

НАНОТЕХНОЛОГИИ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ И КОРМОПРОИЗВОДСТВЕ

Научная статья

УДК 636.085:577.17:636.085.25

doi:10.33284/2658-3135-106-3-8

Влияние УДЧ Cr_2O_3 на процессы ферментации в рубце жвачных животных в опытах *in vitro*

Елена Владимировна Шейда^{1,3}, Святослав Валерьевич Лебедев²

^{1,2}Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия

³Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

^{1,3}elena-shejjda@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2586-613X>

²sv74@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9485-7010>

Аннотация. С увеличением поголовья жвачных животных во всём мире использование метаболических модификаторов стало важной областью для многих исследователей, ищущих супрафизиологический рацион для улучшения производственных параметров. Для улучшения производительности высокопродуктивных коров важен оптимальный баланс всех питательных веществ, включая минералы. Хром является одним из важных микроэлементов в метаболизме жвачных животных, однако механизм его действия и влияние на метаболические процессы в организме до конца не изучены, а порой противоречивы. Целью нашего исследования является изучение дополнительного включения ультрадисперсных частиц (УДЧ) Cr_2O_3 на процессы ферментации в рубце жвачных методом *in vitro*. Экспериментальные исследования показали, что дополнительное введение УДЧ Cr_2O_3 не изменяло структуру бактериального сообщества, но способствовало увеличению численности представителя филоума *Bacteroidetes* на 9,2 %, ответственных за переваривание белковой пищи, а также стимулировало рост представителей семейств *Ruminococcaceae*, *Selenomonadaceae*, *Prevotellaceae*, *Lentimicrobiaceae* на 9,1 %, 9,4 %, 20,8 %, 1,2 %. Выявлена положительная корреляция между видовым составом микроорганизмов *Olsenella* и уксусной кислотой ($r=0,72$) и общим азотом ($r=0,52$), *Ruminococcus* и пропионовой ($r=0,73$), *Methanomassiliicoccus* и валерьяновой ($r=0,72$), *Fournierella* и капроновой ($r=0,59$). Увеличение активности рубцовой микробиоты способствовало усилению переваримости СВ опытных образцов на 1,9 % ($P \leq 0,05$) и процессов ферментации, так в рубцовом содержимом отмечено увеличение общего уровня ЛЖК на 70,7 % ($P \leq 0,05$) и общего и белкового азота – на 1,9 % и 5,2%.

Ключевые слова: ультрадисперсные частицы, хром, переваримость, летучие жирные кислоты, метаболиты азота, микробиом

Благодарности: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-16-00061.

Для цитирования: Шейда Е.В., Лебедев С.В. Влияние УДЧ Cr_2O_3 на процессы ферментации в рубце жвачных животных в опытах *in vitro* // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106, № 3. С. 8-20. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-3-8>

NANOTECHNOLOGY IN ANIMAL HUSBANDRY AND FODDER PRODUCTION

Original article

Influence of Cr_2O_3 UFP on fermentation processes in rumen of ruminants in *in vitro* experiments

Elena V Sheida^{1,3}, Svyatoslav V Lebedev²

^{1,2}Federal Research Centre for Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

³Orenburg State University, Orenburg, Russia

^{1,3}elena-snejjda@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2586-613X>

²sv74@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9485-7010>

Abstract. With the increase in livestock worldwide, the use of metabolic modifiers has become an important area for many researchers looking for a supraphysiological diet to improve production parame-

ters. To improve the productivity of highly productive cows, an optimal balance of all nutrients, including minerals, is important. Chromium is one of the important trace elements that plays an important role in the metabolism of ruminants, but the mechanism of its action and its effect on metabolic processes in the body are not fully understood, and sometimes contradictory. The aim of our study is to study the additional inclusion of ultrafine particles (UFP) of Cr_2O_3 on the fermentation processes in the rumen of ruminants by *in vitro* method. Experimental studies have shown that the additional introduction of Cr_2O_3 UFP did not change the structure of the bacterial community, but contributed to an increase in the number of representatives of the *Bacteroidetes* phylum by 9.2% responsible for the digestion of protein foods, and also stimulated the growth of representatives of the families *Ruminococcaceae*, *Selenomonadaceae*, *Prevotellaceae*, *Lentimicrobiaceae* by 9,1 % , 9,4 % , 20,8 % , 1,2 % . A positive correlation was found between the species composition of *Olsenella* microorganisms and acetic acid ($r=0.72$) and total nitrogen ($r=0.52$), *Ruminococcus* and propionic ($r=0.73$), *Methanomassiliicoccus* and valerian ($r=0.72$), *Fournierella* and caprona ($r=0.59$). An increase in the activity of the scar microbiota contributed to an increase in the digestibility of the experimental samples by 1.9% ($P\leq 0.05$) and fermentation processes, so in the scar content there was an increase in the total level of VFA by 70.7% ($P\leq 0.05$) and total and protein nitrogen by 1.9% and 5.2%.

Keywords: ultrafine particles, chromium, digestibility, volatile fatty acids, nitrogen metabolites, microbiome

Acknowledgments: the work was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 23-16-00061.

For citation: Sheida EV, Lebedev SV. Influence of Cr_2O_3 UFP on fermentation processes in rumen of ruminants in *in vitro* experiments. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(3):8-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-3-8>

Введение.

Основной задачей агропромышленного комплекса Российской Федерации является обеспечение населения достаточным количеством качественных, безопасных и относительно дешёвых продуктов питания. Для достижения поставленной цели необходима разработка методов повышения эффективности отрасли животноводства, что можно достичь организацией сбалансированного и полноценного кормления животных. Большая роль в системе полноценного кормления отводится минеральному обеспечению рационов (Burgne L and Murphy RA, 2022; Георгиевский В.И. и др., 1979; Москалев Ю.И., 1985).

Многие научные исследования, проведённые отечественными и зарубежными учёными по вопросам минерального питания, показали значительную роль минеральных веществ в метаболических процессах в организме (Кокорев В.А. и др., 2017).

Анализ кормов для крупного рогатого скота показал, что некоторые химические элементы содержатся в больших количествах, а другие – в ничтожно малых, и степень доступности их в организме животного также различна и зависит главным образом от формы вещества (NRC, 2005).

Впервые сообщалось, что хром является незаменимым минералом у крыс (Schwarz K and Mertz W, 1959) и для человека в 1977 году (Jeejeebhoy KN et al., 1977), основное внимание уделялось связи хрома с деятельностью поджелудочной железы и сахарным диабетом. Только в 1990-х годах хром начал интенсивно изучаться как важный минерал для домашнего скота.

Хром играет огромную роль во многих физиологических процессах, протекающих в организме животных и, за счёт активного компонента хромодулина участвует в углеводном, жировом и белковом обменах (Bernhard BC et al., 2012a; Kafilzadeh F et al., 2012; Lashkari S et al., 2018).

Содержание хрома в традиционных рационах незначительное, но покрывает потребность в данном элементе. Однако в недавних исследованиях включение супрафизиологических доз хрома оказало существенное влияние на углеводный и жировой обмены и повышение продуктивности (Giri AK et al., 2021; Lalhriatpuii M et al., 2023; Trojan SJ et al., 2023).

