

Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 266-282.  
Animal Husbandry and Fodder Production. 2024. Vol. 107, no 4. P. 266-282.

Научная статья  
УДК 636.22/.28:577.17:637.11  
doi:10.33284/2658-3135-107-4-266

**Таксономическое разнообразие микробиоты толстого кишечника коров при различном уровне эссенциальных элементов в организме животных**

Елена Владимировна Яушева<sup>1</sup>, Елена Анатольевна Сизова<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия

<sup>1</sup>vasilena56@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1589-2211>

<sup>2</sup>Sizova.L78@yandex.ru, [orcid.org/0000-0002-5125-5981](https://orcid.org/0000-0002-5125-5981)

**Аннотация.** Микроэлементы, такие как железо, марганец, медь, кобальт, селен и цинк являются жизненно необходимыми и играют важную роль в росте и формировании продуктивности сельскохозяйственных животных. Избыток или дефицит эссенциальных элементов приводит к отклонениям в развитии животных и общему ухудшению здоровья и метаболических процессов. Микробиом желудочно-кишечного тракта жвачных животных как участник широкого перечня метаболических процессов отзывается своей реорганизацией на изменения в минеральном обмене. Целью работы являлось исследование взаимосвязи между элементным составом волоса, молока и состоянием микробиома толстого кишечника. По элементному составу волоса животные были разделены на 2 группы (n=15): I группа (контроль) – уровень микроэлементов (Cu, Zn, Co, Se, Mn, Fe) в пределах референтных значений, II группа – уровень микроэлементов ниже или находится в пределах нижней границы референтных значений. Уровень Se, Cu, Co, Zn, Fe и Mn был достоверно (P≤0,05) ниже на 21,4; 20; 30,1; 17,9; 40,3 и 30,2 % у животных II группы относительно I. Также в волосе коров II группы было отмечено более низкое содержание кальция (-7,3 %, P≤0,05) и хрома (-5,67 %, P≤0,05) и более высокая концентрация кремния (+36,4 %, P≤0,05), ртути (+6,73 %, P≤0,05) и никеля (+11,6 %, P≤0,05) в сравнении с группой I. Аналогично в молоке от II животных группы содержание меди (-23,3 %, P≤0,05), кальция (-3,19 %, P≤0,05) и селена (-7,96 %, P≤0,05) было ниже чем в I. Микробиом толстого кишечника коров II группы в сравнении с I характеризовался меньшим биоразнообразием. В таксономическом составе микробиоты кишечника коров II группы отмечалась более низкая относительная численность бактерий таксонов *Lachnospiraceae*, *Alistipes*, *Prevotella*, являющихся активными продуцентами короткоцепочечных жирных кислот. Полученные данные показывают важность изучения микробиоты ЖКТ на фоне дисбаланса микроэлементов в организме животных и перспективы управления метаболическими процессами в кишечнике путём коррекции элементозов.

**Ключевые слова:** крупный рогатый скот, микробиота, элементный состав молока, микроэлементы, макроэлементы

**Благодарности:** работа выполнена в соответствии с планом НИР на 2022-2024 гг. ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (№ FNWZ-2022-0011).

**Для цитирования:** Яушева Е.В., Сизова Е.А. Таксономическое разнообразие микробиоты толстого кишечника коров при различном уровне эссенциальных элементов в организме животных // Животноводство и кормопроизводство. 2024. Т. 107, № 4. С. 266-282. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-266>

Original article

**Taxonomic diversity of the large intestine microbiota of cows with different levels of essential elements in the body**Elena V Yausheva<sup>1</sup>, Elena A Sizova<sup>2</sup><sup>1,2</sup>Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia<sup>1</sup>vasilena56@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1589-2211><sup>2</sup>Sizova.L78@yandex.ru, [orcid.org/0000-0002-5125-5981](https://orcid.org/0000-0002-5125-5981)

**Abstract.** Microelements such as iron, manganese, copper, cobalt, selenium and zinc are vital and play an important role in the growth and productivity of farm animals. Excess or deficiency of essential elements leads to deviations in the development of animals and a general deterioration in health and metabolic processes. The microbiome of the gastrointestinal tract of ruminants is a participant in many metabolic processes in the body and will also respond to changes in mineral metabolism. The aim of the work was to study the relationship between the elemental composition of hair, milk and the state of the colon microbiome. According to the elemental composition of hair, the animals were divided into 2 groups (n = 15): Group I (control) - the level of microelements (Cu, Zn, Co, Se, Mn, Fe) within the reference values, Group II - the level of microelements is below or within the lower limit of the reference values. The level of Se, Cu, Co, Zn, Fe and Mn was significantly ( $P \leq 0.05$ ) lower by 21.4; 20; 30.1; 17.9; 40.3 and 30.2% in animals of group II relative to I. Also, in the hair of cows of group II, a lower content of calcium (-7.3%,  $P \leq 0.05$ ) and chromium (-5.67%,  $P \leq 0.05$ ) and a higher concentration of silicon (+36.4%,  $P \leq 0.05$ ), mercury (+6.73%,  $P \leq 0.05$ ) and nickel (+11.6%,  $P \leq 0.05$ ) were noted in comparison with group I. Similarly, in milk from animals of group II, the content of copper (-23.3%,  $P \leq 0.05$ ), calcium (-3.19%,  $P \leq 0.05$ ) and selenium (-7.96%,  $P \leq 0.05$ ) was lower than in I. The microbiome of the large intestine of cows of group II in comparison with I was characterized by lower biodiversity. In the taxonomic composition of the intestinal microbiota of cows of group II, a lower relative abundance of bacteria of the taxa Lachnospiraceae, Alistipes, Prevotella, which are active producers of short-chain fatty acids, was noted. The obtained data show the importance of studying the myrobiota of the gastrointestinal tract against the background of an imbalance of trace elements in the animal body and the prospects for managing metabolic processes in the intestine by correcting elementoses.

**Keywords:** cattle, microbiota, elemental composition of milk, microelements, macroelements

**Acknowledgments:** the work was performed in accordance to the plan of research works for 2022-2024 FSBRI FRC BST RAS (No FNWZ-2022-0011).

**For citation:** Yausheva EV, Sizova EA. Taxonomic diversity of the large intestine microbiota of cows with different levels of essential elements in the body. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2024;107(4):266-282. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-107-4-266>

**Введение.**

Минеральный обмен в организме крупного рогатого скота оказывает существенное влияние на реализацию генетического потенциала животных и увеличение объёмов производства молочной продукции (Wagner JJ et al., 2023). Обеспеченность микроэлементами – один из лимитирующих факторов, определяющий продуктивность коров (Гойлян Д. и др., 2022; de Sousa Ferreira JM et al., 2023). Эффективность минерального обмена в организме животных оказывает значительное влияние на качество получаемой сельскохозяйственной продукции (Воронина О.А. и др., 2022; van der Reijden et al., 2019).

Микроэлементы в организме животных влияют на работу ферментов, синтез витаминов, обеспечивают правильную работу системы кроветворения, иммунной и эндокринной систем (Lynch RJM and Duckworth RM, 2020; Weiss WP, 2017; Khan MZ, 2022). Нарушения в минеральном

обмене, вызванные избытком или недостатком микроэлементов, в организме коров приводят к отклонениям в работе отдельных систем, развитию патологий и заболеваний у сельскохозяйственных животных (Эленшлегер А.А. и Афанасьев К.А., 2017; Kalaeva E et al., 2020). При составлении рационов для крупного рогатого скота особое внимание уделяют содержанию таких микроэлементов, как железо, медь, цинк, марганец, йод, кобальт и селен (Калашников А.П. и др., 2003; Séboussi R et al., 2016). Данные микроэлементы оказывают значительное влияние на здоровье дойных коров, продуктивность и воспроизводительные функции (Grešáková et al., 2021; Anchordoquy JM et al., 2019).

Поступление необходимых микроэлементов в организм сельскохозяйственных животных обуславливается составом рациона, тогда как их усвоение или выведение из организма связано с работой желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) и его здоровьем (Plaizier JC et al., 2018). Одним из ключевых факторов, определяющих эффективность расщепления и усвоения компонентов корма является микробиом ЖКТ.

Микробиом ЖКТ жвачных животных является сложной системой, которая определяет эффективность процесса пищеварения и участвует в поддержании иммунного гомеостаза кишечника. Процессы переваривания питательных веществ в ЖКТ жвачных животных имеют основополагающее значение для продуктивности и здоровья животных (Zhang L et al., 2023).

