

Животноводство и кормопроизводство. 2026. Т. 109. № 1. С. 167-183.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2026. Vol. 109. No. 1. P. 167-183.

Научная статья
УДК 636.085:577.17
doi: 10.33284/2658-3135-109-1-167

Наноккомпозит как перспективная кормовая добавка для цыплят-бройлеров

Марина Сергеевна Мингазова¹, Елена Петровна Мирошникова², Сергей Александрович Мирошников³,
Юлия Владимировна Кияякова⁴, Азамат Ерсайнович Аринжанов⁵

^{1,2,3,4,5}Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко, Оренбург, Россия

¹ms.mingazova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2818-1312>

²elenaakva@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3804-5151>

³rector_osu@mail.osu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1173-1952>

⁴fish-ka06@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2385-264X>

⁵arin.azamat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6534-7118>

Аннотация. Наноккомпозиты – это группа биосовместимых и биоразлагаемых наноструктурированных гибридных веществ. Составляющие наноккомпозитов – комплекс носителя и веществ(а) наполнителя. Использование наноккомпозитов в кормлении сельскохозяйственных животных представляется новым перспективным решением в связи с их положительным действием на организм при отсутствии токсического эффекта. Целью работы являлось изучение влияния на организм цыплят-бройлеров комплекса наноккомпозита на основе цинка, марганца, меди и железа (наноккомпозит Zn:Mn:Cu:Fe), используемого в различных дозировках: I группа – 0,2 мг/кг корма, II группа – 0,4 мг/кг корма, III группа – 0,8 мг/кг корма. Выявлено, что скармливание наноккомпозита в дозе 0,2 мг/кг корма сопровождается повышением живой массы птицы на величину от 4,7 до 5,8 % ($P \leq 0,01$) при более эффективном использовании корма. Повышение дозировок не отразилось на росте. Значительные изменения произошли в элементном статусе мышечной ткани цыплят-бройлеров. В I группе отмечено снижение содержания ряда макро- и микроэлементов (Ca, P, Mg, Cu, Fe, Mn, Sr). Во II и III группах установлены селективные изменения. При повышении пулов макроэлементов в III группе (P, K, Mg), концентрация ряда токсических микроэлементов также увеличивалась (Al, Sr, Pb). Во II группе зафиксировано значительное повышение Al ($P \leq 0,001$). Во всех опытных группах изменился таксономический состав микробиома кишечника: снижалась численность представителей филума *Bacillota*, повышалось количество *Bacteroidota* ($P \leq 0,01$) в I и II группах относительно контроля. В III группе возрастала как численность *Bacillota*, так и *Bacteroidota* ($P \leq 0,001$). Таким образом, наилучший эффект был получен при использовании наноккомпозита Zn:Mn:Cu:Fe в дозировке 0,2 мг/кг корма.

Ключевые слова: наноккомпозит, железо, цинк, медь, марганец, углеродная матрица, кормление, элементный статус, микробиом, рост

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке гранта на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технического развития (№ 075-15-2024-550).

Для цитирования. Наноккомпозит как перспективная кормовая добавка для цыплят-бройлеров / М.С. Мингазова, Е.П. Мирошникова, С.А. Мирошников, Ю.В. Кияякова, А.Е. Аринжанов // Животноводство и кормопроизводство. 2026. Т. 109. № 1. С. 167-183. [Mingazova MS, Miroshnikova EP, Miroshnikov SA, Kilyakova YuV, Arinzhonov AE. Nanocomposite as a promising feed additive for broiler chickens. Animal Husbandry and Fodder Production. 2026;109(1):167-183. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-109-1-167>

Original article

Nanocomposite as a promising feed additive for broiler chickens**Marina S Mingazova¹, Elena P Miroshnikova², Sergey A Miroshnikov³, Yulia V Kilyakova⁴, Azamat E Arinzhanov⁵**^{1,2,3,4,5} Orenburg State University named after VA Bondarenko, Orenburg, Russia¹ms.mingazova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2818-1312>²elenaakva@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3804-5151>³rector_osu@mail.osu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1173-1952>⁴fish-ka06@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2385-264X>⁵arin.azamat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6534-7118>

Abstract. Nanocomposites are a type of biocompatible and biodegradable nanostructured hybrid substances. The components of nanocomposites are a complex of a carrier and filler substance(s). The use of nanocomposites in feeding farm animals appears to be a promising new solution due to their positive effect on the organism without a toxic effect. The aim of the work was to study the effect of a nanocomposite complex based on zinc, manganese, copper and iron (Zn:Mn:Cu:Fe nanocomposite) on the body of broiler chickens. The dose was different: Group I - 0.2 mg/kg of feed, Group II - 0.4 mg/kg of feed, Group III - 0.8 mg/kg of feed. It was found that feeding the nanocomposite at a dose of 0.2 mg/kg of feed was accompanied by an increase in the live weight of birds by 4.7 to 5.8% ($P \leq 0.01$) with more efficient use of feed. Increasing the dosage did not significantly affect growth. Significant changes occurred in the elemental status of the muscle tissue of broiler chickens. In Group I, a decrease in the content of a number of macro- and microelements (Ca, P, Mg, Cu, Fe, Mn, Sr) was noted. Selective changes were found in Groups II and III. With increasing macronutrient pools in Group III (P, K, Mg), the concentrations of a number of toxic micronutrients (Al, Sr, Pb) also increased. A significant increase in Al ($P \leq 0.001$) was recorded in Group II. The taxonomic composition of the intestinal microbiome changed in all experimental groups: the abundance of representatives of the phylum *Bacillota* decreased, while the abundance of *Bacteroidota* increased ($P \leq 0.01$) in Groups I and II relative to the control. In Group III, both *Bacillota* and *Bacteroidota* abundance increased ($P \leq 0.001$). Thus, the best effect was achieved with the use of the Zn:Mn:Cu:Fe nanocomposite at a dosage of 0.2 mg/kg feed.

Keywords: nanocomposite, iron, zinc, copper, manganese, carbon matrix, feeding, elemental status, microbiome, growth

Acknowledgments: the work was supported by a grant for large-scale research projects in priority areas of scientific and technological development (No. 075-15-2024-550).

For citation: Mingazova MS, Miroshnikova EP, Miroshnikov SA, Kilyakova YuV, Arinzhanov AE. Nanocomposite as a promising feed additive for broiler chickens. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2026;109(1):167-183. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-109-1-167>

Введение.

В связи с развитием антибиотикорезистентности у человека и животных последние годы ознаменовались отказом от использования антибиотиков в терапевтических целях и ограничения на их применение в качестве кормовых добавок в сельском хозяйстве. Поэтому в настоящее время акцент смещается на поиск новых препаратов, альтернативных антибиотикам, которые можно включать в рацион сельскохозяйственных животных. Среди таких добавок выделяют про- и пребиотики. Кроме того, ультрадисперсные частицы металлов (УДЧ) являются потенциальными заместителями антибиотиков, в том числе УДЧ цинка, железа, серебра и ряда других. Дополнительное использование в рационе птицы УДЧ приводит к улучшению пищеварения, обмена веществ, повышению иммунитета, что положительно отражается на их продуктивности и экономической эффективности предприятий (Гулиц А.Ф. и др., 2023; Hassanen EI et al., 2023).