Высокая интенсивность производства отрасли животноводства влечёт развитие стрессовых реакций у высокопродуктивных животных, что может приводить к дефициту хрома, быть причиной травм и заболеваний, усиливать метаболизм глюкозы и мобилизацию хрома из резервов организма (Lashkari S et al., 2018; Pechova A and Pavlata L, 2007). Проведённые многочисленные исследования до конца не выяснили механизм действия хрома, а его физиологическая роль в метаболических процессах в организме и продуктивности животных носит весьма противоречивый характер.

Цель исследования.

Изучить влияние дополнительного включения ультрадисперсных Cr_2O_3 на процессы ферментации в рубце *in vitro*.

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Рубцовое содержимое, полученное через хроническую фистулу рубца от бычков казахской белоголовой породы средней массой 340-342 кг, возрастом 18 месяцев.

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями российских нормативных актов (1987 г.; Приказ Минздрава СССР № 755 от 12.08 1977 «О мерах по дальнейшему совершенствованию организационных форм работы с использованием экспериментальных животных») и «Guide for the Care and Use of Laboratory Animals» (National Academy Press, Washington, D.C., 1996). При проведении исследований были предприняты меры, чтобы свести к минимуму страдания животных и уменьшения количества исследованных опытных образцов. Научные исследования осуществлялись в соответствии с требованиями инструкций и рекомендаций к выполнению биологических исследований (Веселова Т.А. и др., 2018; Сарымсакова Б.Е. и др., 2007).

Схема эксперимента. УДЧ частицы хрома Cr_2O_3 ($d=91$ нм, удельная поверхность – $9 \text{ м}^2/\text{г}$, Z-потенциал – $93 \pm 0,53$ мВ) содержали 99,8 % Cr, получены методом плазмохимического синтеза (ООО «Платина», г. Москва). Исследования производили на модели бычков с фистулой рубца методом латинского квадрата 3×3 . Животные содержались в клетках ($S=4 \text{ м}^2$) со свободным доступом к воде и корму на базе лаборатории биологических испытаний и экспертиз ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук».

Подопытные животные получали основной рацион (Калашников А.П. и др., 2003), представленный в табл. 1.

Таблица 1. Состав и питательность рациона бычков, кг
Table 1. Composition and nutritional value of the diet of bulls, kg

Показатель/ <i>Indicator</i>	Количество, кг/ <i>Quantity, kg</i>
Сено разнотравное/ <i>Mixed grass hay</i>	4,79
Зерновая смесь (ячмень, пшеница)/ <i>Grain mixture (barley, wheat)</i>	1,76
Подсолнечный шрот/ <i>Sunflower meal</i>	1,1
Патока кормовая/ <i>Feed molasses</i>	0,5
Премикс ПК-60/ <i>PC-60 Premix</i>	0,05
Соль/ <i>Salt</i>	0,002
Сухое вещество/ <i>Dry matter</i>	6,46
Сырой протеин/ <i>Raw protein</i>	1,09
Сырая клетчатка/ <i>Raw fiber</i>	1,35
Сырой жир/ <i>Raw fat</i>	0,25
БЭВ/ <i>Nitrogen-free extractive substances</i>	3,63
НДК/ <i>Neutral detergent fiber</i>	3,72
ОЭ МДж/ <i>Metabolizable energy MJ</i>	94,04

Исследования переваримости СВ, ферментативных процессов в рубцовом содержимом и таксономический состав микробиома производили методом *in vitro*. Для исследования были приготовлены 2 опытных образца: I и II. В состав опытных образцов входили: сено разнотравное – 70 %, смесь концентратов (ячмень, пшеница) – 30 %, образцы корма измельчали до однородной массы, с размером частиц не более 2,0 мм. Во II образец вводили УДЧ Cr_2O_3 в дозировке 200 мкг/кг СВ. Перед включением в рацион наночастицы диспергировали в физиологическом растворе с помощью ультразвукового диспергатора УЗДН-2 («НПП Академприбор», Россия) (35 кГц, 300 Вт, 10 мкА, 30 мин).

У фистульных животных через 3 часа после кормления брали пробы рубцового содержимого, которые фильтровали через 4 слоя марли и вносили в камеру инкубатора «ANKOM Daisy II», предварительно в камеру помещали образцы с исследуемыми кормами (мешочки), после чего замещали воздух углекислотной средой и выдерживали при температуре +39 °С в течение 48 часов. По окончании инкубации образцы промывались и высушивались при температуре +60 °С до константного веса.

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

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

где: К – коэффициент переваримости сухого вещества корма (%);

А – исходная масса 1 (образец корма с мешочком) (мг);

В – масса после инкубации (образец корма с мешочком) (мг);

С – исходная масса 2 (образец корма без массы мешочка) (мг).

После инкубирования производили отбор рубцовой жидкости шприцом дозатором «Экохим ОПА-02-20» (ООО «Экросхим», Россия), в микропробирки типа «Eppendorf» объемом 1,5 мл. Для анализа отбирали 1,5 мл субстрата рубцовой жидкости, по одной пробе для каждого образца.

Уровень летучих жирных кислот (ЛЖК) в содержимом рубца определяли методом газовой хроматографии с пламенно-ионизационным детектированием на хроматографе газовом «Кристаллюкс-4000М (СКБ Хроматек, Россия), определение форм азота – по ГОСТ 26180-84, ГОСТ 13496.4-2019.

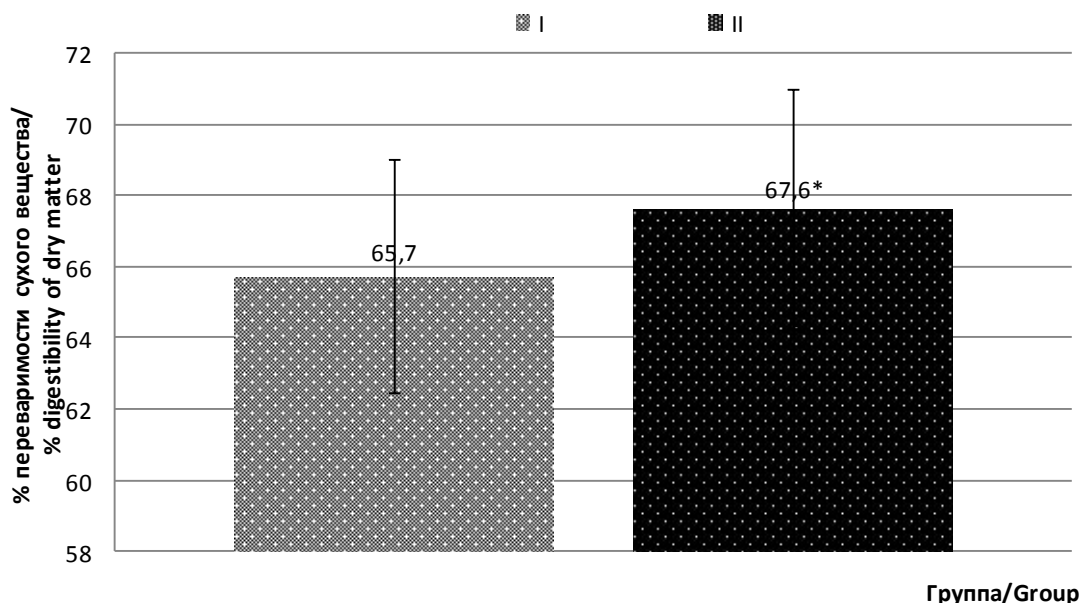
Метагеномный анализ содержимого рубца. Микробное биоразнообразие содержимого рубца проводили с помощью MiSeq («Illumina», США) методом секвенирования нового поколения (NGS) с набором реагентов MiSeq® Reagent Kit v3 (600 cycle) в Центре коллективного пользования научным оборудованием «Персистенция микроорганизмов» (Институт клеточного и внутриклеточного симбиоза УрО РАН). ДНК-библиотеки для секвенирования были созданы по протоколу «Illumina, Inc.» (США) с праймерами S-D-Bact-0341-b-S-17 и S-D-Bact-0785-a-A-21 к варибельному участку V3-V4 гена 16S рРНК. NGS-секвенирование выполняли на платформе MiSeq («Illumina, Inc.», США) с набором реактивов MiSeq Reagent Kit V3 PE600 («Illumina, Inc.», США) (Шейда Е.В., 2022).