Наряду с рубцом и тонким кишечником выделяют важную роль пищеварительных процессов, протекающих в толстом отделе кишечника. Микробиом толстого кишечника жвачных животных осуществляет расщепления питательных компонентов корма, не переваренных в рубце, и синтез ферментов, короткоцепочечных жирных кислот, метаболизм аминокислот и вторичных метаболитов (Virgínio Júnior GF and Bittar CMM, 2021). Микробные процессы, протекающие в толстом кишечнике, являются важным источником энергии для всех остальных метаболических процессов и опосредованно влияют на все этапы переваривания и усвоения компонентов корма (Teseo S et al., 2022; Wang L et al., 2023). В ряде исследований описана взаимосвязь между микробиотой кишечника и продуктивностью жвачных животных (Prasetiyono BWNE et al., 2022; Liu L et al., 2023). Отмечается взаимосвязь между обилием ряда таксонов в фекальной микробиоте, маркерами воспаления в сыворотке крови и изменениями в продуктивности животных (Loch M et al., 2024). Однако закономерности изменения таксономического состава микробиома ЖКТ на фоне дефицита или избытка микроэлементов в организме животных является не достаточным.

#### **Цель исследования.**

Исследование взаимосвязи между элементным составом волоса животных, молока и состоянием микробиома толстого кишечника.

#### **Материалы и методы исследования.**

**Объект исследования.** Коровы чёрно-пёстрой породы возрастом 4-5 лет.

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями нормативных актов: Модельный закон Межпарламентской Ассамблеи государств-участников Содружества Независимых Государств "Об обращении с животными", ст. 20 (постановление МА государств-участников СНГ № 29-17 от 31.10.2007 г.), протоколы Женевской конвенции и принципы надлежащей лабораторной практики (Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53434-2009), Руководство по работе с лабораторными животными ([http://fncbst.ru/?page\\_id=3553](http://fncbst.ru/?page_id=3553)). При проведении исследований были предприняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов. Протокол настоящего исследования одобрен комитетом по Биоэтике ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (протокол № 1 от 17.01.2024).

**Схема эксперимента.** Исследование было выполнено на коровах чёрно-пёстрой породы (ЗАО «Калинина», Ташлинский район). В эксперименте использованы животные (n=60), подобранные методом пар-аналогов по возрасту (4-5 лет), живой массе (600-650 кг), месяцу лактации (50-60 суток после отёла) и находящиеся в одинаковых условиях содержания. Коровы были клинически здоровы и находились на пастбищном содержании. Рацион составлен согласно рекомендациям по кормлению для дойных коров и представлен в таблице 1 (Калашников А.П. и др., 2003). На основании сравнения данных элементного состава волоса коров с физиологическими нормами

животные были разделены на 2 группы (n=15): I группа (контроль) – уровень микроэлементов (Cu, Zn, Co, Se, Mn, Fe) в пределах физиологической нормы, II группа – уровень микроэлементов ниже физиологической нормы или находится в пределах нижней границы. За физиологическую норму были приняты референтные интервалы по содержанию элементов в волосе коров молочной направленности (Мирошников С.А. и др., 2019б). Отбор проб волоса проводился в верхней части холки (0,4 г) (Мирошников С.А. и др., 2019а).

Исследование таксономического состава микробиома у животных I и II групп (n=5) проводилось в толстом кишечнике. Содержимое толстого кишечника отбирали с использованием стерильного инструмента в пробирки с раствором консерванта (DNA/RNA Shield, США), после чего замораживали при температуре -60 °С.

Таблица 1. Состав рациона  
Table 1. Composition of the diet

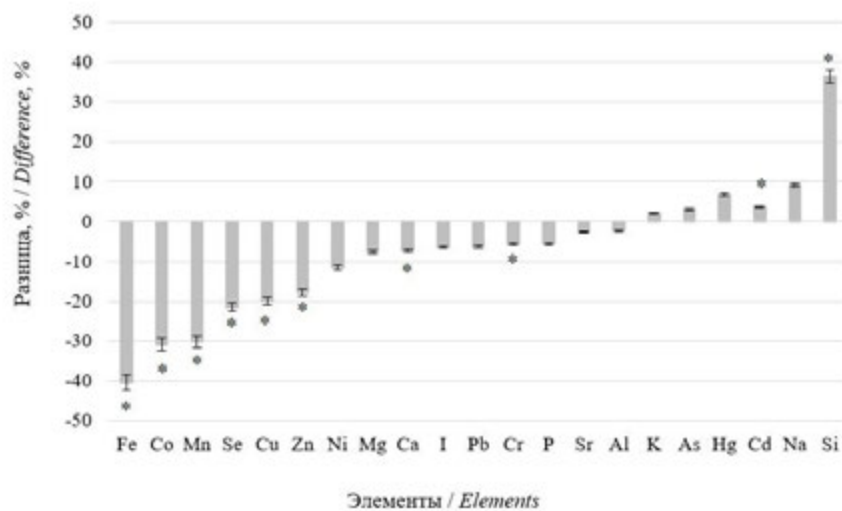
Корма / diets	Количество на голову в сутки / Quantity per head per day
Трава пастбищ, кг / Pasture grass, kg	50,0
Сено, кг/ Hay, kg	1,5
Комбикорм, кг / Compound feed, kg	6,0
Ячмень плющ.,экструд., кг / Barley ivy, extruded, kg	1,0
Патока, кг / Molasses, kg	0,75
Соль поваренная, г / Table salt, g	75,0
Ca, г / Ca, g	52,3
P, г / P, g	30,1
Mg, г / Mg, g	21,6
K, г / K, g	61,2
Co, г / Co, g	4,98
Cu, г / Cu, g	68,4
Fe, г / Fe, g	580,9
I, г / I, g	2,71
Mn, г / Mn, g	429,0
Zn, г / Zn, g	385,6
S, г / S, g	26,2

**Оборудование и технические средства.** Элементный анализ волоса и молока животных проводился в ЦКП БСТ РАН <http://цкп-бст.рф> на одноквадрупольном масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Agilent 7900 ICP-MS (Agilent, США). Исследование микробиома толстого кишечника проводилось с помощью NGS-секвенирования на платформе MiSeq (Illumina, США) в Центре коллективного пользования научным оборудованием «Персистенция микроорганизмов» Института клеточного и внутриклеточного симбиоза УрО РАН (Оренбург, Россия).

**Статистический анализ.** Статистический анализ проводили с помощью офисного программного комплекса Microsoft Office с применением программы «Excel» («Microsoft», США) с обработкой данных в «Statistica 10.0» («StatSoft Inc.», США). Достоверными считали результаты при  $P \leq 0,05$  (U-критерий Манна-Уитни). Анализ бактериальных сообществ микробиома толстого кишечника включал расчёт альфа-разнообразия (индекс Chao1, индекс разнообразия Шенона (Shannon), индекс разнообразия Симпсона (Simpson), статистический метод: Mann-Whitney) и бета-разнообразия (метод ординации: NMDS; дистанционный метод: индекс Брея-Кертиса; статистический метод: PERMANOVA).

**Результаты исследований.**

Анализ элементного состава волоса коров позволил выявить группу животных из общей выборки с более низким содержанием селена, меди, кобальта и марганца в сравнении с физиологическими нормами. Во II группе в сравнении с I уровень селена, меди, кобальта, цинка, железа и марганца был достоверно ( $P \leq 0,05$ ) ниже на 21,4; 20; 30,1; 17,9; 40,3 и 30,2 % (рис. 1). Также в волосах коров II группы было отмечено более низкое содержание кальция (-7,3 %,  $P \leq 0,05$ ) и хрома (-5,67 %,  $P \leq 0,05$ ) и более высокая концентрация кремния (+36,4 %,  $P \leq 0,05$ ). Оценка содержания токсичных элементов в волосах коров группы II показала более высокие концентрации ртути (+6,73 %,  $P \leq 0,05$ ) в сравнении с группой I.

