>
44. Wysocka D., Snarska A., Sobiech P. Iron in cattle health. *Journal of Elementology*. 2020; 25(3): 1175–1185.
<https://doi.org/10.5601/jelem.2020.25.2.1960>
45. Puig S., Ramos-Alonso L., Romero A.M., Martínez-Pastor M.T. The elemental role of iron in DNA synthesis and repair. *Metallomics*. 2017; 9(11): 1483–1500.
<https://doi.org/10.1039/c7mt00116a>
46. Díaz-Tocados J.M. *et al.* Effect of a calcium-rich diet on mineral and bone metabolism in rats. *Revista de Osteoporosis y Metabolismo Mineral*. 2022; 14(1): 48–54.
<https://doi.org/10.4321/S1889-836X2022000100006>
47. Wilkens M.R., Nelson C.D., Hernandez L.L., McArt J.A.A. *Symposium review: Transition cow calcium homeostasis — Health effects of hypocalcemia and strategies for prevention. Journal of Dairy Science*. 2020; 103(3): 2909–2927.
<https://doi.org/10.3168/jds.2019-17268>
48. Matikainen N., Pekkarinen T., Ryhänen E.M., Schalin-Jäntti C. Physiology of Calcium Homeostasis: An Overview. *Endocrinology and Metabolism Clinics of North America*. 2021; 50(4): 575–590.
<https://doi.org/10.1016/j.ecl.2021.07.005>
49. Al-Fartusie F.S., Mohssan S.N. Essential Trace Elements and Their Vital Roles in Human Body. *Indian Journal of Advances in Chemical Science*. 2017; 5(3): 127–136.
50. Alfano M., Cavazza C. Structure, function, and biosynthesis of nickel-dependent enzymes. *Protein Science*. 2020; 29(5): 1071–1089.
<https://doi.org/10.1002/pro.3836>
51. Wang Y., Jiang M., Zhang Z., Sun H. Effects of over-load iron on nutrient digestibility, haemato-biochemistry, rumen fermentation and bacterial communities in sheep. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 2020; 104(1): 32–43.
<https://doi.org/10.1111/jpn.13225>
52. Nguyen T.L.A., Bhattacharya D. Antimicrobial Activity of Quercetin: An Approach to Its Mechanistic Principle. *Molecules*. 2022; 27(8): 2494.
<https://doi.org/10.3390/molecules27082494>
53. Shamsudin N.F. *et al.* Antibacterial Effects of Flavonoids and Their Structure-Activity Relationship Study: A Comparative Interpretation. *Molecules*. 2022; 27(4): 1149.
<https://doi.org/10.3390/molecules27041149>
54. Kim D., Kuppusamy P., Jung J.S., Kim K.H., Choi K.C. Microbial Dynamics and In Vitro Degradation of Plant Secondary Metabolites in Hanwoo Steer Rumen Fluids. *Animals*. 2021; 11(8): 2350.
<https://doi.org/10.3390/ani11082350>
55. Phale P.S., Malhotra H., Shah B.A. Degradation strategies and associated regulatory mechanisms/features for aromatic compound metabolism in bacteria. *Advances in Applied Microbiology*. 2020; 112: 1–65.
<https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2020.02.002>
56. Vasconcelos N.G., Croda J., Simionatto S. Antibacterial mechanisms of cinnamon and its constituents: A review. *Microbial Pathogenesis*. 2018; 120: 198–203.
<https://doi.org/10.1016/j.micpath.2018.04.036>
57. Lai T., Sun Y., Liu Y., Li R., Chen Y., Zhou T. Cinnamon Oil Inhibits *Penicillium expansum* Growth by Disturbing the Carbohydrate Metabolic Process. *Journal of Fungi*. 2021; 7(2): 123.
<https://doi.org/10.3390/jof7020123>
58. Slikkerveer A., de Wolff F.A. Toxicity of Bismuth and Its Compounds. Chang L.W. (ed.). *Toxicology of Metals*. Boca Raton: CRC Press. 1996; 1: 439–454.
<https://doi.org/10.1201/9781003418917-39>

59. Zhao Z. *et al.* Pathway for biodegrading coumarin by a newly isolated *Pseudomonas* sp. USTB-Z. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2021; 37: 89.
<https://doi.org/10.1007/s11274-021-03055-w>

60. Атландерова К.Н., Власенко Л.В., Дускаев Г.К. Оценка действия «Биовита» и коричного альдегида на степень переваримости корма и микробиом рубца крупного рогатого скота. *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2024; 112: 201–207.
<https://elibrary.ru/enbrhl>

61. Власенко Л.В., Атландерова К.Н., Дускаев Г.К. Анализ микробиома рубца крупного рогатого скота и степени переваримости корма под действием умбеллиферона. *Ветеринария и кормление*. 2024; (5): 19–21.
<https://doi.org/10.30917/ATT-VK-1814-9588-2024-5-4>

ОБ АВТОРАХ

Ксения Николаевна Атландерова

кандидат биологических наук, научный сотрудник
 atlander-kn@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0003-3977-4831>

Даниил Евгеньевич Шошин

младший научный сотрудник
 daniilshoshin@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3086-681X>

Кирилл Александрович Казаев

младший научный сотрудник
 kazaevk970@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-0443-6990>

Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий,
 ул. 9 Января, 29, Оренбург, 460000, Россия

59. Zhao Z. *et al.* Pathway for biodegrading coumarin by a newly isolated *Pseudomonas* sp. USTB-Z. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2021; 37: 89.
<https://doi.org/10.1007/s11274-021-03055-w>

60. Atlanderova K.N., Vlasenko L.V., Duskaev G.K. Assessment of the “Biovit” and cinnamaldehyde effect on the degree of feed digestibility and the cattle rumen microbiome. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2024; 112: 201–207 (in Russian).
<https://elibrary.ru/enbrhl>

61. Vlasenko L.V., Atlanderova K.N., Duskaev G.K. Analysis of the microbiome of the rumen of cattle and the degree of digestibility of feed under the influence of umbelliferone. *Veterinaria i kormlenie*. 2024; (5): 19–21 (in Russian).
<https://doi.org/10.30917/ATT-VK-1814-9588-2024-5-4>

ABOUT THE AUTHORS

Ksenia Nikolaevna Atlanderova

Candidate of Biological Sciences, Researcher
 atlander-kn@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0003-3977-4831>

Daniil Evgenievich Shoshin

Junior Researcher
 daniilshoshin@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3086-681X>

Kirill Alexandrovich Kazaev

Junior Researcher
 kazaevk970@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-0443-6990>

Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences,
 29 9th Yanvarya Str., Orenburg, 460000, Russia

МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА И САММИТ



МЯСНАЯ & КУРИНЫЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТЬ & КОРОЛЬ
ИНДУСТРИЯ ХОЛОДА для АПК
MAP Russia 2025

27–29 МАЯ

Москва, Россия



Реклама



Асти Групп
выставочная компания

Организатор:
 ООО «Выставочная компания Асти Групп»
 Тел. / WA Business: +7 (495) 797 6914
 E-mail: info@meatindustry.ru
www.meatindustry.ru