Оборудование и технические средства. Исследования выполнены в ЦКП БСТ РАН <http://цкп-бст.рф>. Исследования переваримости СВ и микробиома рубца производили методом *in vitro* с использованием установки-инкубатора «ANKOM Daisy II» (модификации D200 и D200I). Термостат ТС-1/80 СПУ (ООО «Амедис Инжиниринг», г. Нижний Новгород, Россия), шприц-дозатор Экохим ОПА-2-20 (ООО «Экросхим», г. Санкт-Петербург, Россия), микропробирки «Eppendorf». Хроматограф газовый «Кристаллюкс-4000М» (СКБ Хроматек, Россия). Комплект оборудования для определения белка/азота по Кьельдалю (Millab, Италия). Перед включением в рацион ультрадисперсные частицы диспергировали с помощью ультразвукового диспергатора УЗДН-2 («НПП Академприбор», Россия).

Статистическая обработка. Численные данные были обработаны с помощью программы SPSS «Statistics 20» («IBM», США), рассчитывали средние (M), среднеквадратичные отклонения ($\pm\sigma$), ошибки стандартного отклонения ($\pm SE$). Для сравнения вариантов использовали непараметрический метод анализа. Различия считали статистически значимыми при * – $P \leq 0,05$, ** – $P \leq 0,01$. Корреляционный анализ проведён по методу Спирмена. При использовании коэффициента ранговой корреляции Спирмена условно оценивают тесноту связи между признаками, считая значения коэффициента равные 0,5 – показателями слабой тесноты связи; значения более 0,5, но менее 0,8 – показателями умеренной тесноты связи, а значения 0,8 и более – показателями высокой тесноты связи.

Результаты исследования.

Анализ переваримости СВ в I группе показал уровень 65,7 %, дополнительное включение УДЧ хрома повышало переваримость СВ опытного рациона на 1,9 % ($P \leq 0,05$) (рис. 1).

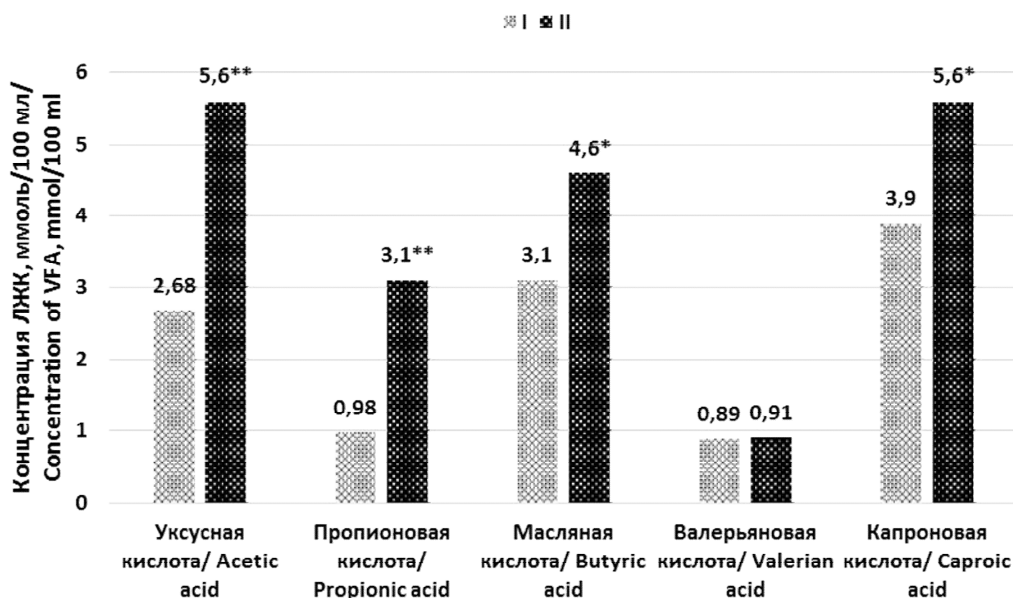


Примечание: * – $P \leq 0,05$ /Note: * – $P \leq 0,05$

Рис. 1 - Переваримость сухого вещества протеиновых рационов при дополнительном включении хрома, %

Figure 1 - Digestibility of dry matter of protein diets with additional inclusion of chromium, %

В ходе исследований *in vitro* установлено, что уровень ЛЖК в образцах при введении хрома был значительно выше (рис. 2). Во II группе относительно I группы общая концентрация летучих жирных кислот была выше на 70,7 %, при этом концентрация уксусной кислоты повышалась на 109,0 % ($P \leq 0,01$), пропионовой – на 216,3 % ($P \leq 0,01$), масляной на – 48,4 % ($P \leq 0,05$) и капроновой – на 43,6 % ($P \leq 0,05$).

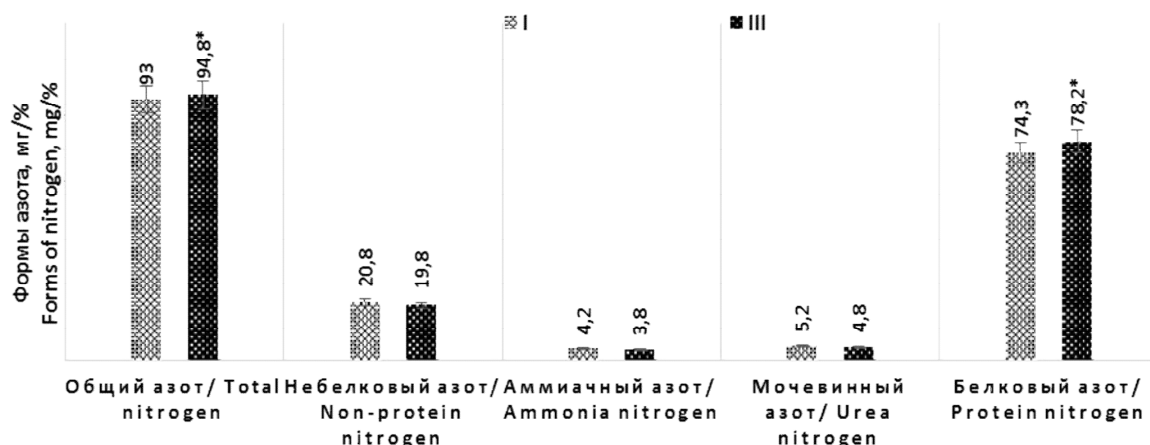


Примечание: * – $P \leq 0,05$; ** – $P \leq 0,01$ /Note: * – $P \leq 0,05$; ** – $P \leq 0,01$