С другой стороны, есть сведения, что применение УДЧ в форме нанокompозитов повышает биодоступность металлов и сопровождается ростом продуктивного действия кормов. Нанокompозиты – новая группа наноструктурированных гибридных веществ, которые обладают биосовместимостью и биоразлагаемостью. В качестве основы для нанокompозитов в настоящее время используется хитозан и углеродная матрица (Al Shap NF et al., 2022; Ganesan S et al., 2022; Hassanen EI et al., 2023).

Применение УДЧ на углеродной матрице значительно повышает их противомикробную активность и позволяет использовать такие нанокompозиты в кормлении сельскохозяйственной птицы. Отмечается эффективность использования нанокompозитов отдельных металлов (Gomaa NH et al., 2023). Однако мало сведений о применении нанокompозита, состоящего из комплексов металлов-микроэлементов.

Новая форма металлов-микроэлементов – нанокompозиты – позволяет повысить биодоступность микроэлементов и получить более высокую продуктивность у сельскохозяйственной птицы. В последние годы нанокompозитные вещества как компоненты питания сельскохозяйственных животных привлекли к себе повышенное внимание в связи с их возможным воздействием на рост. УДЧ металлов обладают различными свойствами, в том числе антибактериальными и противовоспалительными. Кроме того, они способствуют выработке пищеварительных ферментов, что положительно влияет на рост и продуктивность (Abd El-Hack ME et al., 2024). Однако сведений о правильном выборе дозировок тех или иных нанокompозитов в литературе сравнительно мало (Hatab MH et al., 2022).

Таким образом, нами было оценено действие нанокompозита, состоящего из УДЧ цинка, марганца, меди и железа, на организм цыплят-бройлеров. Изучение разнообразных показателей в организме цыплят-бройлеров, в рацион которых дополнительно вносят нанокompозиты, – важная составляющая научных исследований. Изучение различных дозировок нанокompозитов с целью определения оптимальной является необходимым условием в понимании действия кормовых препаратов (Hassan ANA et al., 2024).

Цель исследования.

Изучить влияние на организм цыплят-бройлеров нанокompозита, состоящего из комплекса: цинк, марганец, медь и железо (нанокompозит Zn:Mn:Cu:Fe) и используемого в различных дозировках (0,2, 0,4 и 0,8 мг/кг корма).

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Цыплята-бройлеры кросса Arbor Acres (m=401±1 г).

Исследования выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями нормативных актов: протоколами Женевской конвенции и принципами надлежащей лабораторной практики (Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53434-2009). Все процедуры над животными выполняли в соответствии с требованиями Этического комитета Оренбургского государственного университета им. В.А. Бондаренко (протокол № 1 от 17.01.2024 г.).

Схема эксперимента. Исследование выполнено на базе кафедры биотехнологии животного сырья и аквакультуры Оренбургского государственного университета им. В.А. Бондаренко (ФГБОУ ВО ОГУ) и отдела кормления сельскохозяйственных животных и технологии кормов им. пр. С.Г. Леушина Федерального научного центра биологических систем и агротехнологий РАН (ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН) (рис. 1). Длительность эксперимента составила 35 суток, первые 7 суток – подготовительный период, в течение которого всем цыплятам-бройлерам задавали основной рацион (ОР), представленный кормами ПК-5 и ПК-6 (ЗАО «Птицефабрика Оренбургская»). Кормление осуществляли согласно возрастным требованиям (Имангулов Ш.А. и др., 2000). Подопытные цыплята (по n=6 в каждой группе) содержались в индивидуальных специализированных клетках (Тип-Н, размер – 1050мм*800мм*420мм, Zhengzhou LIVI Machinery Manufacturing CO., LTD.). Птицам был обеспечен неограниченный доступ к воде, который осуществляли с помощью nipple-системы поения VAL-CO.

В учетный период цыплятам опытных групп дополнительно к ОР вносили нанокompозит Zn:Mn:Cu:Fe в различных дозировках согласно схеме эксперимента (рис. 1).

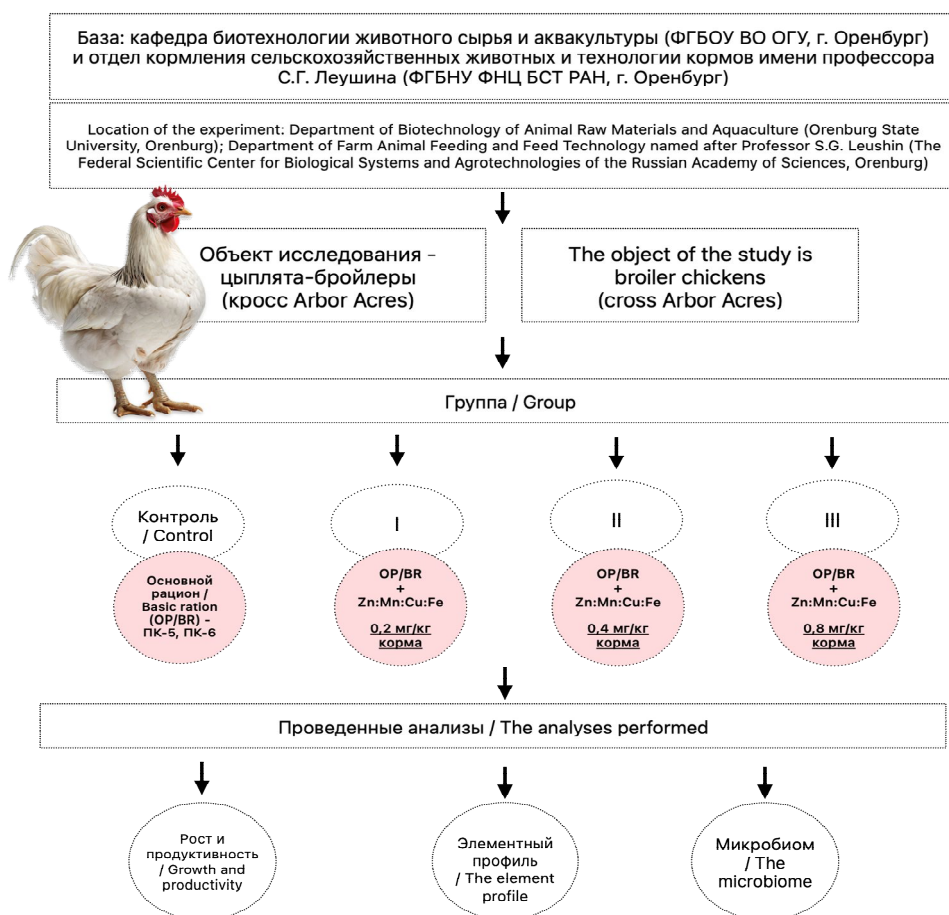


Рисунок 1. Схема эксперимента
Figure 1. The scheme of the experiment

В исследованиях представлен комплекс УДЧ, нанесенных на углеродный носитель. В состав комплекса входили УДЧ цинка, марганца, меди и железа (Zn:Mn:Cu:Fe). Наноккомпозит Zn:Mn:Cu:Fe был синтезирован в Институте Теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН (г. Новосибирск) (Semikolenova O et al., 2021). Порошок наноккомпозитов диспергировали в дистиллированной воде с помощью УЗДН-2Т (НПП «Академприбор», Россия) в течение 30 минут при заданной концентрации (0,2, 0,4 и 0,8 мг/кг корма) и вносили на корм тонким слоем методом напыления. Размер ультрадисперсных частиц Zn:Mn:Cu:Fe (ζ -потенциал – 20,1 мВ) составлял в пределах 40-60 нм.