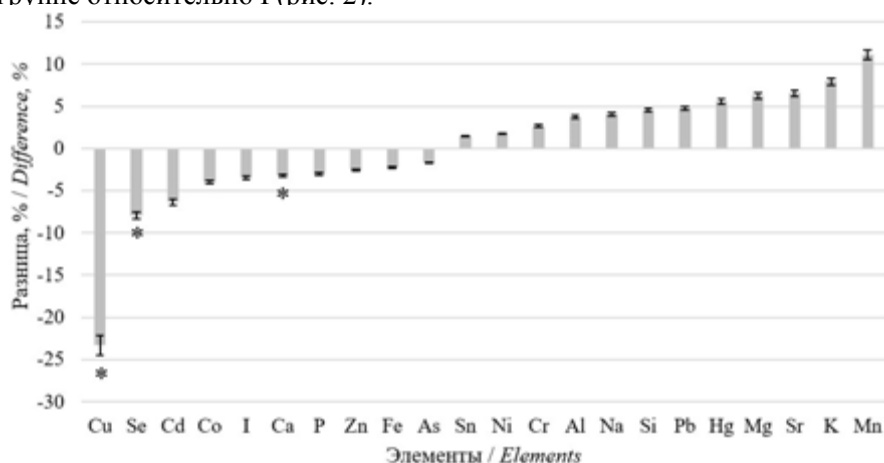


Примечание: \* –  $P \leq 0,05$  / Note: \* –  $P \leq 0.05$

Рисунок 1. Разница по величине концентраций химических элементов в волосе коров II группы в сравнении с I

Figure 1. Difference in concentrations of chemical elements in the hair of cows of group II in comparison with group I

Сравнение элементного состава молока исследуемых животных показало аналогичные изменения только по содержанию меди (-23,3 %,  $p \leq 0,05$ ), кальция (-3,19 %,  $p \leq 0,05$ ) и селена (-7,96 %,  $p \leq 0,05$ ) во II группе относительно I (рис. 2).



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

Рисунок 2. Разница по величине концентраций химических элементов в молоке коров II группы в сравнении с I

Figure 2. The difference in the concentration of chemical elements in the milk of cows of group II compared to group I

Корреляционный анализ (по Спирмену) по элементному составу молока и волоса животных II группы был проведён для элементов с достоверными различиями между группами (табл. 3). Выявлена сильная положительная корреляционная связь для концентраций селена в волосе и этого же элемента – в молоке. Аналогично сильная положительная корреляция была отмечена для концентраций кальция в молоке и волосе животных.

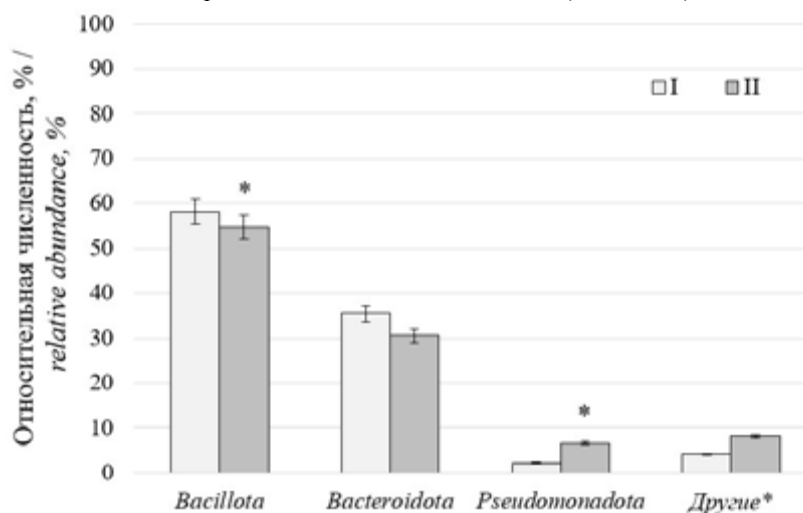
Таблица 3. Коэффициенты корреляции (по Спирмену) между содержанием химических элементов металлов в волосе и молоке коров II группы  
Table 3. Correlation coefficients (according to Spearman) between the content of chemical elements of metals in hair and milk of cows of group II

Элементы молока / Elements of milk	Элементы волос / Hair Elements								
	Fe	Zn	Mn	Co	Cu	Se	Ca	Cr	Hg
Cu	0,43	0,18	-0,01	0,12	-0,21	-0,15	0,17	0,31	0,58
Se	-0,37	0,14	0,35	0,17	0,38	0,66*	0,52	0,18	-0,44
Ca	0,39	0,24	0,55	0,08	0,05	-0,17	0,76*	0,26	0,33

Примечание: \* – значимые корреляции на уровне  $P \leq 0,05$

Note: \* – significant correlations at the level of  $P \leq 0.05$

Исследование бактериального состава микробиома толстого кишечника коров исследуемых групп показало, что основная доля идентифицированных бактерий относится к филумам *Bacteroidota* (30,6-35,5 %) и *Bacillota* (54,7-58,2 %) (рис. 3). Минорной группой в микробиоме толстого кишечника являлись бактерии таксона *Pseudomonadota* (2,2-6,6 %) в обеих опытных группах.



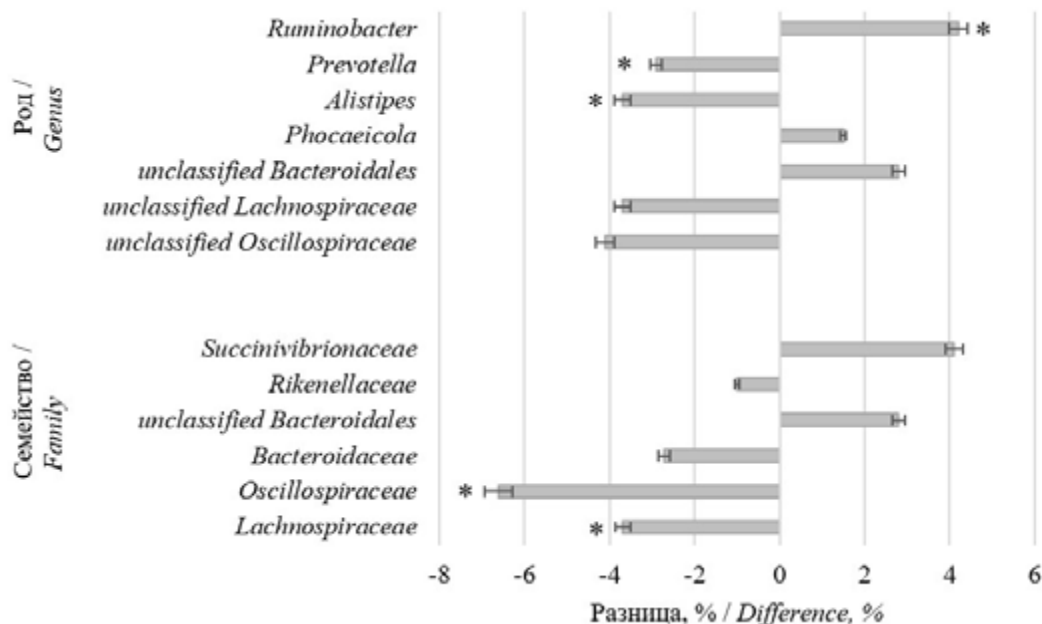
Примечание: \* –  $P \leq 0,05$ /Note: \* –  $P \leq 0.05$

Рисунок 3. Обилие таксономических групп (на уровне филума) в микробиоме толстого кишечника коров I и II

Figure 3. Abundance of taxonomic groups (at the phylum level) in the colon microbiome of cows I and II

Значимые различия между таксономическими составами микробиомов толстого кишечника при сравнении II группы с I были отмечены на уровне семейств и родов (рис. 4). Во II группе в сравнении с I была выявлена более низкая доля бактерий семейств *Lachnospiraceae* (-3,68 %,

$P \leq 0,05$ ) и *Oscillospiraceae* (-6,6 %,  $P \leq 0,05$ ), р. *Alistipes* (-3,51 %,  $P \leq 0,05$ ) и р. *Prevotella* (-2,9 %,  $P \leq 0,05$ ). Также отмечено в микробиоме кишечника II группы, при сравнении с I, более низкая относительная численность *unclassified Oscillospiraceae* (-4,1 %,  $P \leq 0,05$ ) и *unclassified Lachnospiraceae* (-3,69 %,  $P \leq 0,05$ ). Наоборот, доля микроорганизмов *Succinivibrionaceae* (р. *Ruminobacter*) в микробиоме толстого кишечника коров II группы была выше чем в I группе на 4,2 % ( $P \leq 0,05$ ).



Примечание: \* –  $P \leq 0,05$

Note: \* –  $P \leq 0.05$

Рисунок 4. Различия в обилии таксономических групп (на уровне семейств и рода) в микробиоме толстого кишечника коров II группы в сравнении с I

Figure 4. Differences in the abundance of taxonomic groups (at the family and genus level) in the large intestine microbiome of cows of group II compared to group I

Расчёт индексов альфа-разнообразия для микробиоты толстого кишечника показал более низкие значения во II группе в сравнении с I, что свидетельствовало о снижении таксономического разнообразия и видового богатства в микробиоме (табл. 4).