Рис. 2 – Концентрация ЛЖК при использовании хрома в белковых рационах, ммоль/100 мл

Figure 2 – The concentration of VFA after using chromium in protein diets, mmol/100 ml

Содержание азотистых компонентов рубцовой жидкости (РЖ) является одним из показателей степени усвояемости азота корма, а также общей направленности процессов рубцового пищеварения. Включение УДЧ хрома оказывало усиление метаболизма азота в рубцовой жидкости (рис. 3). Так, во II группе отмечено увеличение уровня общего азота на 1,9 % и белкового азота – на 5,2 % ($P \leq 0,05$), при этом концентрация небелкового, аммиачного и мочевинового азота в данной группе, напротив, была ниже на 4,8 %, 9,5 % и 7,7 % соответственно.



Примечание: * – $P \leq 0,05$ /Note: * – $P \leq 0.05$

Рис. 3 – Содержание азотистых фракций в рубцовой жидкости при дополнительном включении белков и УДЧ, мг/%

Figure 3 – The content of nitrogenous fractions in ruminal fluid with additional inclusion of proteins and UFP, mg /%

Анализ таксономического состава микроорганизмов рубцового содержимого I группы показал наличие 17 филумов, 35 классов и 67 семейств (рис. 4). Преобладающими были 3 филума – *Bacteroidetes* ($48,29 \pm 0,64$ %), *Firmicutes* ($19,63 \pm 0,49$ %) и *Proteobacteria* ($9,68 \pm 0,31$ %), *Verrucomicrobia* ($14,94 \pm 0,49$ %). Доминирующими семействами явились *Ruminococcaceae*, *Lachnospiraceae*, неклассифицированные "*Bacteroidales*", *Succnivibrionaceae*, *Subdivision 5*. Также отмечено увеличение численности представителей рода *Prevotella*, участвующих непосредственно в расщеплении протеиновых компонентов.

Использование добавки хрома не оказывало существенного влияния на таксономический состав микробиома. В рубцовом содержимом II группы также доминирующими филумами *Bacteroidetes* ($57,53 \pm 0,94$ %), *Firmicutes* ($15,27 \pm 0,34$ %), *Proteobacteria* ($8,80 \pm 0,74$ %) и *Verrucomicrobia* ($11,22 \pm 0,92$ %), однако в количественном отношении данная добавка изменяла соотношение отдельных бактериальных сообществ. Так, численность представителей филума *Bacteroidetes* была выше на 9,2 %, а *Firmicutes*, *Proteobacteria*, *Verrucomicrobia* – ниже на 4,4 %, 1,0 % и 3,7 % соответственно относительно контрольных значений.

Оценка на уровне семейства показала, что во всех группах доминирующими семействами оказались *Ruminococcaceae*, *Lachnospiraceae*, *Selenomonadaceae*, *Prevotellaceae*, *Lentimicrobiaceae*, *Unclassified "Bacteroidales"*, *Rikenellaceae*, *Succnivibrionaceae*. Разница в численном составе идентичных семейств между группами была следующей: при использовании УДЧ оксида хрома увеличивалось количество представителей *Ruminococcaceae*, *Selenomonadaceae*, *Prevotellaceae*, *Lentimicrobiaceae* на 9,1 %, 9,4 %, 20,8 %, 1,2 % соответственно, уменьшилась численность *Lachnospiraceae*, *Unclassified "Bacteroidales"*, *Rikenellaceae*, *Succnivibrionaceae* на 83,7 %, 0,7 %, 2,4 % и 2,7 % соответственно относительно образцов I группы.