Живую массу цыплят-бройлеров определяли путем индивидуального взвешивания, которое проводили еженедельно на весах Mertechn 333 AF-150.50 FARMERRS-232 LCD (MERTECH, Китай). Абсолютный прирост рассчитан как разность между конечной и начальной живой массой птицы. Относительный прирост – как отношение абсолютного прироста к исходному значению, выраженное в процентах. Коэффициент конверсии корма рассчитывали как отношение потребления корма к приросту каждой птицы за неделю.

За 12 часов до убоя подопытных цыплят-бройлеров прекратили кормить, за 6 часов ограничили поение. Для отбора проб в последний день эксперимента случайным образом выбрали по три головы из каждой группы. После взятия крови, ощипывания, потрошения и разделки, грудные мышцы были отделены от тушек, трижды измельчены до состояния фарша, упакованы в стерильные вакуумные пакеты и заморожены с целью дальнейшей передачи в лабораторию для определе-

ния концентрации химических элементов в тканях. Отбор слепого отдела кишечника проводили после уоя во время потрошения и разделки. Образцы кишечника помещались в предварительно подготовленные стерильные пробирки.

Оборудование и технические средства. Исследования выполнены с использованием приборной базы ЦКП БСТ РАН (г. Оренбург) (<http://цкп-бст.рф>). Количество химических элементов в мышцах грудной части было изучено методами атомно-эмиссионной спектроскопии и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Исследование проведено в лаборатории АНО «Центр биотической медицины» (г. Москва, лицензия МДКЗ 18097/9556). В образцах тканей были определены концентрация 25 макро- и микроэлементов (Ca, P, K, Na, Mg, Zn, Cu, Fe, Si, Mn, I, B, Cr, Ni, Se, V, Co, Li, Ag, Al, As, Sr, Pb, Cd, Be). Исследование микробиоты кишечника проведено на базе Центра коллективного пользования «Персистенция микроорганизмов» ФГБУН Институт клеточного и внутриклеточного симбиоза Уральского отделения РАН (<https://ckp-uf.ru/ckp/351815/>).

Статистическая обработка. Все данные были представлены в виде $M \pm m$, где M – среднее значение показателя, m – стандартное отклонение. Статистическая обработка выполнена с помощью программы «Statistica 10.0» («StatSoft Inc.», США). Достоверность статистически значимых различий считали по t-критерию Стьюдента при значениях с $P \leq 0,05$, $P \leq 0,01$ и $P \leq 0,001$. Биоинформатический анализ данных секвенирования проведен с помощью программ «FastQC v. 0.11.9» («Babraham Bioinformatics», Англия) и «Usearch V. 11.0.667» (Edgar R, 2010, США) (включала фильтрацию по качеству (ожидаемая ошибка или $\text{max} \text{ee} < 1,00$) и минимальной длине ампликона (400 п.н.)).

Графическая обработка выполнена при помощи «Excel» («Microsoft», США) и веб-платформы MicrobiomeAnalyst (<https://www.microbiomeanalyst.ca/MicrobiomeAnalyst/>). Визуализация схемы эксперимента разработана в программе Freeform.

Результаты исследования.

У птицы, получавшей наноккомпозит Zn:Mn:Cu:Fe в разной дозировке, наблюдали изменения в живой массе (рис. 2).

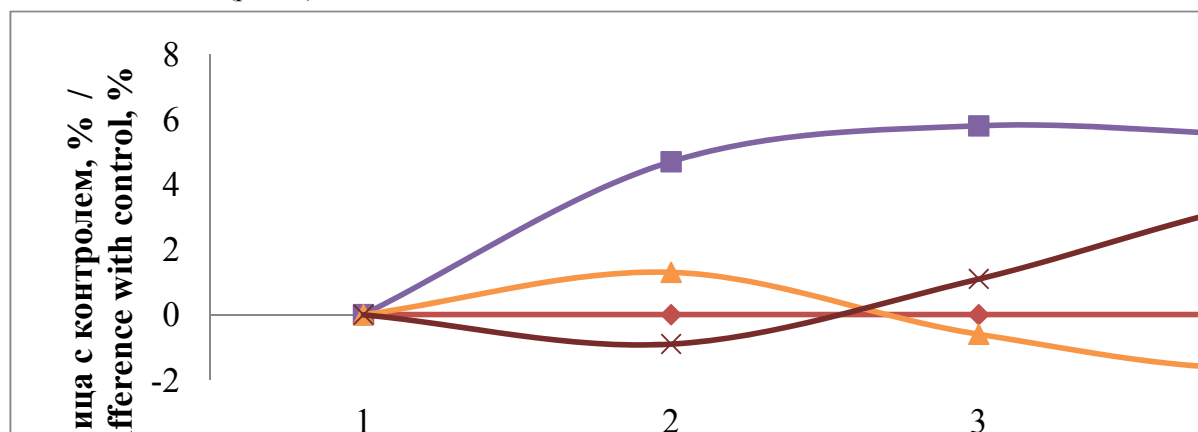


Рисунок 2. Динамика живой массы цыплят-бройлеров опытных групп относительно контроля, %
Figure 2. Dynamics of live weight of broiler chickens of the experimental groups relative to the control, %

Применение наноккомпозита Zn:Mn:Cu:Fe в дозировке 0,2 мг/кг корма привело к положительному изменению живой массы в течение исследования от 4,7 % ($P \leq 0,05$) до 5,8 % ($P \leq 0,01$) относительно контрольных значений. Повышение дозировки не приводило к достоверным различиям по живой массе.

При использовании препарата в дозировке 0,2 мг/кг корма выявлено положительное действие на относительный прирост, который был на 3,6 % ($P \leq 0,05$) выше контроля (табл. 1).

Таблица 1. Показатели прироста
Table 1. Growth indicators

Показатели / <i>Indicators</i>	Группа / <i>Group</i>			
	I	II	III	контроль / <i>Control</i>
Живая масса птицы перед убоем, г / <i>Live weight of the bird before slaughter, g</i>	2372±114*	2259±61	2345±131	2246±72
Абсолютный прирост, г / <i>Absolute weight gain, g</i>	1970±28,2	1858±27,3	1944±28,1	1845±27,3
Относительный прирост, % / <i>Relative gain, %</i>	56,3±0,8*	53,0±1,3	55,5±2,0	52,7±2,5

Примечание: * – $P \leq 0,05$ относительно контроля

Note: * – $P \leq 0.05$ regarding control

Исследуя продуктивность птицы (табл. 2), зафиксировано увеличение убойного выхода потрошенной тушки птицы в I группе – на 12 % ($P \leq 0,01$) относительно контроля. В I и III группах установлено повышение убойной массы – на 6,0 % и 4,2 %, при снижении коэффициента конверсии корма – на 2,6 % и 0,9 %, однако данные были недостоверными.