Таблица 4. Индексы альфа-разнообразия микробиоты толстого кишечника коров I и II групп  
Table 4. Alpha diversity indices of the large intestine microbiota of cows of groups I and II

Группа / Group	Индекс альфа-разнообразия / Alpha diversity index		
	Chao 1	Shannon	Simpson
I	298,4±1,87	2,66±0,03	0,92±0,005
II	273,2±1,55***	2,32±0,04***	0,77±0,008**

Примечание: \*\* –  $P \leq 0,01$ ; \*\*\* –  $P \leq 0,001$

Note: \*\* –  $P \leq 0.01$ ; \*\*\* –  $P \leq 0.001$

Анализ бета-разнообразия микробиомов исследуемых групп показал отсутствие различий в организации бактериальных сообществ ( $p=0,018$ ) (рис. 5).

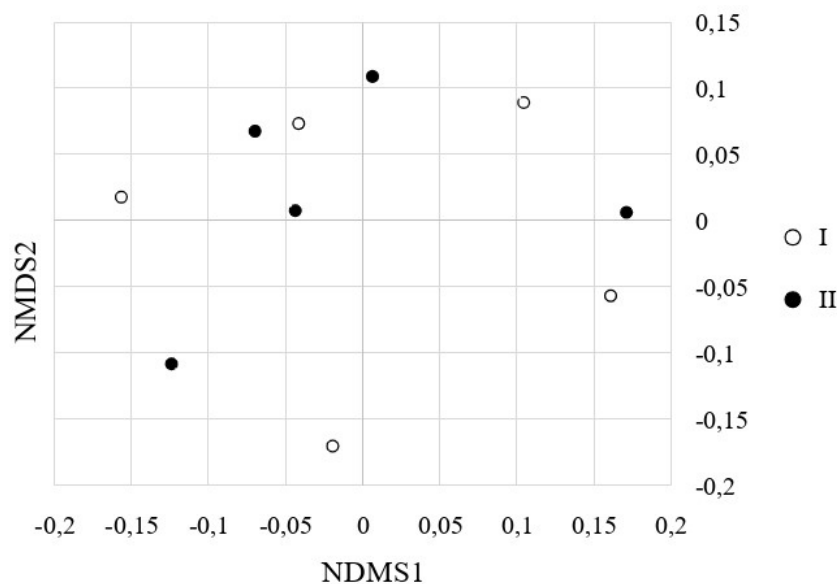


Рисунок 5. Бета-разнообразие микробиоты толстого кишечника коров I и II групп  
Figure 5. Beta diversity of the colon microbiota of cows of groups I and II

#### Обсуждение полученных результатов.

Микроэлементы в кормлении жвачных животных являются важным фактором, определяющим их здоровье и темпы роста (Ramah A et al., 2023). Изменения в минеральном обмене организма животного на фоне дефицита или избытка отдельных микроэлементов оказывают влияние как на здоровье самого животного, в частности на эффективность работы отдельных систем, так и на качество получаемой продукции (Numa Pompilio CG et al., 2021).

В нашем исследовании у животных с более низким содержания кобальта, марганца, цинка, меди, селена и кальция в волосе наблюдалось также более высокое содержание ртути и никеля. Аналогичные взаимосвязи между содержанием эссенциальных и токсичных микроэлементов были описаны при исследовании волоса коров других пород (Miroshnikov S et al., 2021). Предполагаем, что изменение концентрации одного элемента в организме может оказывать косвенное влияние на содержание другого, что могло являться одной из причин более высокого содержания ртути и более низкой концентрации селена у животных во II группе в сравнении с I. Как известно, селен и ртуть – это взаимные антагонисты (Afzal A and Mahreen N, 2024). Также ртуть является мощным блокатором каналов транспорта кальция в клетках крупного рогатого скота, что также могло обуславливать его более низкую концентрацию у животных II группы относительно I (Weinsberg F et al., 1995). Отмечается, что дефицит кальция, цинка, железа, селена, меди, хром и марганец способствует накоплению токсичных металлов в организме (Chowdhury BA and Chandra RK, 1987).

Изменения элементного состава волоса животных согласовывались с изменениями количества некоторых минеральных веществ в молоке. Была выявлена высокая корреляция между содержанием селена и кальция в волосе коров и их концентраций в молоке. Аналогично в работе Mehdi Y и Dufrasne I (2016) отмечается, что изменения в усвоении селена ведут к изменению его концентрации в молоке. Однако увеличения содержания токсичных элементов в молоке, в сравнении с контрольной группой, на фоне их более высокого содержания в организме отмечено не было. Возможно, это обусловлено тем, что скорость накопления токсичных микроэлементов в организме животных и скорость их поступления в молочные продукты различна, так как первично создание избытка элемента в почках и печени (Sharma RP et al., 1982).



Вероятно, причиной накопления или дефицита элемента в организме при содержании животных в одинаковых условиях являлась совокупность таких факторов, как особенности обмена веществ животного, уровень продуктивности и элементный состав пастбищной травы (Nemes LM et al., 2012; Мирошников С.А. и др., 2019б).

На фоне различий в содержании ряда микроэлементов в организме исследуемых животных особый интерес вызывают изменения в микробиоте ЖКТ крупного рогатого скота. Микробиом ЖКТ крупного рогатого скота считают скрытым метаболическим органом, и от эффективности его работы во многом зависит степень расщепления и усвоения питательных веществ и, как следствие, показатели продуктивности животного. Поэтому оценка таксономического состава микробиома ЖКТ жвачных животных на фоне изменений в содержании ряда микроэлементов в организме является важным аспектом в понимании уровня обменных процессов и прогнозирования будущей продуктивности.

Таксономический состав микробиома коров с содержанием эссенциальных микроэлементов ниже физиологической нормы характеризовался более низкими значениями индексов биоразнообразия и меньшей долей бактерий, осуществляющих синтез короткоцепочечных жирных кислот. Выявлено увеличение доли бактерий *Pseudomonadota* и снижение доли микроорганизмов, относящихся к *Bacillota*. В рамках таксона *Bacillota* наблюдалось снижение доли бактерий семейства *Lachnospiraceae*, являющихся активными продуцентами бутирата, микроорганизмов р. *Prevotella* и р. *Alistipes*, которые обеспечивают в кишечнике синтез ацетата, бутирата, пропионата (Li RW et al., 2012; Zhang B et al., 2022). Численность бактерии р. *Alistipes* и р. *Prevotella* в кишечнике в ряде исследований связывают с нормальным функционированием кишечника крупного рогатого скота, так как они являются продуцентами энергетического субстрата для эпителиальных клеток толстого кишечника крупного рогатого скота (Wang Y et al., 2022; Xue MY et al., 2020). Полученные данные согласуются с результатами отдельных работ, проведённых на различных организмах, по влиянию изменений содержания микро- и макроэлементов на кишечную микробиоту. В исследовании на мышах показано, что дефицит железа приводит к снижению бактерий р. *Prevotella* (Smith AD et al., 2018). Аналогично в исследовании на свиньях показано, что дефицит железа негативно сказывается на доле бактерий семейств *Lachnospiraceae* и *Ruminococcaceae* в микробиоме толстого кишечника. Увеличение концентраций никеля в организме способно приводить к снижению биоразнообразия в микробиоте кишечника мышей и численности бактерий таксона *Lachnospiraceae* (Zhou X et al., 2019).

В результате нами было отмечено снижение доли бактерий, связанных с энергетическими процессами в кишечнике, на фоне недостатка ряда элементов в организме, что может негативно сказаться на работе всей системы пищеварения.

В то же время в рамках таксона *Pseudomonadota* выявлено увеличение доли бактерий р. *Ruminobacter*, которые являются амилолитическими микроорганизмами и метаболизируют углеводы с образованием сукцинат и формиат, что будет приводить к изменениям направленности метаболических процессов в кишечнике, в том числе в энергетическом метаболизме (Stackebrandt E, 2015; Niwiska B, 2012). В исследованиях отмечается отрицательная взаимосвязь между долей бактерий таксона *Pseudomonadota* в кишечнике и уровнем потребления селена (Zhang X et al., 2022).