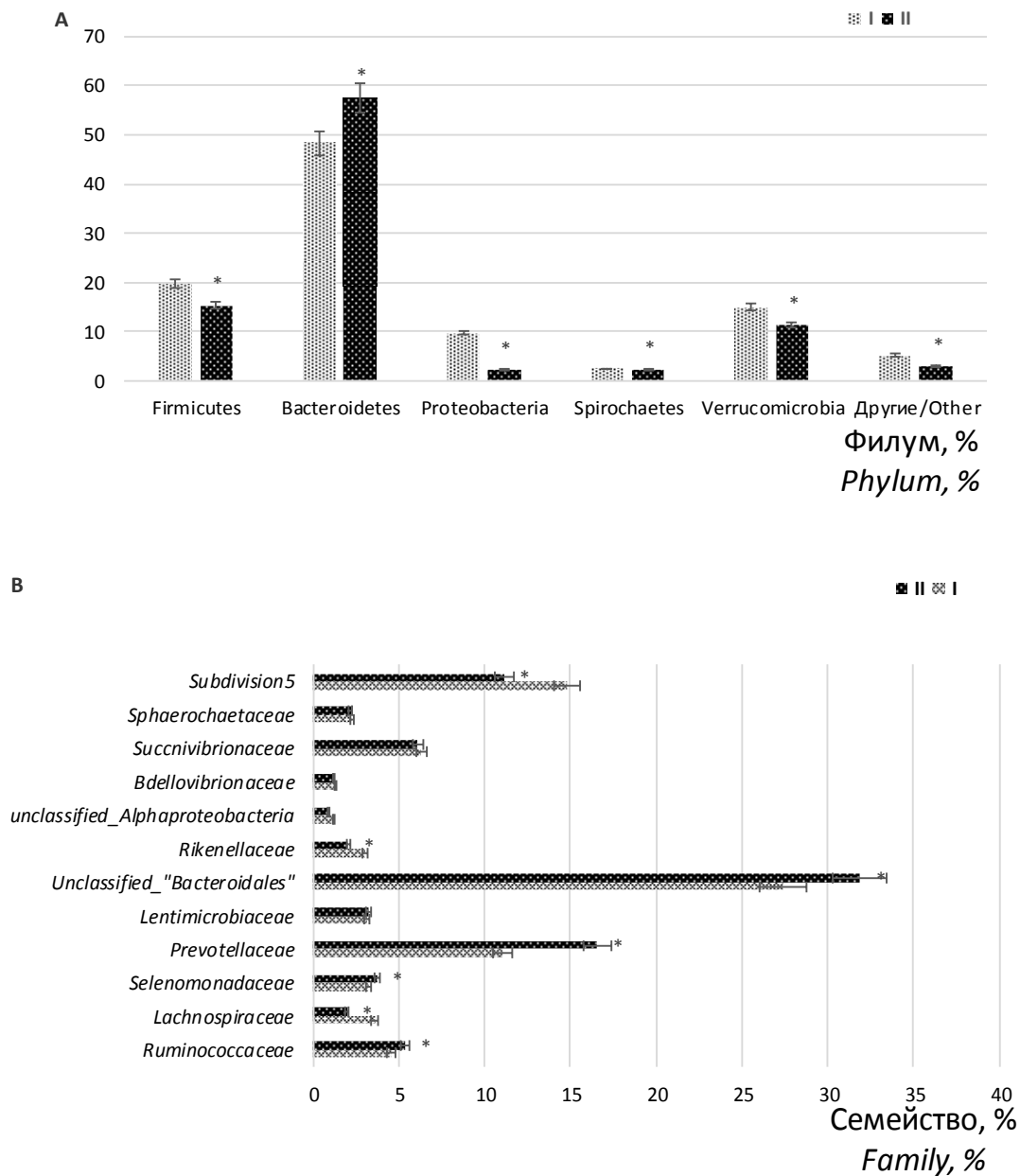


Рис. 4 – Таксономический состав (преобладающие таксоны) микробиома рубцовой жидкости *in vitro*, %: А – на уровне филума; В – на уровне семейства
Figure 4 – Taxonomic composition (predominant taxa) of the microbiome of scar fluid *in vitro*, %: А – at the phylum level; В – at the family level

Нами был проведён корреляционный анализ между видовым составом микробиома рубца и параметрами ферментации в рубце. В I группе были выявлены средние положительные корреляционные связи между концентрацией летучих жирных кислот, в частности валерьяновой кислотой с *Acetatifactor* ($r=0,75$), с *Bacilliculturomica* ($r=0,52$), с *Beduinibacterium* ($r=0,68$) и с *Listeria* ($r=0,63$), между уровнем уксусной кислоты и *Beduinibacterium* ($r=0,78$), уровнем капроновой кислоты и *Acetatifactor* ($r=0,53$) и *Cutibacterium* ($r=0,76$). Высокая связь между концентрацией уксусной кислоты

и *Pleomorphochaeta* ($r=0,88$), уровнем масляной кислоты и *Lachnospiraceae_incertae_sedis* ($r=0,88$). Также выявлена высокая положительная связь между уровнем общего белка в рубцовой жидкости и *Methanobrevibacter* ($r=0,96$), между уровнем белкового азота и *Acetatifactor* ($r=0,68$), *Acinetobacter* ($r=0,72$), *Listeria* ($r=0,85$), *Methanobrevibacter* ($r=0,84$), *unclassified_Ruminococcaceae* ($r=0,74$), между уровнем небелкового азота и *Stomatobaculum* ($r=0,78$), *Bacilliculturomica* ($r=0,55$). Средняя положительная корреляция была выявлена между численностью вида *Bacilliculturomica* ($r=0,70$) и высокая – между *Ruminobacter* ($r=0,86$) и переваримостью сухого вещества рациона.

Во II группе выявлена высокая отрицательная связь между *unclassified_Erysipelotrichaceae* и концентрацией уксусной кислоты ($r=-0,88$), *Fusicatenibacter* и пропионой кислотой ($r=0,82$), *Fournierella* и аммиачным азотом ($r=-0,86$). Положительная средняя корреляция отмечалась между *Olsenella* и уксусной кислотой ($r=0,72$), *Ruminococcus* и пропионовой ($r=0,73$), *Methanomassiliicoccus* и валерьяновой ($r=0,72$), *Fournierella* и капроновой ($r=0,59$), *Olsenella* и общим азотом ($r=0,52$).

Обсуждение полученных результатов.

Хром может присутствовать в рационе животных в виде неорганических соединений или органических комплексов. Встречается преимущественно в двух валентных состояниях: шестивалентном и трёхвалентном. Трёхвалентный хром является более стабильной формой и обладает лучшей всасываемостью в кишечнике (Singh V et al., 2022). Всасывание хрома происходит в тонком кишечнике, однако сорбция у жвачных животных ещё недостаточно изучена. Установлено, что абсорбция хрома в рубце незначительна, и его количество от поступающего с кормом в рубце колеблется от 92 до 99 % (Gaebel G et al., 1987). Предположительно, поглощение хрома происходит в проксимальной части желудка и тощей кишке и в сочетании с хелатными элементами. Chen H с коллегами (2002) также сообщили о небольшом количестве Cr, поглощённом в подвздошной и двенадцатиперстной кишке крыс. Наиболее активное всасывание, возможно, за счёт пассивной диффузии (Maryudi et al., 2021).

Концепция добавления супрафизиологических доз хрома в рационы животных привлекает большое внимание исследователей, поскольку хром играет огромную роль в обменных процессах в организме (Vargas-Rodriguez CF et al., 2014). Влияние Cr на продуктивность жвачных животных достаточно противоречиво. Kegley EB с коллегами (1997) исследовали влияние добавок хрома на производительность бычков и установили повышение среднесуточных приростов. Напротив, Bohrer VM с соавторами (2014) сообщают, что включение хрома не оказало влияние на переваримость корма и показатели роста бычков-финишеров. Bernhard BC с коллегами (2012b) считают, что хром улучшает переваримость корма у крупного рогатого скота на откормочных площадках. Spears JW (2019) оценил влияние Cr на показатели роста у бычков и установил, что данная добавка не повлияла на переваримость и показатели роста. Использование УДЧ Cr_2O_3 способствовало повышению переваримости сухого вещества рациона в системе «искусственный рубец» на 1,9 %, а также увеличение уровня общего и белкового азота, что свидетельствует об увеличении поступления протеина в кишечник бычков и получению больших привесов. В ранних исследованиях отмечено, что включение УДЧ Cr_2O_3 оказывало стимулирующее влияние на экзокринную функцию поджелудочной железы и активность пищеварительных ферментов у крупного рогатого скота (Шейда Е.В. и др., 2020а), а также повышала интенсивность белкового, жирового и углеводного обменов (Шейда Е.В. и др., 2020б).

Таким образом, трудно определить, было ли положительное влияние введения Cr на показатели эффективности обусловлено просто уменьшением дефицита или каким-либо другим фактором, связанным с физиологическим действием хрома. Улучшение массы тела в ответ на введение Cr может способствовать активности рецептора инсулиноподобного фактора роста, который играет ключевую роль в структурной и функциональной гомологии с рецептором инсулина (Lashkari S et al., 2018) и может имитировать действие соматотропного гормона. Однако в нашем исследовании добавление хрома в ультрадисперсной форме стимулировало образование летучих жирных кислот

в рубцовом содержимом, что говорит о повышении активности рубцовой микробиоты. Отмечено, что использование УДЧ Cr_2O_3 не изменяло структуру бактериального сообщества рубца, но снижало обилие метанообразующих видов *Methanobrevibacter*, *Methanobacterium*, *Methanosphaera* и *Methnaomicrobium* (Sheida EV et al., 2022).

Заключение.