Таблица 2. Продуктивность птицы
Table 2. Poultry productivity

Показатели / <i>Indicators</i>	Группа / <i>Group</i>			
	I	II	III	контроль / <i>Control</i>
Убойная масса, г / <i>Slaughter weight, g</i>	2250±165	2119±119	2213±188	2123±157
Убойный выход потрошенной тушки, г / <i>Slaughter yield of gutted carcass, g</i>	1827±65**	1579±70	1709±65	1630±59
Коэффициент конверсии корма, $M \pm Sd$ / <i>Feed conversion rate, $M \pm Sd$</i>	1,12±0,28	1,15±0,26	1,14±0,28	1,15±0,27

Примечание: ** – $P \leq 0,01$ относительно контроля

Note: ** – $P \leq 0.01$ regarding control

Использование нанокompозита Zn:Mn:Cu:Fe отразилось на концентрации химических элементов в мышечной ткани цыплят-бройлеров (табл. 3).

Несмотря на активный рост, в I группе зафиксировано снижение уровня содержания макро- и микроэлементов. Так, среди макроэлементов в I группе зафиксировали уменьшение концентрации Ca и P на 53 % ($P \leq 0,01$) и 27 % ($P \leq 0,01$) по сравнению с контролем, при этом только в III группе концентрация P возросла на 26 % ($P \leq 0,05$). Вместе с тем в III группе повышался уровень содержания K и Mg на 11 % ($P \leq 0,001$) и 23 % ($P \leq 0,01$) соответственно. С другой стороны, во II группе не установлены изменения в концентрации макроэлементов в мышечной ткани цыплят-бройлеров за исключением повышения уровня содержания K на 9 % ($P \leq 0,01$) по сравнению с контролем.

Таблица 3. Содержание элементов в мышцах, мкг/г
Table 3. The content of elements in muscles, mcg/g

Элемент / <i>Elements</i>	Группа / <i>Group</i>			
	I	II	III	контроль / <i>Control</i>
1	2	3	4	5
Макроэлементы / <i>Macroelements</i>				
Ca	423±58,2**	905±111	1272±271	893±221
P	219±25,0**	306±28,2	376±50,7*	298±38,3
K	1364±56,6	1409±51,0**	1431±49,0***	1295±15,8
Na	240±2,08	269±7,24	255±3,17	251±5,27
Mg	49,3±2,48*	59,5±2,50	72,1±1,80**	58,6±5,57
Эссенциальные и условно-эссенциальные элементы / <i>Essential and conditionally essential elements</i>				
Zn	11,9±0,82	14,5±0,69	13,8±0,66	12,8±1,65
Cu	0,45±0,03**	0,69±0,09*	0,55±0,05	0,54±0,03
Fe	10,7±0,9***	16,8±1,4	19,7±2,9	16,9±1,51
Si	22,7±7,24	63,6±6,72***	63,6±8,66***	19,7±3,63
Mn	0,26±0,03***	0,38±0,05	0,33±0,03	0,38±0,03
I	0,236±0,016	0,068±0,006**	0,191±0,043*	0,325±0,076
B	0,25±0,02	0,25±0,01	0,24±0,01	0,27±0,01
Cr	0,25±0,04	0,21±0,03**	0,23±0,02*	0,29±0,02
Ni	0,17±0,03	0,18±0,01	0,23±0,02**	0,18±0,02
Se	0,12±0,01	0,14±0,01	0,12±0,02	0,14±0,01
V	0,0067±0,0004	0,0058±0,0006	0,0055±0,0001**	0,007±0,0002
Co	0,0088±0,0007	0,0126±0,001	0,0163±0,0023	0,0123±0,0015
Li	0,0081±0,0008	0,0149±0,0008**	0,0171±0,0011**	0,0071±0,0015
Ag	0,0046±0,0006	0,0047±0,0003	0,0039±0,0003	0,0091±0,0022
Токсические элементы / <i>Toxic microelements</i>				
Al	0,29±0,07	0,64±0,06***	0,53±0,09**	0,34±0,06
As	0,0023±0,0007	0,0026±0,0006	0,0015±0,0002***	0,0026±0,0003
Sr	0,50±0,06**	0,98±0,11	1,39±0,13***	0,79±0,17
Pb	0,013±0,003	0,019±0,002	0,021±0,006*	0,013±0,002
Cd	0,003±0,001	0,004±0,0006	0,003±0,0003	0,004±0,0003
Be	0,0009±0,0002	0,001±0,0003	0,0015±0,0004	0,0012±0,0003

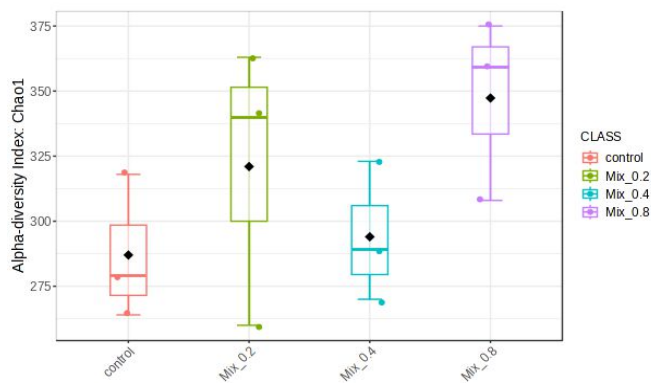
Примечание: * – P≤0,05; ** – P≤0,01; *** – P≤0,001 при сравнении с контрольной группой
Note: * – P≤0.05; ** – P≤0.01; *** – P≤0.001 when compared with the control group

Состав эссенциальных и условно-эссенциальных микроэлементов изменялся во II и III группах. Во II группе уровень содержания Cu повышался на 28 % (P≤0,05), а также увеличивались концентрации Si и Li на 223 % (P≤0,001) и 110 % (P≤0,01) по отношению к контрольным значениям. Однако концентрация I и Cr при использовании в рационе цыплят наноконкрита в дозировке 0,4 мг/кг корма снижалась на 79 % (P≤0,001) и 28 % (P≤0,01) соответственно. Похожий результат был получен в III группе, в которой по отношению к контрольным значениям повышались концентрации Si (на 223 %; P≤0,001), Li (на 141 %; P≤0,01) и Ni (на 28 %; P≤0,01) при снижении уровня содержания I (на 41 %; P≤0,05), Cr (на 21 %; P≤0,05) и V (на 21 %; P≤0,01). Отличительные результаты были получены в I группе, где зафиксировали снижение уровня Cu, Fe и Mn – до 37 % (P≤0,001) относительно контроля.

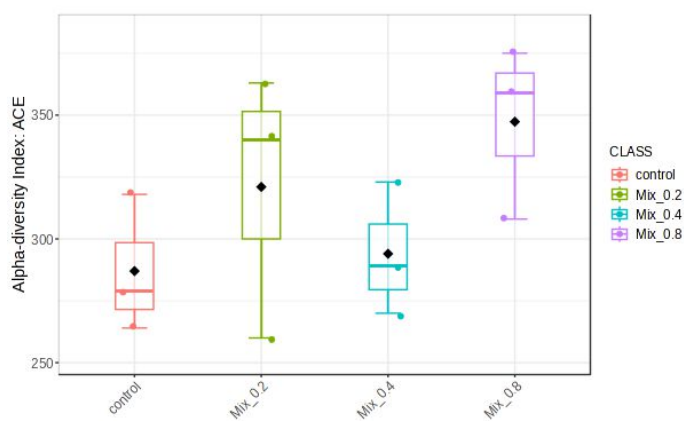
В I группе также отмечено снижение токсических элементов. Наиболее значимым оказалось уменьшение концентрации Sr, уровень которого был на 37 % (P≤0,01) ниже контроля. В то же время во II группе отмечено повышение концентрации Al (выше контроля на 88 %; P≤0,001). В III группе уровень As снижался на 42 % (P≤0,001), однако возрастало содержание Al, Pb и Sr – на 56 % (P≤0,01), 62 % (P≤0,05) и 76 % (P≤0,001) относительно контрольных значений.