Изменения бактериального состава микробиома ЖКТ крупного рогатого скота на фоне воздействия различных факторов неизбежно приводят к изменению в работе всей системы пищеварения (Лиходеевский ГА и др., 2024). Снижение содержания пропионата, ацетата и бутирата в ЖКТ может оказывать влияние на метаболизм глюкозы, что приведёт к уменьшению секреции молочного жира и молочного белка (Qin L et al., 2022; Izumi K et al., 2019).

Учитывая двунаправленную взаимосвязь между составом микробиома ЖКТ и содержанием отдельных элементов, изменения, вызванные недостатком микроэлементов, будут влиять на усвоение микроэлементов в кишечнике.

Согласно литературным источникам, микробиота кишечника является барьером для всасывания ряда элементов путём изменения pH или концентрации метаболитов, участвующих в иммунологических реакциях и энергетических процессах (Claus SP et al., 2011). Предполагается, что микробиота ЖКТ может изменять метаболизм токсичных веществ и выводить их из организма (Collins SL and Patterson AD, 2020).

Однако для некоторых кишечных бактерий, оказывающих влияние на здоровье кишечника, описано положительное влияние на усвоение микроэлементов (Collins JF et al., 2018). Отмечается, что короткоцепочечные жирные кислоты (в том числе бутират) микробного происхождения способны улучшать функции эпителиального барьера кишечника, оказывая влияние на всасывание веществ (Zheng L et al., 2017). Некоторые виды микроорганизмов могут повышать биодоступность селена и защищать организм хозяина от токсичности селена (Ferreira RLU et al., 2021).

Снижение доли бактерий таксона *Bacillota* и увеличение относительной численности филума *Pseudomonadota*, вероятно, будет приводить к недостатку цинка в организме хозяина. Описано конкурентное поглощение цинка бактериями таксона *Pseudomonadota* в кишечнике, что может снижать количество цинка, доступного для макроорганизма (Reed S et al., 2015).

#### **Заключение.**

Таким образом, была выявлена взаимосвязь между содержанием микроэлементов в волосе коров, их количеством в молоке и особенностями таксономического состава микробиома толстого кишечника. У животных с содержанием цинка, меди, кобальта, марганца и селена в пределах референтных значений отмечалась высокая доля бактерий в кишечнике, продуцирующих бутират, ацетат и пропионат. Для животных с недостатком эссенциальных микроэлементов, в сравнении с рекомендуемым референтным диапазоном, было характерно увеличение в микробиоме доли бактерий, продуцирующих сукцинат и формиат. В результате отмечалась тенденция к изменению бактериального состава микробиома на фоне снижения содержания ряда элементов в волосе коров, что неизбежно будет приводить к изменениям в метаболических процессах в ЖКТ. Полученные данные показывают важность изучения микробиоты ЖКТ на фоне дисбаланса микроэлементов в организме животных и перспективы управления метаболическими процессами в кишечнике путём коррекции элементозов.

#### **Список источников**

1. Влияние добавок Zn, Cu, Mn и Fe, хелатированных глицином, на некоторые параметры молока и уровни микроэлементов в сыворотке молочных коров / Д.В. Гойлян, Р.Т. Кристина, А.О. Дома, Е. Думитреску, Р.Ф. Морузи, Д.М. Деги, С.А. Орасан, Ф. Муселин // Животноводство и кормопроизводство. 2022. Т. 105. № 3. С. 40-46. [Goilean DV, Cristina RT, Doma AO, Dumitrescu E, Moruzi RF, Degi DM, Orasan SA, Muselin F. Effects of glycine chelated Zn, Cu, Mn and Fe supplementation on some milk parameters and serum trace elements levels in dairy cows. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022;105(3):40-46. (*In Russ.*). doi: 10.33284/2658-3135-105-3-40 doi: 10.33284/2658-3135-105-3-34]
2. Воронина ОА, Боголюбова НВ, Зайцев СЮ Минеральные элементы в составе молока коров - мини-обзор // Сельскохозяйственная биология. 2022. № 4. С. 681-693. [Voronina OA, Bogolyubova NV, Zaitsev SY Mineral elements in the composition of cow's milk - mini-review. *Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]*. 2022;4:681-693. (*In Russ.*). doi: 10.15389/agrobiology.2022.4.681rus. doi: 10.15389/agrobiology.2022.4.681eng]
3. Лиходеевский Г.А., Богатова П.С., Лиходеевская О.Е. Бактериальная микробиота желудочно-кишечного тракта крупного рогатого скота молочного направления: состав, функции, значение (обзор). *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2024. Т.25. №2. С. 159–171. [Lihodeevsky GA, Bogatova PS, Lihodeevskaya OE. The bacterial microbiota of the gastrointestinal tract of dairy cattle:

structure, functions, importance (review). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*. 2024;25(2):159–171. (*In Russ.*). doi: 10.30766/2072-9081.2024.25.2.159-171

4. Мирошников СА, Завьялов ОА, Фролов АН. Влияние концентрации свинца в шерсти на межэлементное взаимодействие и молочную продуктивность голштинских коров. *Животноводство и кормопроизводство*. 2019а. Т.102. № 1. С. 54-70. [Miroshnikov SA, Zavyalov OA, Frolov AN. Effect of lead concentration in hair on elemental interrelation and milk production of the Holstein cows. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2019а;102(1):54-70. (*In Russ.*)]. doi: 10.33284/2658-3135-102-1-54

5. Нормы и рационы кормления сельскохозяйственных животных: справ. пособие / А.П. Калашников и др. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 2003. 456 с. [Kalashnikov AP, et al. *Normy i ratsiony kormleniya sel'skokhozyaistvennykh zhiivotnykh: sprav. posobie*. 3-е изд., pererab. i dop. Moscow: Agropromizdat; 2003:456 p. (*In Russ.*)].

6. Референтные интервалы концентраций химических элементов в шерсти молочных коров / С.А. Мирошников, О.А. Завьялов, А.Н. Фролов, М.Я. Курилкина, Е.А. Тяпугин, Х.Х. Тагиров // *Животноводство и кормопроизводство*. 2019б. Т. 102. No 3. С. 33-45. [Miroshnikov SA, Zavyalov OA, Frolov AN, Kurilkina MYa, Tyapugin EA, Tagirov KhKh. Reference ranges of concentrations of chemical elements in the wool of dairy cows. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2019b;102(3):33-45. (*In Russ.*)]. doi: 10.33284/2658-3135-102-3-33

7. Эленшлегер А.А., Афанасьев К.А. К проблеме нарушения минерального обмена веществ у коров // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2017. № 3(149). С. 143-148. [Elenschleger AA, Afanasyev KA. On the issue of mineral metabolic disorder in cows. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2017;3(149):143-148. (*In Russ.*)].

8. Afzal A, Mahreen N. Emerging insights into the impacts of heavy metals exposure on health, reproductive and productive performance of livestock. *Front Pharmacol*. 2024;15:1375137. doi: 10.3389/fphar.2024.1375137

9. Anchordoquy JM, Anchordoquy JP, Galarza EM, Farnetano NA, Giuliodori MJ, Nikoloff N, Fazzio LE, Furnus CC. Parenteral zinc supplementation increases pregnancy rates in beef cows. *Biological Trace Element Research*. 2019;192(2):175-182. <https://doi.org/10.1007/s12011-019-1651-8>

10. Chowdhury BA, Chandra RK. Biological and health implications of toxic heavy metal and essential trace element interactions. *Progress in Food & Nutrition Science*. 1987;11(1):55-113

11. Claus SP, Ellero SL, Berger B, Krause L, Bruttin A, Molina J, et al. Colonization-induced host-gut microbial metabolic interaction. *MBio*. 2011;2(2):e00271–10. doi: 10.1128/mBio.00271-10

12. Collins SL, Patterson AD. The gut microbiome: an orchestrator of xenobiotic metabolism. *Acta Pharm Sin B*. 2020;10(1):19-32. doi: 10.1016/j.apsb.2019.12.001

13. Collins JF, Flores SRL, Wang X, Anderson GJ. Mechanisms and Regulation of Intestinal Iron Transport. *Physiology of the Gastrointestinal Tract (Sixth Edition)*. 2018:1451-1483. doi: 10.1016/b978-0-12-809954-4.00060-8

14. de Sousa Ferreira JM, de Almeida Araújo C, dos Santos Pessoa RM, Costa Gois G, Sena Campos F, Laet Almeida Vicente S, dos Santos Pessoa AM, Correia da Cunha Castro Costa D, da Silva Azevêdo P, y Oliveira Lima D. Vitaminas e minerais na nutrição de bovinos. *Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA*. 2023;15(2):e969. doi: 10.24188/recia.v15.n2.2023.969