Таким образом, отметим, что дополнительное введение УДЧ Cr_2O_3 не изменяло структуру бактериального сообщества, но способствовало увеличению численности представителей филума *Bacteroidetes* на 9,2 %, ответственных за переваривание белковой пищи, а также стимулировало рост представителей семейств *Ruminococcaceae*, *Selenomonadaceae*, *Prevotellaceae*, *Lentimicrobiaceae* на 9,1 %, 9,4 %, 20,8 %, 1,2 %. Выявлена положительная корреляция между видовым составом микроорганизмов *Olsenella* и уксусной кислотой ($r=0,72$) и общим азотом ($r=0,52$), *Ruminococcus* и пропионовой ($r=0,73$), *Methanomassiliicoccus* и валерьяновой ($r=0,72$), *Fournierella* и капроновой ($r=0,59$). Увеличение активности рубцовой микробиоты способствовали усилению переваримости СВ опытных образцов на 1,9 % ($P \leq 0,05$) и процессов ферментации, так, в рубцовом содержимом отмечено увеличение общего уровня ЛЖК на 70,7 % ($P \leq 0,05$) и общего и белкового азота – на 1,9 % и 5,2 %.

Список источников

1. Веселова Т.А., Мальцева А.А., И.М. Швец. Биоэтические проблемы в биологических и экологических исследованиях: учеб.-метод. пособие в электронном виде. Нижний Новгород: Нижегородский гос. ун-т, 2018. 187 с. [Veselova TA, Mal'tseva AA, Shvets IM. Bioeticheskie problemy v biologicheskikh i ekologicheskikh issledovaniyakh: uchebno-metodicheskoe posobie v elektronnom vide. Nizhnii Novgorod: Nizhegorodskii gosuniversitet; 2018:187 p. (In Russ.)].
2. Георгиевский В.И., Анненков Б.Н., Самохин В.Т. Минеральное питание животных. М.: Колос, 1979. 471 с. [Georgievskii VI, Annenkov BN, Samokhin VT. Mineral'noe pitanie zhivotnykh. Moscow: Kolos; 1979:471 p. (In Russ.)].
3. Изменение активности пищеварительных ферментов панкреатического сока под влиянием ультрадисперсных частиц Cr_2O_3 на фоне скармливания белковых рационов при выращивании крупного рогатого скота / Е.В. Шейда, С.В. Лебедев, С.А. Мирошников, В.В. Гречкина, В.А. Рязанов, О.В. Шошина // Животноводство и кормопроизводство. 2020а. Т. 103. № 4. С. 26-36. [Sheida EV, Lebedev SV, Miroshnikov SA, Grechkina VV, Ryazanov VA, Shoshina OV. Changes in the activity of digestive enzymes of pancreatic juice under the influence of ultrafine particles of Cr_2O_3 against the background of feeding with protein diets raising cattle. Animal Husbandry and Fodder Production. 2020a;103(4):26-36. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-103-4-26
4. Кокорев В.А., Гурьянов А.М., Гибалкина Н.И. Обмен хрома в организме молодняка крупного рогатого скота при сенажном типе кормления // Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства: сб. науч. тр. Горки: БГСХА, 2017. Вып. 20. В 2-х ч. Ч. 1. С. 270-283. [Kokorev VA, Gur'yanov AM, Gibalkina NI. Obmen khroma v organizme molodnyaka krupnogo rogatogo skota pri senazhnom tipe kormleniya. Aktual'nye problemy intensivnogo razvitiya zhivotnovodstva: sb. nauch. tr. Gorki: BGSKHA; 2017;20(1):270-283. (In Russ.)].
5. Москалев Ю.И. Минеральный обмен. М.: Медицина, 1985. 288 с. [Moskalev YuI. Mineral'nyi obmen. Moscow: Meditsina; 1985:288 p. (In Russ.)].
6. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных: справ. пособие / под ред. А.П. Калашникова, В.И. Фисинина, В.В. Щеглова, Н.И. Клейменова. 3-е изд., доп. и перераб. М., 2003. 456 с. [Kalashnikov AP, Fisinin VI, Shheglov VV, Klejmenov NI. Normy i raciony kormleniya sel'sko-hozjajstvennyh zhivotnyh: spravochnoe posobie. 3-e izd., dop. i pererab. Moscow; 2003:456 p. (In Russ.)].
7. Оценка влияния ультрадисперсных частиц Cr_2O_3 на метаболические процессы в организме телят, выращиваемых на белковых рационах / Е.В. Шейда, С.В. Лебедев, С.А. Мирошников,

В.В. Гречкина, В.А. Рязанов // Животноводство и кормопроизводство. 2020б. Т. 103. № 4. С. 14-25. [Sheida EV, Lebedev SV, Mirosnikov SA, Grechkina VV, Ryazanov VA. Assessment of influence of ultrafine particles of Cr₂O₃ on metabolic processes in the body of calves raised on protein diets. Animal Husbandry and Fodder Production. 2020b;103(4):14-25. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-103-4-14

8. Сарымсакова Б.Е., Розенсон Р.И., Баттакова Ж.Е. Руководство по этике научных исследований: метод. рекомендации. Астана, 2007. 98 с. [Sarymsakova BE, Rozenson RI, Battakova ZhE. Rukovodstvo po etike nauchnykh issledovaniy: metodicheskie rekomendatsii. Astana; 2007:98 p. (In Russ.)].

9. Шейда Е.В. Изучение влияния различных добавок на ферментативные процессы в рубце и таксономический состав микробиома // Аграрный вестник Урала. 2022. № 03(218). С. 72-82. [Sheida EV. Study of the effect of various additives on enzymatic processes in the rumen and the taxonomic composition of the microbiome. Agrarian Bulletin of the Urals. 2022;03(218):72-82. (In Russ.)]. doi: 10.32417/1997-4868-2022-218-03-72-82

10. Bernhard BC, Burdick NC, Rathmann RJ, Carroll JA, Finck DN, Jennings MA, Young TR, Johnson BJ. Chromium supplementation alters both glucose and lipid metabolism in feedlot cattle during the receiving period. J Anim Sci. 2012a;90(13):4857-4865. <https://doi.org/10.2527/jas.2011-4982>

11. Bernhard BC, Burdick NC, Rounds W, Rathmann RJ, Carroll JA, Finck DN, Jennings MA, Young TR, Johnson BJ. Chromium supplementation alters the performance and health of feedlot cattle during the receiving period and enhances their metabolic response to a lipopolysaccharide challenge. J Anim Sci. 2012b;90(11):3879-3888. <https://doi.org/10.2527/jas.2011-4981>

12. Bohrer BM, Edenburn BM, Boler DD, Dilger AC, Felix TL. Effect of feeding ractopamine hydrochloride (Optaflexx) with or without supplemental zinc and chromium propionate on growth performance, carcass characteristics, and meat quality of finishing steers. J Anim Sci. 2014;92(9):3988-3996. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-7824>

13. Byrne L, Murphy RA. Relative bioavailability of trace minerals in production animal nutrition: a Review. Animals (Basel). 2022;12(15):1981. doi: 10.3390/ani12151981

14. Chen H, Liang P, Hu B, Zhao L, Sun D, Wang X. The application of inductively coupled plasma atomic emission spectrometry/mass spectrometry in the trace elements and speciation analysis of traditional Chinese Medicine. Spectroscopy and Spectral Analysis. 2002;22(6):1019-1024.