Согласно проведенному секвенированию ампликоновых библиотек варибельного участка V3-V4 гена 16S рРНК было получено 3,272,712 парно-концевых ридов, при средней глубине покрытия 99,173 прочтений на образец. После процедур слияния, фильтрации по качеству и длине, дерепликации ридов с последующим деноезингом, а также последующему удалению синглтонов и даблтонов было выявлено 682 zOTU (Operational Taxonomic Unit).

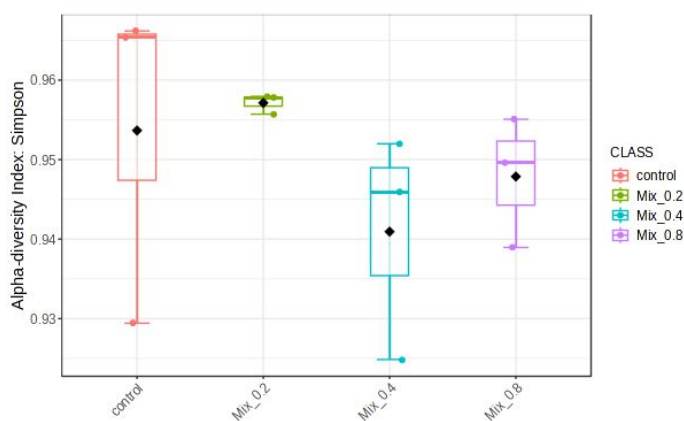
При оценке альфа-разнообразия выявлено (рис. 3), что самые высокие показатели индекса ACE (Abundance Coverage Estimator) относительно контроля (505,56) были в I группе (603,09), в то же время во II группе (495,26) отмечены самые низкие значения. Аналогичная картина была получена по индексу разнообразия Chao1. Согласно индексам Шеннона и Симпсона, наибольшим разнообразием характеризовались образцы I группы.



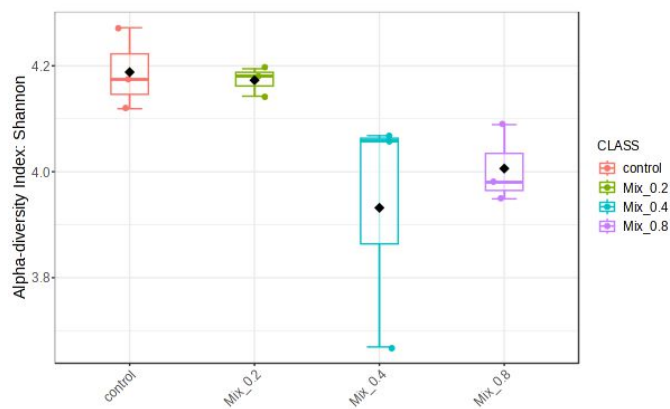
A



B



C



D

Рисунок 3. Индексы альфа-разнообразия микробиома кишечника цыплят-бройлеров: Chao1 (A), ACE (B), Шеннона (C) и Симпсона (D)

Figure 3. Indices of alpha diversity of the intestinal microbiome of broiler chickens: Chao1 (A), ACE (B), Shannon (C) and Simpson (D)

Оценка таксономического состава микробиомов кишечника цыплят-бройлеров выявила, что на уровне филум доминировали представители *Bacillota* и *Bacteroidota* (рис. 4).

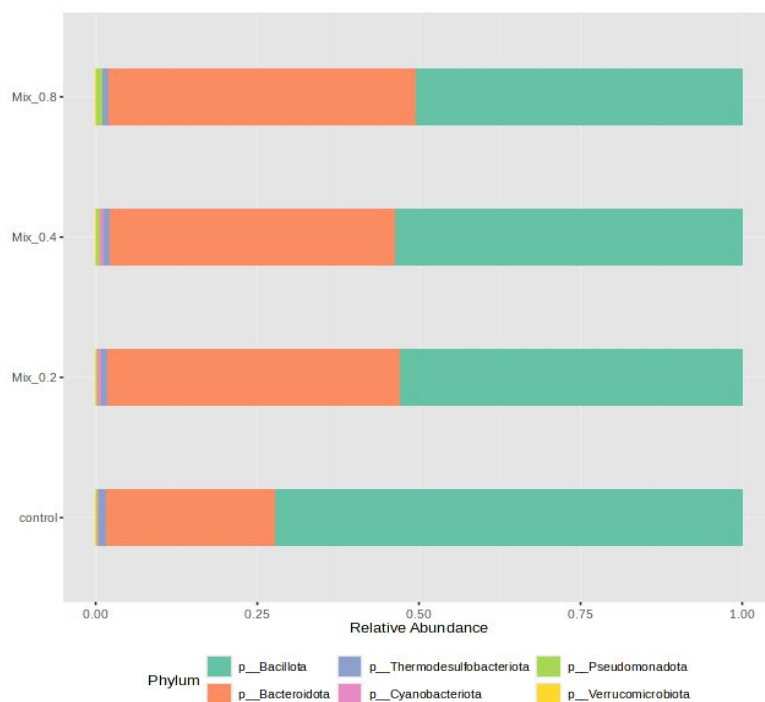


Рисунок 4. Относительная представленность бактериальных таксонов на уровне филум в микробиоме кишечника цыплят-бройлеров

Figure 4. Relative representation of bacterial taxa at the phylum level in the intestinal microbiome of broiler chickens

В контроле свыше 70 % приходилось на представителей филума *Bacillota*, в опытных группах их концентрация снижалась и была в пределах 51-54 % относительно других представителей.

При этом по отношению к контролю в I и II группах отмечено снижение числа представителей *Bacillota* (на 17 % и 15 % соответственно), в III группе установлено их увеличение на 39 %.

Независимо от дозировки наноконкомпозита Zn:Mn:Cu:Fe, роль представителей *Bacteroidota* в опытных группах увеличивалась. Из общего числа микробиомов кишечника цыплят-бройлеров на филум *Bacteroidota* приходилось 44-47 %. Сравнительно контроля в I и II группах было увеличение количества представителей *Bacteroidota* в 2 раза ($P \leq 0,01$), а в III группе – в 3,6 раз ($P \leq 0,001$).

От общего числа семейств (рис. 5) свыше 70 % приходилось на долю представителей *Bacteroidaceae*, *Ruminococcaceae*, *Lachnospiraceae* и *Oscillospiraceae*.