15. Ferreira RLU, Sena-Evangelista KCM, de Azevedo EP, Pinheiro FI, Cobucci RN, Pedrosa LFC. Selenium in human health and gut microflora: Bioavailability of selenocompounds and relationship with diseases. *Front Nutr*. 2021;8:685317. doi: 10.3389/fnut.2021.685317

16. Grešáková L, Holodová M, Szumacher-Strabel M, et al. Mineral status and enteric methane production in dairy cows during different stages of lactation. *BMC Vet Res*. 2021;17:287. doi: 10.1186/s12917-021-02984-w

17. Izumi K, Fukumori R, Oikawa S, Oba M. Short communication: Effects of butyrate supplementation on the productivity of lactating dairy cows fed diets differing in starch content. *Journal of Dairy Science*. 2019;102(12):11051-11056. doi: 10.3168/jds.2019-17113

18. Kalaeva E, Kalaev V, Chernitskiy A, Alhamed M, Safonov V. Incidence risk of bronchopneumonia in newborn calves associated with intrauterine diselementosis. *Vet World*. 2020;13(5):987-995. doi: 10.14202/vetworld.2020.987-995
19. Khan MZ, Ma Y, Xiao J, Chen T, Ma J, Liu S, Wang Y, Khan A, Alugongo GM, Cao Z. Role of selenium and vitamins E and B9 in the alleviation of bovine mastitis during the periparturient period. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*. 2022;11(4):657. doi: 10.3390/antiox11040657
20. Lynch RJM and Duckworth RM. Chapter 4: Microelements: Part I: Zn, Sn, Cu, Fe and I. In: Zohoori FV, Duckworth RM, Zohoori V, Duckworth R, editors. *Monographs in oral science*. 2020;28:32-47. doi: 10.1159/000499007
21. Liu L, Wu P, Guo A, Yang Y, Chen F and Zhang Q. Research progress on the regulation of production traits by gastrointestinal microbiota in dairy cows. *Front Vet Sci*. 2023;10:1206346. doi: 10.3389/fvets.2023.1206346
22. Loch M, Dorbek-Sundström E, Husso A, Pessa-Morikawa T, Niine T, Kaart T, Mõtus K, Niku M, Orro T. Associations of neonatal dairy calf faecal microbiota with inflammatory markers and future performance. *Animals*. 2024;14(17):2533. doi: 10.3390/ani14172533
23. Li RW, Wu S, Baldwin RL, Li W and Li C. Perturbation dynamics of the rumen microbiota in response to exogenous butyrate. *PLoS One*. 2012;7(1):e29392. doi: 10.1371/journal.pone.0029392
24. Mehdi Y, Dufresne I. Selenium in cattle: A review. *Molecules (Basel, Switzerland)*. 2016;21(4):545. doi: 10.3390/molecules21040545
25. Miroshnikov S, Notova S, Kazakova T, Marshinskaia O. The total accumulation of heavy metals in body in connection with the dairy productivity of cows. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;28(36):49852-49863. doi: 10.1007/s11356-021-14198-6
26. Nemeč LM, Richards JD, Atwell CA, Diaz DE, Zanton GI, Gressley TF. Immune responses in lactating Holstein cows supplemented with Cu, Mn, and Zn as sulfates or methionine hydroxy analogue chelates. *J Dairy Sci*. 2012;95(8):4568-4577. doi: 10.3168/jds.2012-5404
27. Niwiska B. Digestion in Ruminants. [Internet]. *Carbohydrates - comprehensive studies on glycobiology and glycotecnology*. InTech. 2012. Available from: <http://dx.doi.org/10.5772/51574>
28. Numa Pompilio CG, Francisco CS, Marco Tulio FM, Sergio Samuel SM, Fernanda Eliza GJ. Heavy metals in blood, milk and cow's urine reared in irrigated areas with wastewater. *Heliyon*. 2021;7(4):e06693. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e06693
29. Plaizier JC, Danesh Mesgaran M, Derakhshani H, Golder H, Khafipour E, Kleen JL, Lean I, Loor J, Penner G, Zebeli Q. Review: Enhancing gastrointestinal health in dairy cows. *Animal*. 2018;12(s2):s399-s418. doi: 10.1017/S1751731118001921
30. Prasetyono BWHE, Widiyanto W, Pandupuspitasari NS. Retracted: Gut microbiota profiles in dairy cattle from highland and coastal regions using shotgun metagenomic approach. *BioMed Research International*. 2022;2022(1):3659052. doi: 10.1155/2022/3659052
31. Qin L, Yao W, Wang T, Jin T, Guo B, Wen S, Huang F. Targeting gut microbiota-derived butyrate improves hepatic gluconeogenesis through the cAMP-PKA-GCN5 pathway in late pregnant sows. *Food & Function*. 2022;13(8):4360-4374. doi: 10.1039/d2fo00094f
32. Ramah A, Kato T, Shinya U, Baakhtari M, Imatake S, Jadi AR, Yasuda M. Effects of maternal supplementation with organic trace minerals including zinc, manganese, copper, and cobalt during the late and post-partum periods on the health and immune status of Japanese black calves. *Animals*. 2023;13(23):3679. doi: 10.3390/ani13233679
33. Reed S, Neuman H, Moscovich S, Glahn RP, Koren O, Tako E. Chronic zinc deficiency alters chick gut microbiota composition and function. *Nutrients*. 2015;7(12):9768-9784. doi: 10.3390/nu7125497
34. Séboussi R, Tremblay GF, Ouellet V, Chouinard PY, Chorfi Y, Bélanger G, Charbonneau É. Selenium-fertilized forage as a way to supplement lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2016;99(7):5358-5369. doi: 10.3168/jds.2015-10758

35. Sharma RP, Street JC, Shupe JL, Bourcier DR. Accumulation and depletion of cadmium and lead in tissues and milk of lactating cows fed small amounts of these metals. *J Dairy Sci.* 1982; 65(6):972-979. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(82)82298-4
36. Smith AD, Panickar KS, Urban JF, Dawson HD. Impact of micronutrients on the immune response of animals. *Annual Review of Animal Biosciences.* 2018;6:227-254. doi: 10.1146/annurev-animal-022516-022914
37. Stackebrandt ES. *Ruminobacter.* 2015. doi: 10.1002/9781118960608.gbm01085
38. Teseo S, Otani S, Brinch C. et al. A global phylogenomic and metabolic reconstruction of the large intestine bacterial community of domesticated cattle. *Microbiome.* 2022;10(1):155. doi: 10.1186/s40168-022-01357-1
39. van der Reijden OL, Galetti V, Herter-Aeberli I, Zimmermann MB, Zeder C, Krzystek A, Haldimann M, Barmaz A, Kreuzer M, Berard J, Schlegel P. Effects of feed iodine concentrations and milk processing on iodine concentrations of cows' milk and dairy products, and potential impact on iodine intake in Swiss adults. *British Journal of Nutrition.* 2019;122(2):172-185. doi: 10.1017/S0007114519001041
40. Virgínio Júnior GF, Bittar CMM. Microbial colonization of the gastrointestinal tract of dairy calves - a review of its importance and relationship to health and performance. *Animal Health Research Reviews.* 2021;22(2):97-108. doi: 10.1017/S1466252321000062
41. Wagner JJ, Edwards-Callaway LN, Engle TE. Vitamins and trace minerals in ruminants: confinement feedlot. *Veterinary Clinics of North America. Food Animal Practice.* 2023;39(3):505-516. doi: 10.1016/j.cvfa.2023.06.005
42. Weinsberg F, Bickmeyer U, Wiegand H. Effects of inorganic mercury (Hg<sup>2+</sup>) on calcium channel currents and catecholamine release from bovine chromaffin cells. *Archives of Toxicology.* 1995;69(3):191-196. doi: 10.1007/s002040050157
43. Weiss WP. A 100-Year Review: From ascorbic acid to zinc-Mineral and vitamin nutrition of dairy cows. *Journal of Dairy Science.* 2017;100(12):10045-10060. doi: 10.3168/jds.2017-12935
44. Xue MY, Sun HZ, Wu XH, Liu JX, Guan LL. Multi-omics reveals that the rumen microbiome and its metabolome together with the host metabolome contribute to individualized dairy cow performance. *Microbiome.* 2020;8(1):64. doi: 10.1186/s40168-020-00819-8
45. Wang Y, Zhao Y, Nan X, Wang Y, Cai M, Jiang L, Luo Q, Xiong B. Rumen-protected glucose supplementation alters fecal microbiota and its metabolic profiles in early lactation dairy cows. *Front Microbiol.* 2022;13:1034675. doi: 10.3389/fmicb.2022.1034675
46. Wang L, Wu D, Zhang Y, Li K, Wang M, Ma J. Dynamic distribution of gut microbiota in cattle at different breeds and health states. *Front Microbiol.* 2023;14:1113730. doi: 10.3389/fmicb.2023.1113730
47. Zhang B, Liu N, Hao M, Zhou J, Xie Y, He Z. Plant-derived polysaccharides regulated immune status, gut health and microbiota of broilers: a review. *Front Vet Sci.* 2022;8:791371. doi: 10.3389/fvets.2021.791371
48. Zhang X, Jia L, He H, Yin H, Ming J, Hou T, Xiang J. Modulation of oxidative stress and gut microbiota by selenium-containing peptides from *Cardamine ensiensis* and structural-based characterization. *Food Chem.* 2022;395:133547. doi: 10.1016/j.foodchem.2022.133547
49. Zhang L, Shen H, Zhang J, Mao S. Variety of rumen microbial populations involved in biohydrogenation related to individual milk fat percentage of dairy cows. *Front Vet Sci.* 2023;10:1106834. doi: 10.3389/fvets.2023.1106834
50. Zheng L, Kelly CJ, Battista KD, Schaefer R, Lanis JM, Alexeev EE, Wang RX, Onyiah JC, Kominsky DJ, Colgan SP. Microbial-derived butyrate promotes epithelial barrier function through IL-10 receptor-dependent repression of Claudin-2. *J Immunol.* 2017;199(8):2976-2984. doi: 10.4049/jimmunol.1700105
51. Zhou X, Li J, Sun JL. Oral nickel changes of intestinal microflora in mice. *Curr Microbiol.* 2019;76:590-596. doi: 10.1007/s00284-019-01664-1