15. Gaebel G, Martens H, Suendermann M, Galfi P. The effect of diet, intraruminal pH and osmolarity on sodium, chloride and magnesium absorption from the temporarily isolated and washed reticulorumen of sheep. Q J Exp Physiol. 1987;72(4):501-511. doi: 10.1113/expphysiol.1987.sp003092

16. Giri AK, Sahu NP, Dash G. Improvement in the growth status and carbohydrate utilization of *Labeo rohita* (Hamilton, 1822) fingerlings with dietary supplementation of chromium picolinate. Fish Physiol Biochem. 2021;47(2):599-616. doi: 10.1007/s10695-021-00934-9

17. Jeejebhoy KN, Chu RC, Marliss EB, Greenberg GR, Bruce-Robertson A. Chromium deficiency, glucose intolerance and neuropathy reversed by chromium supplementation in a patient receiving long-term total parenteral nutrition. Am J Clinical Nutrition. 1977;30(4):531-538. <https://doi.org/10.1093/ajcn/30.4.531>

18. Kafilzadeh F, Karami Shabankareh H, Targhibi MR. Effect of chromium supplementation on productive and reproductive performances and some metabolic parameters in late gestation and early lactation of dairy cows. Biol Trace Elem Res. 2012;149:42-49. <https://doi.org/10.1007/s12011-012-9390-0>

19. Kegley EB, Spears JW, Brown TT. Effect of shipping and chromium supplementation on performance, immune response, and disease resistance of steers. J Anim Sci. 1997;75(7):1956-1964. <https://doi.org/10.2527/1997.7571956x>

20. Lalhriatpuii M, Chatterjee A, Das AK, Satapathy D, Dutta TK, Patra AK. Influence of dietary supplementation of inorganic and organic chromium on body conformation, carcass traits, and nutrient composition in muscle and internal organs of black bengal goats. Biol Trace Elem Res. 2023;13 p. doi: 10.1007/s12011-023-03811-z

21. Lashkari S, Habibian M, Jensen SK. A review on the role of chromium supplementation in ruminant nutrition – effects on productive performance, blood metabolites, antioxidant status, and immunocompetence. *Biol Trace Elem Res.* 2018; 186(2):305-321. <https://doi.org/10.1007/s12011-018-1310-5>
22. Maryudi, Rahayu A, Syaqui R, Islami MK. Teknologi pengolahan kandungan kromium dalam limbah penyamakan kulit menggunakan proses adsorpsi: Review. *Jurnal Teknik Kimia dan Lingkungan.* 2021;5(1):90-99. doi: 10.33795/jtkl.v5i1.207
23. NRC, 2005. Mineral Tolerance of Animals: second revised edition. National Research Council of the National Academies, Washington DC: The National Academies Press; 2005:510 p. <https://doi.org/10.17226/11309>
24. Pechova A, Pavlata L. Chromium as an essential nutrient: a review. *Vet Med* 2007;52(1):1-18. doi: 10.17221/2010-VETMED
25. Schwarz K, Mertz W. Chromium (III) and glucose tolerance factor. *Arch Biochem Biophys.* 1959;85(1):292-295. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(59\)90479-5](https://doi.org/10.1016/0003-9861(59)90479-5)
26. Sheida EV, Miroshnikov SA, Duskaev GK, Atlanderova KN, Grechkina VV. Strategies for reducing ruminant methane emissions. *BIO Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference “Sustainable Development of Traditional and Organic Agriculture in the Concept of Green Economy” (SDGE 2021).* 2022;42:01014. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20224201014>
27. Singh V, Singh N, Verma M, Kamal R, Tiwari R, Sanjay Chivate M, Rai SN, Kumar A, Singh A, Singh MP, Vamanu E, Mishra V. Hexavalent-chromium-induced oxidative stress and the protective role of antioxidants against cellular toxicity. *Antioxidants (Basel).* 2022;11(12):2375. doi: 10.3390/antiox11122375
28. Spears JW. Boron, chromium, manganese, and nickel in agricultural animal production. *Biological Trace Element Research.* 2019;188(1):35-44. doi: 10.1007/s12011-018-1529-1
29. Trojan SJ, Hergenreder JE, Canterbury LG, Leonhard JT, Clark WD, Beckett JL, Long JM. The effects of chromium propionate supplementation to yearling steers in a commercial feedyard on growth performance, carcass characteristics, and health. *Transl Anim Sci.* 2023;7(1):txad078. doi: 10.1093/tas/txad078
30. Vargas-Rodriguez CF, Yuan K, Titgemeyer EC, Mamedova LK, Griswold KE, Bradford BJ. Effects of supplemental chromium propionate and rumen-protected amino acids on productivity, diet digestibility, and energy balance of peak-lactation dairy cattle. *J Dairy Sci.* 2014;97(6):3815-3821. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7767>

References

1. Veselova TA, Maltseva AA, Shvets IM. Bioethical problems in biological and ecological research: an educational and methodological manual in electronic form. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University; 2018:187 p.
2. Georgievsky VI, Annenkov BN, Samokhin VT. Mineral nutrition of animals. Moscow: Kolos; 1979:471 p.
3. Sheida EV, Lebedev SV, Miroshnikov SA, Grechkina VV, Ryazanov VA, Shoshina OV. Changes in the activity of digestive enzymes of pancreatic juice under the influence of ultrafine particles of Cr₂O₃ against the background of feeding with protein diets raising cattle. *Animal Husbandry and Fodder Production.* 2020a;103(4):26-36. *(In Russ.)*. doi: 10.33284/2658-3135-103-4-26
4. Kokorev V.A., Guryanov A.M., Gibalkina N.I. The exchange of chromium in the body of young cattle with haylage type of feeding. *Actual problems of intensive development of animal husbandry: Collection of scientific works.* Gorki: BSHA; 2017;20(1):270-283.
5. Moskalev YuI. Mineral exchange. Moscow: Medicine; 1985:288 p.
6. Kalashnikov AP, Fisinin VI, Shcheglov VV, Kleymenov NI. Norms and diets for feeding farm animals: Ref. book. 3rd ed., add. and reworked. Moscow; 2003:456 p.
7. Sheida EV, Lebedev SV, Miroshnikov SA, Grechkina VV, Ryazanov VA. Assessment of influence of ultrafine particles of Cr₂O₃ on metabolic processes in the body of calves raised on protein diets. *Animal Husbandry and Fodder Production.* 2020b;103(4):14-25. doi: 10.33284/2658-3135-103-4-14