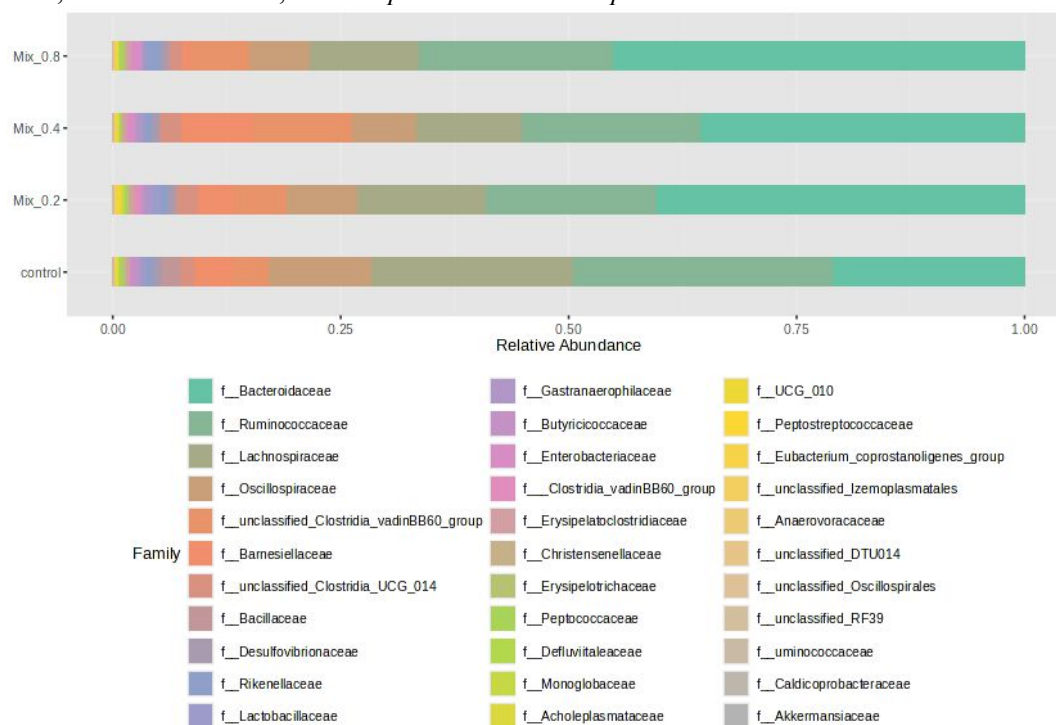


Рисунок 5. Относительная представленность бактериальных таксонов на уровне семейств в микробиоме кишечника цыплят-бройлеров

Figure 5. Relative representation of bacterial taxa at the family level in the intestinal microbiome of broiler chickens

Доминирующим семейством в опытных группах были представители *Bacteroidaceae*, на долю которых приходилось свыше 35 % от численности других семейств. По отношению к контролю роль *Bacteroidaceae* возростала в опытных группах и повышалась в 2,0 ($P \leq 0,01$) – 4,2 ($P \leq 0,001$) раза. Однако количество представителей семейства *Lachnospiraceae* в I и II опытных группах снижалось на 32 % и 43 % по сравнению с контролем.

Обсуждение полученных результатов.

Нами зафиксировано, что использование наименьшей дозировки (0,2 мг/кг корма) наноконкомпозита Zn:Mn:Cu:Fe приводило к ростостимулирующему эффекту, что, возможно, связано с особенностью наночастиц – большой площадью поверхности, которая повышает биодоступность и всасываемость в стенки клеток даже при маленьких дозировках (Aminisough SA et al., 2025; Dosoky WM et al., 2022). Повышение дозы (0,4 и 0,8 мг/кг корма) может стимулировать токсический ответ организма, что способно приводить к снижению ростовых показателей (Hosein AT et al., 2025).

Выявлено улучшение минерального обмена в мышцах птицы при повышении дозировки нанокompозита Zn:Mn:Cu:Fe, что согласуется с другими исследованиями (Bhagat S and Singh S, 2022). Ранее указывалось (Nguyen HD et al., 2025), что под действием УДЧ концентрация Cu и Fe в организме цыплят увеличивалась. Использование нанокompозита Zn:Mn:Cu:Fe в дозировке 0,2 мг/кг корма привело к ростостимулирующему эффекту в связи с возможным влиянием УДЧ на повышение концентрации гормонов роста и усвояемости аминокислот. Этот эффект может стимулировать синтез мышечной ткани, повышая антиоксидантную активность, что и вызывало вымывание Cu, Fe и Mn из мышечной ткани грудки у цыплят-бройлеров (Мирошникова Е.П. и др., 2020; Kuttappan VA et al., 2021; Abdullah SS et al., 2022). Также выявлена взаимосвязь между повышением концентрации токсических элементов и снижением ростовых показателей во II и III группах, так как аккумуляция в организме ряда микроэлементов (Al, Pb, As и других) может оказывать негативное воздействие на гомеостаз (Pinto FP et al., 2022; Мингазова М.С. и др., 2023).

Существует взаимосвязь между нарушениями обмена веществ, видовым разнообразием кишечной микрофлоры и здоровьем цыплят-бройлеров при использовании различных УДЧ в кормлении. Микробиота кишечника играет ключевую роль в метаболических процессах организма и взаимодействии с иммунной системой (Shariff S et al., 2024; Elbaz AM t al., 2025). Результаты исследований выявили изменения в микробиоме кишечника, которые были связаны с функциональным влиянием на организм при использовании в рационе нанокompозита, который может влиять на структуру и морфологию кишечника (Lochi GM et al., 2023; Fathi M et al., 2025).

В целом, преобладающими филумами в микробиоте кишечника птицы являются филумы *Bacillota* и *Bacteroidota*, суммарная численность которых в кишечной микробиоте может превышать 90 % (Deryabin D et al., 2024). Роль филума *Bacillota* в организме птицы сводится к расщеплению клетчатки кормов, а также к участию в антимикробной, иммуномодулирующей и ферментной активности. Повышение численности представителей *Bacteroidota*, вероятно, связано с улучшением характера кормления, в дальнейшем это может отражаться на качестве продукции. Кроме того, изменение численности *Bacteroidota* может влиять на метаболизм жиров и углеводов, способствовать повышению иммунитета (Кван О.В. и др., 2023; Yang et al., 2022).

Исследуя численность на уровне семейств, выявлено, что основными представителями были *Bacteroidaceae*, *Ruminococcaceae*, *Lachnospiraceae* и *Oscillospiraceae*. Роль *Ruminococcaceae* заключается в формировании ферментной вооруженности системы «организм хозяина – микробиом» и в большом содержании генов ксиланазы и целлюлазы. Представители семейств *Ruminococcaceae* и *Lachnospiraceae* участвуют в выработке α -глюкозидазы и α - и β -галактозидазы. Они могут расщеплять целлюлозу и гемицеллюлозу, высвобождая сахара для использования как микроорганизмами, так и организмом хозяина в целом (Khan S et al., 2020; Wang Y and Yuan Z, 2024).

По результатам эксперимента установлено, что, с одной стороны, изменения в численности доминирующих представителей микрофлоры кишечника в опытных группах были сопряжены с изменениями в интенсивности роста птицы. С другой, повышение дозировки нанокompозита приводило к увеличению пулов токсических микроэлементов в тканях, что негативно отражалось на ростостимулирующем эффекте.

Заключение.

1. Повышение прироста живой массы (до 5,8 %; $P \leq 0,01$), относительного прироста (на 3,6 %; $P \leq 0,05$), снижение расхода корма (на 2,6 %) и увеличение убойного выхода потрошенной тушки (на 12 %; $P \leq 0,01$) были получены при использовании нанокompозита Zn:Mn:Cu:Fe в дозировке 0,2 мг/кг корма. Ростостимулирующий эффект и изменение продуктивности отсутствовали при повышении дозы препарата.