**References**

1. Goilean DV, Cristina RT, Doma AO, Dumitrescu E, Moruzi RF, Degi DM, Orasan SA, Muselin F. Effects of glycine chelated Zn, Cu, Mn and Fe supplementation on some milk parameters and serum trace elements levels in dairy cows. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022;105(3):34-39. doi:10.33284/2658-3135-105-3-40 doi:10.33284/2658-3135-105-3-34
2. Voronina OA, Bogolyubova NV, Zaitsev SY. Mineral composition of cow's milk – a mini-review. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*. 2022;4:681-693. doi: 10.15389/agrobiology.2022.4.681eng
3. Lihodevsky GA, Bogatova PS, Lihodeevskaya OE. The bacterial microbiota of the gastrointestinal tract of dairy cattle: structure, functions, importance (review). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*. 2024;25(2):159–171. doi: 10.30766/2072-9081.2024.25.2.159-171
4. Miroshnikov SA, Zavyalov OA, Frolov AN. Effect of lead concentration in hair on elemental interrelation and milk production of the Holstein cows. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2019a; 102(1):54-70. doi: 10.33284/2658-3135-102-1-54
5. Kalashnikov AP et al. Norms and diets for feeding farm animals: Ref. book. 3rd ed., add. and reworked. Moscow; 2003: 456 p.
6. Miroshnikov SA, Zavyalov OA, Frolov AN, Kurilkina MYa, Tyapugin EA, Tagirov KhKh. Reference ranges of concentrations of chemical elements in the wool of dairy cows. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2019b; 102(3):33-45. doi: 10.33284/2658-3135-102-3-33
7. Elenschleger AA, Afanasyev KA. On the issue of mineral metabolic disorder in cows. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2017;3(149):143-148.
8. Afzal A, Mahreen N. Emerging insights into the impacts of heavy metals exposure on health, reproductive and productive performance of livestock. *Front Pharmacol*. 2024;15:1375137. doi: 10.3389/fphar.2024.1375137
9. Anchordoquy JM, Anchordoquy JP, Galarza EM, Farnetano NA, Giuliodori MJ, Nikoloff N, Fazzio LE, Furnus CC. Parenteral zinc supplementation increases pregnancy rates in beef cows. *Biological Trace Element Research*. 2019;192(2):175-182. <https://doi.org/10.1007/s12011-019-1651-8>
10. Chowdhury BA, Chandra RK. Biological and health implications of toxic heavy metal and essential trace element interactions. *Progress in Food & Nutrition Science*. 1987;11(1):55-113
11. Claus SP, Ellero SL, Berger B, Krause L, Bruttin A, Molina J, et al. Colonization-induced host-gut microbial metabolic interaction. *MBio*. 2011;2(2):e00271–10. doi: 10.1128/mBio.00271-10
12. Collins SL, Patterson AD. The gut microbiome: an orchestrator of xenobiotic metabolism. *Acta Pharm Sin B*. 2020;10(1):19-32. doi: 10.1016/j.apsb.2019.12.001
13. Collins JF, Flores SRL, Wang X, Anderson GJ. Mechanisms and Regulation of Intestinal Iron Transport. *Physiology of the Gastrointestinal Tract (Sixth Edition)*. 2018:1451-1483. doi: 10.1016/b978-0-12-809954-4.00060-8
14. de Sousa Ferreira JM, de Almeida Araújo C, dos Santos Pessoa RM, Costa Gois G, Sena Campos F, Laet Almeida Vicente S, dos Santos Pessoa AM, Correia da Cunha Castro Costa D, da Silva Azevêdo P, y Oliveira Lima D. Vitaminas e minerais na nutrição de bovinos. *Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA*. 2023;15(2):e969. doi: 10.24188/recia.v15.n2.2023.969
15. Ferreira RLU, Sena-Evangelista KCM, de Azevedo EP, Pinheiro FI, Cobucci RN, Pedrosa LFC. Selenium in human health and gut microflora: Bioavailability of selenocompounds and relationship with diseases. *Front Nutr*. 2021;8:685317. doi: 10.3389/fnut.2021.685317
16. Grešáková Ľ, Holodová M, Szumacher-Strabel M, et al. Mineral status and enteric methane production in dairy cows during different stages of lactation. *BMC Vet Res*. 2021;17:287. doi: 10.1186/s12917-021-02984-w