8. Sarymsakova BE, Rozenson RI, Battakova JE. Guidelines for the ethics of scientific research: methodological recommendations. Astana; 2007:98 p.
9. Sheida EV. Study of the effect of various additives on enzymatic processes in the rumen and the taxonomic composition of the microbiome. Agrarian Bulletin of the Urals. 2022;03(218):72-82. doi: 10.32417/1997-4868-2022-218-03-72-82
10. Bernhard BC, Burdick NC, Rathmann RJ, Carroll JA, Finck DN, Jennings MA, Young TR, Johnson BJ. Chromium supplementation alters both glucose and lipid metabolism in feedlot cattle during the receiving period. J Anim Sci. 2012a;90(13):4857-4865. <https://doi.org/10.2527/jas.2011-4982>
11. Bernhard BC, Burdick NC, Rounds W, Rathmann RJ, Carroll JA, Finck DN, Jennings MA, Young TR, Johnson BJ. Chromium supplementation alters the performance and health of feedlot cattle during the receiving period and enhances their metabolic response to a lipopolysaccharide challenge. J Anim Sci. 2012b;90(11):3879-3888. <https://doi.org/10.2527/jas.2011-4981>
12. Bohrer BM, Edenburn BM, Boler DD, Dilger AC, Felix TL. Effect of feeding ractopamine hydrochloride (Optaflexx) with or without supplemental zinc and chromium propionate on growth performance, carcass characteristics, and meat quality of finishing steers. J Anim Sci. 2014;92(9):3988-3996. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-7824>
13. Byrne L, Murphy RA. Relative bioavailability of trace minerals in production animal nutrition: a Review. Animals (Basel). 2022;12(15):1981. doi: 10.3390/ani12151981
14. Chen H, Liang P, Hu B, Zhao L, Sun D, Wang X. The application of inductively coupled plasma atomic emission spectrometry/mass spectrometry in the trace elements and speciation analysis of traditional Chinese Medicine. Spectroscopy and Spectral Analysis. 2002;22(6):1019-1024.
15. Gaebel G, Martens H, Suendermann M, Galfi P. The effect of diet, intraruminal pH and osmolarity on sodium, chloride and magnesium absorption from the temporarily isolated and washed reticulo-rumen of sheep. Q J Exp Physiol. 1987;72(4):501-511. doi: 10.1113/expphysiol.1987.sp003092
16. Giri AK, Sahu NP, Dash G. Improvement in the growth status and carbohydrate utilization of *Labeo rohita* (Hamilton, 1822) fingerlings with dietary supplementation of chromium picolinate. Fish Physiol Biochem. 2021;47(2):599-616. doi: 10.1007/s10695-021-00934-9
17. Jeejebhoy KN, Chu RC, Marliss EB, Greenberg GR, Bruce-Robertson A. Chromium deficiency, glucose intolerance and neuropathy reversed by chromium supplementation in a patient receiving long-term total parenteral nutrition. Am J Clinical Nutrition. 1977;30(4):531-538. <https://doi.org/10.1093/ajcn/30.4.531>
18. Kafilzadeh F, Karami Shabankareh H, Targhibi MR. Effect of chromium supplementation on productive and reproductive performances and some metabolic parameters in late gestation and early lactation of dairy cows. Biol Trace Elem Res. 2012;149:42-49. <https://doi.org/10.1007/s12011-012-9390-0>
19. Kegley EB, Spears JW, Brown TT. Effect of shipping and chromium supplementation on performance, immune response, and disease resistance of steers. J Anim Sci. 1997;75(7):1956-1964. <https://doi.org/10.2527/1997.7571956x>
20. Lalhriatpuii M, Chatterjee A, Das AK, Satapathy D, Dutta TK, Patra AK. Influence of dietary supplementation of inorganic and organic chromium on body conformation, carcass traits, and nutrient composition in muscle and internal organs of black bengal goats. Biol Trace Elem Res. 2023;13 p. doi: 10.1007/s12011-023-03811-z
21. Lashkari S, Habibian M, Jensen SK. A review on the role of chromium supplementation in ruminant nutrition—effects on productive performance, blood metabolites, antioxidant status, and immunocompetence. Biol Trace Elem Res. 2018; 186(2):305-321. <https://doi.org/10.1007/s12011-018-1310-5>
22. Maryudi, Rahayu A, Syauqi R, Islami MK. Teknologi pengolahan kandungan kromium dalam limbah penyamakan kulit menggunakan proses adsorpsi: Review. Jurnal Teknik Kimia dan Lingkungan. 2021;5(1):90-99. doi: 10.33795/jtkl.v5i1.207
23. NRC, 2005. Mineral Tolerance of Animals: second revised edition. National Research Council of the National Academies, Washington DC: The National Academies Press; 2005:510 p. <https://doi.org/10.17226/11309>
24. Pechova A, Pavlata L. Chromium as an essential nutrient: a review. Vet Med 2007;52(1):1-18. doi: 10.17221/2010-VETMED
25. Schwarz K, Mertz W. Chromium (III) and glucose tolerance factor. Arch Biochem Biophysics. 1959;85(1):292-295. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(59\)90479-5](https://doi.org/10.1016/0003-9861(59)90479-5)

26. Sheida EV, Miroshnikov SA, Duskaev GK, Atlanderova KN, Grechkina VV. Strategies for reducing ruminant methane emissions. BIO Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference “Sustainable Development of Traditional and Organic Agriculture in the Concept of Green Economy” (SDGE 2021). 2022;42:01014. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20224201014>
27. Singh V, Singh N, Verma M, Kamal R, Tiwari R, Sanjay Chivate M, Rai SN, Kumar A, Singh A, Singh MP, Vamanu E, Mishra V. Hexavalent-chromium-induced oxidative stress and the protective role of antioxidants against cellular toxicity. *Antioxidants (Basel)*. 2022;11(12):2375. doi: 10.3390/antiox11122375
28. Spears JW. Boron, chromium, manganese, and nickel in agricultural animal production. *Biological Trace Element Research*. 2019;188(1):35-44. doi: 10.1007/s12011-018-1529-1
29. Trojan SJ, Hergenreder JE, Canterbury LG, Leonhard JT, Clark WD, Beckett JL, Long JM. The effects of chromium propionate supplementation to yearling steers in a commercial feedyard on growth performance, carcass characteristics, and health. *Transl Anim Sci*. 2023;7(1):txad078. doi: 10.1093/tas/txad078
30. Vargas-Rodriguez CF, Yuan K, Titgemeyer EC, Mamedova LK, Griswold KE, Bradford BJ. Effects of supplemental chromium propionate and rumen-protected amino acids on productivity, diet digestibility, and energy balance of peak-lactation dairy cattle. *J Dairy Sci*. 2014;97(6):3815-3821. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7767>

Информация об авторах:

Елена Владимировна Шейда, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории биологических испытаний и экспертиз, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29; старший научный сотрудник института биоэлементологии, Оренбургский государственный университет, 460018, пр. Победы, 13, г. Оренбург, тел.: 8-922-862-64-02.

Святослав Валерьевич Лебедев, доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории биологических испытаний и экспертиз, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8(3532)30-81-70.

Information about the authors:

Elena V Sheida, Cand. Sci. (Biology), Researcher at the Laboratory of Biological Tests and Examinations, Federal Research Centre for Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 460000, Orenburg, January 9, 29; Senior Researcher at the Institute of Bioelementology, Orenburg State University, pr. Pobedy, 13, Orenburg, 460018, tel: 8-922-862-64-02.

Svyatoslav V Lebedev, Dr. Sci. (Biology), Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Leading Researcher, Biological Tests and Examinations, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences; 29, 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000, tel.: 8(3532)30-81-70.

Статья поступила в редакцию 22.08.2023; одобрена после рецензирования 28.08.2023; принята к публикации 11.09.2023.

The article was submitted 22.08.2023; approved after reviewing 28.08.2023; accepted for publication 11.09.2023.