2. Селективные изменения в размерах пулов макро- и микроэлементов выявлены при использовании дозировки нанокompозита Zn:Mn:Cu:Fe, равной 0,4 и 0,8 мг/кг корма, при этом возросло содержание токсических элементов (Al, Sr, Pb). Доза 0,2 мг/кг корма стимулировала значительное снижение Sr, однако также способствовала вымыванию ряда макро- и микроэлементов.

3. Оценка индексов разнообразия ACE, Chaol, Шеннона и Симпсона показала, что наибольшее разнообразие микрофлоры кишечника птицы отмечалась в группе, получавшей нанокомпозит Zn:Mn:Cu:Fe в дозировке 0,2 мг/кг корма.

4. Согласно таксономическому разнообразию на уровне филумов в опытных группах доминировали *Bacillota* и *Bacteroidota*, на уровне семейств свыше 70 % от общего числа приходилось на представителей *Bacteroidaceae*, *Ruminococcaceae*, *Lachnospiraceae* и *Oscillospiraceae*.

Таким образом, лучшие показатели были отмечены у цыплят-бройлеров, в кормление которых вводили нанокомпозит Zn:Mn:Cu:Fe в дозировке 0,2 мг/кг корма. Актуальным является вопрос дальнейших исследований по использованию различных комплексов металлов на основе нанокомпозита в кормлении сельскохозяйственной птицы.

Список источников

1. Влияние экстракта *Quercus cortex* и ультрадисперсных частиц Fe и Cu на обмен химических элементов в организме цыплят-бройлеров / Е.П. Мирошникова, О.В. Кван, Е.В. Шейда, Е.А. Русакова // Животноводство и кормопроизводство. 2020. Т. 103. № 3. С. 24-35. [Miroshnikova EP, Kwan OV, Sheyda EV, Rusakova EA. Effect of *Quercus cortex* extract and ultrafine particles of Fe and Cu on the exchange of chemical elements in body of broiler chickens. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2020;103(3):24-35. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-103-3-24

2. Влияние энтеросорбентов на микробное разнообразие слепой кишки цыплят-бройлеров при скормливании полусинтетического рациона / О.В. Кван, С.А. Мирошников, Е.В. Шейда, Е.А. Сизова, И.В. Маркова // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106. № 4. С. 203-215. [Kvan OV, Miroshnikov SA, Sheida EV, Sizova EA, IV Markova. The effect of enterosorbents on microbial diversity of the blind intestine in broiler chickens on a semi-synthetic diet. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(4):203-215. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-106-4-203

3. К пониманию действия пробиотических препаратов на рост и гематологические параметры крови цыплят-бройлеров / А.Ф. Гулиц, Е.П. Мирошникова, С.А. Мирошников, М.С. Мингазова // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106. № 4. С. 191-202. [Gulits AF, Miroshnikova EP, Miroshnikov SA, Mingazova MS. Towards an understanding of the effect of probiotic preparations on growth and hematological parameters of blood of broiler chickens. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(4):191-202. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-106-4-191

4. Концентрация химических элементов в мышечной ткани карпа при включении в рацион биологически активных веществ / М.С. Мингазова, Е.П. Мирошникова, А.Е. Аринжанов, Ю.В. Килякова // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106. № 4. С. 18-29. [Mingazova MS, Miroshnikova EP, Arinzhanov AE, Kilyakova YuV. Concentration of chemical elements in carp muscle tissue when biologically active substances are included in the diet. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(4):18-29. (In Russ.)]. doi: 10.33284/2658-3135-106-4-18

5. Методика проведения научных и производственных исследований по кормлению сельскохозяйственной птицы / Ш.А. Имангулов, И.А. Егоров, Т.М. Околелова, А.Н. Тищенко, Т.Н. Ленкова, П.Н. Паньков, А.В. Езерская, Г.В. Игнатова, И.В. Догадаева, Б.Ф. Авдонин, З.А. Петрина, Т.В. Борисова. Сергиев Посад: ВНИТИП, 2000. 34 с. [Imangulov SA, Egorov IA, Okolelova TM, Tishenkov AN, Lenkova TN, Pankov PN, Ezerskaya AV, Ignatova GV, Dogadaeva IV, Avdonin BF, Petrina ZA, Borisova TV. Metodika provedeniya nauchny`x i proizvodstvenny`x issledovaniy po kormleniyu sel'skoxozyajstvennoj pticy. Sergiev Posad: Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij i texnologicheskij institut pticevodstva; 2000:34 p. (In Russ.)].

6. Abd El-Hack ME, Ashour EA, Aljahdali N, Zabermawi NM, Baset SA, Kamal M, Radhi KS, Moustafa M, Algotpishi U, Alshaharni MO, Bassiony SS. Does the dietary supplementation of organic nano-zinc as a growth promoter impact broiler's growth, carcass and meat quality traits, blood metabolites and cecal microbiota? *Poultry Science*. 2024;103(5):103550. doi: 10.1016/j.psj.2024.103550