17. Izumi K, Fukumori R, Oikawa S, Oba M. Short communication: Effects of butyrate supplementation on the productivity of lactating dairy cows fed diets differing in starch content. *Journal of Dairy Science*. 2019;102(12):11051-11056. doi: 10.3168/jds.2019-17113
18. Kalaeva E, Kalaev V, Chernitskiy A, Alhamed M, Safonov V. Incidence risk of bronchopneumonia in newborn calves associated with intrauterine diselementosis. *Vet World*. 2020;13(5):987-995. doi: 10.14202/vetworld.2020.987-995
19. Khan MZ, Ma Y, Xiao J, Chen T, Ma J, Liu S, Wang Y, Khan A, Alugongo GM, Cao Z. Role of selenium and vitamins E and B9 in the alleviation of bovine mastitis during the periparturient period. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*. 2022;11(4):657. doi: 10.3390/antiox11040657
20. Lynch RJM and Duckworth RM. Chapter 4: Microelements: Part I: Zn, Sn, Cu, Fe and I. In: Zohoori FV, Duckworth RM, Zohoori V, Duckworth R, editors. *Monographs in oral science*. 2020;28:32-47. doi: 10.1159/000499007
21. Liu L, Wu P, Guo A, Yang Y, Chen F and Zhang Q. Research progress on the regulation of production traits by gastrointestinal microbiota in dairy cows. *Front Vet Sci*. 2023;10:1206346. doi: 10.3389/fvets.2023.1206346
22. Loch M, Dorbek-Sundström E, Husso A, Pessa-Morikawa T, Niine T, Kaart T, Mõtus K, Niku M, Orro T. Associations of neonatal dairy calf faecal microbiota with inflammatory markers and future performance. *Animals*. 2024;14(17):2533. doi: 10.3390/ani14172533
23. Li RW, Wu S, Baldwin RL, Li W and Li C. Perturbation dynamics of the rumen microbiota in response to exogenous butyrate. *PLoS One*. 2012;7(1):e29392. doi: 10.1371/journal.pone.0029392
24. Mehdi Y, Dufresne I. Selenium in cattle: A review. *Molecules (Basel, Switzerland)*. 2016;21(4):545. doi: 10.3390/molecules21040545
25. Miroshnikov S, Notova S, Kazakova T, Marshinskaia O. The total accumulation of heavy metals in body in connection with the dairy productivity of cows. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;28(36):49852-49863. doi: 10.1007/s11356-021-14198-6
26. Nemeč LM, Richards JD, Atwell CA, Diaz DE, Zanton GI, Gressley TF. Immune responses in lactating Holstein cows supplemented with Cu, Mn, and Zn as sulfates or methionine hydroxy analogue chelates. *J Dairy Sci*. 2012;95(8):4568-4577. doi: 10.3168/jds.2012-5404
27. Niwiska B. Digestion in Ruminants. [Internet]. *Carbohydrates - comprehensive studies on glycobiology and glycotecnology*. InTech. 2012. Available from: <http://dx.doi.org/10.5772/51574>
28. Numa Pompilio CG, Francisco CS, Marco Tulio FM, Sergio Samuel SM, Fernanda Eliza GJ. Heavy metals in blood, milk and cow's urine reared in irrigated areas with wastewater. *Heliyon*. 2021;7(4):e06693. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e06693
29. Plaizier JC, Danesh Mesgaran M, Derakhshani H, Golder H, Khafipour E, Kleen JL, Lean I, Loor J, Penner G, Zebeli Q. Review: Enhancing gastrointestinal health in dairy cows. *Animal*. 2018;12(s2):s399-s418. doi: 10.1017/S1751731118001921
30. Prasetyono BWHE, Widiyanto W, Pandupuspitasari NS. Retracted: Gut microbiota profiles in dairy cattle from highland and coastal regions using shotgun metagenomic approach. *BioMed Research International*. 2022;2022(1):3659052. doi: 10.1155/2022/3659052
31. Qin L, Yao W, Wang T, Jin T, Guo B, Wen S, Huang F. Targeting gut microbiota-derived butyrate improves hepatic gluconeogenesis through the cAMP-PKA-GCN5 pathway in late pregnant sows. *Food & Function*. 2022;13(8):4360-4374. doi: 10.1039/d2fo00094f
32. Ramah A, Kato T, Shinya U, Baakhtari M, Imatake S, Jadi AR, Yasuda M. Effects of maternal supplementation with organic trace minerals including zinc, manganese, copper, and cobalt during the late and post-partum periods on the health and immune status of japanese black calves. *Animals*. 2023;13(23):3679. doi: 10.3390/ani13233679
33. Reed S, Neuman H, Moscovich S, Glahn RP, Koren O, Tako E. Chronic zinc deficiency alters chick gut microbiota composition and function. *Nutrients*. 2015;7(12):9768-9784. doi: 10.3390/nu7125497

34. Séboussi R, Tremblay GF, Ouellet V, Chouinard PY, Chorfi Y, Bélanger G, Charbonneau É. Selenium-fertilized forage as a way to supplement lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2016;99(7):5358-5369. doi: 10.3168/jds.2015-10758
35. Sharma RP, Street JC, Shupe JL, Bourcier DR. Accumulation and depletion of cadmium and lead in tissues and milk of lactating cows fed small amounts of these metals. *J Dairy Sci*. 1982; 65(6):972-979. doi: 10.3168/jds.S0022-0302(82)82298-4
36. Smith AD, Panickar KS, Urban JF, Dawson HD. Impact of micronutrients on the immune response of animals. *Annual Review of Animal Biosciences*. 2018;6:227-254. doi: 10.1146/annurev-animal-022516-022914
37. Stackebrandt ES. *Ruminobacter*. 2015. doi: 10.1002/9781118960608.gbm01085
38. Teseo S, Otani S, Brinch C. et al. A global phylogenomic and metabolic reconstruction of the large intestine bacterial community of domesticated cattle. *Microbiome*. 2022;10(1):155. doi: 10.1186/s40168-022-01357-1
39. van der Reijden OL, Galetti V, Herter-Aeberli I, Zimmermann MB, Zeder C, Krzystek A, Haldimann M, Barmaz A, Kreuzer M, Berard J, Schlegel P. Effects of feed iodine concentrations and milk processing on iodine concentrations of cows' milk and dairy products, and potential impact on iodine intake in Swiss adults. *British Journal of Nutrition*. 2019;122(2):172-185. doi: 10.1017/S0007114519001041
40. Virgínio Júnior GF, Bittar CMM. Microbial colonization of the gastrointestinal tract of dairy calves - a review of its importance and relationship to health and performance. *Animal Health Research Reviews*. 2021;22(2):97-108. doi: 10.1017/S1466252321000062
41. Wagner JJ, Edwards-Callaway LN, Engle TE. Vitamins and trace minerals in ruminants: confinement feedlot. *Veterinary Clinics of North America. Food Animal Practice*. 2023;39(3):505-516. doi: 10.1016/j.cvfa.2023.06.005
42. Weinsberg F, Bickmeyer U, Wiegand H. Effects of inorganic mercury (Hg<sup>2+</sup>) on calcium channel currents and catecholamine release from bovine chromaffin cells. *Archives of Toxicology*. 1995;69(3):191-196. doi: 10.1007/s002040050157
43. Weiss WP. A 100-Year Review: From ascorbic acid to zinc-Mineral and vitamin nutrition of dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2017;100(12):10045-10060. doi: 10.3168/jds.2017-12935
44. Xue MY, Sun HZ, Wu XH, Liu JX, Guan LL. Multi-omics reveals that the rumen microbiome and its metabolome together with the host metabolome contribute to individualized dairy cow performance. *Microbiome*. 2020;8(1):64. doi: 10.1186/s40168-020-00819-8
45. Wang Y, Zhao Y, Nan X, Wang Y, Cai M, Jiang L, Luo Q, Xiong B. Rumen-protected glucose supplementation alters fecal microbiota and its metabolic profiles in early lactation dairy cows. *Front Microbiol*. 2022;13:1034675. doi: 10.3389/fmicb.2022.1034675
46. Wang L, Wu D, Zhang Y, Li K, Wang M, Ma J. Dynamic distribution of gut microbiota in cattle at different breeds and health states. *Front Microbiol*. 2023;14:1113730. doi: 10.3389/fmicb.2023.1113730
47. Zhang B, Liu N, Hao M, Zhou J, Xie Y, He Z. Plant-derived polysaccharides regulated immune status, gut health and microbiota of broilers: a review. *Front Vet Sci*. 2022;8:791371. doi: 10.3389/fvets.2021.791371
48. Zhang X, Jia L, He H, Yin H, Ming J, Hou T, Xiang J. Modulation of oxidative stress and gut microbiota by selenium-containing peptides from *Cardamine ensiensis* and structural-based characterization. *Food Chem*. 2022;395:133547. doi: 10.1016/j.foodchem.2022.133547
49. Zhang L, Shen H, Zhang J, Mao S. Variety of rumen microbial populations involved in biohydrogenation related to individual milk fat percentage of dairy cows. *Front Vet Sci*. 2023;10:1106834. doi: 10.3389/fvets.2023.1106834
50. Zheng L, Kelly CJ, Battista KD, Schaefer R, Lanis JM, Alexeev EE, Wang RX, Onyiah JC, Kominsky DJ, Colgan SP. Microbial-derived butyrate promotes epithelial barrier function through IL-10 receptor-dependent repression of Claudin-2. *J Immunol*. 2017;199(8):2976-2984. doi: 10.4049/jimmunol.1700105



51. Zhou X, Li J, Sun JL. Oral nickel changes of intestinal microflora in mice. *Curr Microbiol.* 2019;76:590-596. doi: 10.1007/s00284-019-01664-1

**Информация об авторах:**

**Елена Владимировна Яушева**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории молекулярно-генетических исследований и металломики в животноводстве, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29.

**Елена Анатольевна Сизова**, доктор биологических наук, руководитель центра «Нанотехнологии в сельском хозяйстве», Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29.

**Information about the authors:**

**Elena V Yausheva**, Cand. Sci. (Biology), senior researcher at the Laboratory of Molecular Genetic Research and Metallomics in Livestock, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29, 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000.

**Elena A Sizova**, Dr. Sci. (Biology), Head of the Centre for Nanotechnologies in Agriculture, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29, 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000.

Статья поступила в редакцию 23.10.2024; одобрена после рецензирования 25.11.2024; принята к публикации 16.12.2024.

The article was submitted 23.10.2024; approved after reviewing 25.11.2024; accepted for publication 16.12.2024.