7. Abdullah SS, Masood S, Zaneb H, Rabbani I, Akbar J, Kuthu ZH, Masood A., Vargas-Bello-Pérez E. Effects of copper nanoparticles on performance, muscle and bone characteristics and serum metabolites in broilers. *Brazilian Journal of Biology*. 2022;84:e261578. doi: 10.1590/1519-6984.261578
8. Al Shap NF, El-Sherbeny EM, El Masry DMA. The efficacy of metal nanocomposite (Fe₃O₄/CuO/ZnO) to ameliorate the toxic effects of ochratoxin in broilers. *BMC Veterinary Research*. 2022;18(1):312. doi: 10.1186/s12917-022-03400-7
9. Aminisough SA, Daneshjou S, Khajeh K. Effects of ZnO nanoparticles on mortality and growth performance in broiler chickens. *Scientific Reports*. 2025;15:41285. doi: 10.1038/s41598-025-25179-x
10. Bhagat S, Singh S. Nanominerals in nutrition: Recent developments, present burning issues and future perspectives. *Food Research International*. 2022;160:111703. doi: 10.1016/j.foodres.2022.111703
11. Deryabin D, Lazebnik C, Vlasenko L, Karimov I, Kosyan D, Zatevalov A, Duskaev G. Broiler chicken cecal microbiome and poultry farming productivity: a meta-analysis. *Microorganisms*. 2024;12(4):747. doi: 10.3390/microorganisms12040747
12. Dosoky WM, Al-Banna AA, Zahran SM, Farag SA, Abdelsalam NR, Khafaga AF. Zinc oxide nanoparticles induce dose-dependent toxicosis in broiler chickens reared in summer season. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2022;29(36):54088-54107. doi: 10.1007/s11356-022-19156-4
13. Elbaz AM, Ashmawy ES, Farahat MAA, Abdel-Maksoud A, Amin SA, Mohamed ZS. Dietary *Nigella sativa* nanoparticles enhance broiler growth performance, antioxidant capacity, immunity, gene expression modulation, and cecal microbiota during high ambient temperatures. *Science Reports*. 2025;15(1):861. doi: 10.1038/s41598-024-82725-9
14. Fathi M, Mardani P, Shokri A, Rezaee V. A comparative study between cinnamon extract and cinnamon nanoparticles on growth performance, blood metabolites and gut microbiota of broiler chickens. *Poultry Science*. 2025;104(12):106065. doi: 10.1016/j.psj.2025.106065
15. Ganesan S, Sivam S, Elanchezian M, Senthilkumar S, Ramakrishan SG, Soundappan T, Ponnusamy VK. Novel delipidated chicken feather waste-derived carbon-based molybdenum oxide nanocomposite as efficient electrocatalyst for rapid detection of hydroquinone and catechol in environmental waters. *Environmental Pollution*. 2022;293:118556. doi: 10.1016/j.envpol.2021.118556
16. Gomaa NH, Abd El-Aziz NK, El-Naenaey E-SY, Abdelaziz WS, Sewid AH. Antimicrobial potential of myricetin-coated zinc oxide nanocomposite against drug-resistant *Clostridium perfringens*. *BMC Microbiology*. 2023;23(1):79. doi: 10.1186/s12866-023-02800-5
17. Hassan AHA, Youssef IM, Abdel-Atty NS, Abdel-Daim ASA. Effect of thyme, ginger, and their nano-particles on growth performance, carcass characteristics, meat quality and intestinal bacteriology of broiler chickens. *BMC Veterinary Research*. 2024;20:269. doi: 10.1186/s12917-024-04101-z
18. Hassanen EI, Hussien AM, Mehanna S, Morsy EA. Chitosan coating silver nanoparticles as a promising feed additive in broilers chicken. *BMC Veterinary Research*. 2023;19:265. doi: 10.1186/s12917-023-03826-7
19. Hatab MH, Rashad E, Salth HM, El-Sayed E-S, Abu Taleb AM. Effects of dietary supplementation of myco-fabricated zinc oxide nanoparticles on performance, histological changes, and tissues Zn concentration in broiler chicks. *Scientific reports*. 2022;12(1):18791. doi: 10.1038/s41598-022-22836-3
20. Hosein AT, Toghyani M, Shahsavan M. Impact of zinc hydroxychloride and oxide nanoparticles on broiler chicken growth, gut microbiota, immunity and serum biochemistry. *Veterinary Medicine and Science*. 2025;11(2):e70306. doi: 10.1002/vms3.70306
21. Khan S, Moore RJ, Stanley D, Chousalkar KK. The gut microbiota of laying hens and its manipulation with prebiotics and probiotics to enhance gut health and food safety. *Applied and Environmental Microbiology*. 2020;86(13):e00600-e00620. doi: 10.1128/AEM.00600-20
22. Kuttappan VA, Manangi M, Bekker M, Chen J, Vazquez-Anon M. Nutritional intervention strategies using dietary antioxidants and organic trace minerals to reduce the incidence of

wooden breast and other carcass quality defects in broiler birds. *Frontiers in Physiology*. 2021;12:663409. doi: 10.3389/fphys.2021.663409

23. Lochi GM, Shah MG, Gandahi JA, Gadahi JA, Hadi SA, Farooq T, Vistro WA, Rahmani MM. Effect of selenium nanoparticles and chitosan on production performance and anti-oxidant integrity of heat-stressed broiler. *Biological Trace Element Research*. 2023;201:1977-1986. doi: 10.1007/s12011-022-03262-y

24. Nguyen HD, Moss AF, Yan F, Romero-Sanchez H, Dao TH. Effects of feeding methionine hydroxyl analogue chelated zinc, copper, and manganese on growth performance, nutrient digestibility, mineral excretion and welfare conditions of broiler chickens: Part 1: Performance aspects. *Animals (Basel)*. 2025;15(3):421. doi: 10.3390/ani15030421

25. Pinto FP, Duarte AM, Silva F, Barroso S, Mendes S, Pinto E, Almeida A, Sequeira V, Vieira AR, Gordo LS, Gil MM. Annual variations in the mineral element content of five fish species from the Portuguese coast. *Food Research International*. 2022;158:111482. doi: 10.1016/j.foodres.2022.111482

26. Semikolenova O, Sakovina L, Akhmetova E, Kim D, Vokhtantsev I, Golyshev V, Vorobyeva M, Novopashin S, Novopashina D. Photoactivatable nanoCRISPR/Cas9 system based on crRNA reversibly immobilized on carbon nanoparticles. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(20):10919. doi: 10.3390/ijms222010919

27. Shariff S, Kwan SHA, Parag SN, Yahia A, Hammoud D, Nazir A, Abubakar MBBS, Uwishema O, Wojtara M. Unlocking the gut-heart axis: exploring the role of gut microbiota in cardiovascular health and disease. *Annals of Medicine and Surgery*. 2024;86(5):2752-2758. doi: 10.1097/ms9.0000000000001744

28. Wang Y, Yuan Z. Gut microbiota in two chickens' breeds: Characteristics and dynamic changes. *Microbial Pathogenesis*. 2024;197:107101. doi: 10.1016/j.micpath.2024.107101

29. Yang J, Tong C, Xiao D, Xie L, Zhao R, Hou Z, Tang Z, Hao J, Zqng Z, Xiong W. Metagenomic insights into chicken gut antibiotic resistomes and microbiomes. *Microbiology Spectrum*. 2022;10(2):e0190721. doi: 10.1128/spectrum.01907-21

References

1. Miroshnikova EP, Kwan OV, Sheyda EV, Rusakova EA. Effect of *Quercus cortex* extract and ultrafine particles of Fe and Cu on the exchange of chemical elements in body of broiler chickens. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2020;103(3):24-35. doi: 10.33284/2658-3135-103-3-24

2. Kvan OV, Miroshnikov SA, Sheida EV, Sizova EA, IV Markova. The effect of enterosorbents on microbial diversity of the blind intestine in broiler chickens on a semi-synthetic diet. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(4):203-215. doi: 10.33284/2658-3135-106-4-203

3. Gulits AF, Miroshnikova EP, Miroshnikov SA, Mingazova MS. Towards an understanding of the effect of probiotic preparations on growth and hematological parameters of blood of broiler chickens. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(4):191-202. doi: 10.33284/2658-3135-106-4-191

4. Mingazova MS, Miroshnikova EP, Arinzhanov AE, Kilyakova YuV. Concentration of chemical elements in carp muscle tissue when biologically active substances are included in the diet. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(4):18-29. doi: 10.33284/2658-3135-106-4-18

5. Imangulov SA, Egorov IA, Okolelova TM, Tishenkov AN, Lenkova TN, Pankov PN, Ezerskaya AV, Ignatova GV, Dogadaeva IV, Avdonin BF, Petrina ZA, Borisova TV. Methodology for conducting scientific and industrial research on feeding agricultural poultry. *Sergiev Posad: All-Russian Scientific Research and Technological Institute of Poultry Farming*; 2000:34 p.

6. Abd El-Hack ME, Ashour EA, Aljahdali N, Zaber mawi NM, Baset SA, Kamal M, Radhi KS, Moustafa M, Algotpishi U, Alshaharni MO, Bassiony SS. Does the dietary supplementation of organic nano-zinc as a growth promoter impact broiler's growth, carcass and meat quality traits, blood metabolites and cecal microbiota? *Poultry Science*. 2024;103(5):103550. doi: 10.1016/j.psj.2024.103550

7. Abdullah SS, Masood S, Zaneb H, Rabbani I, Akbar J, Kuthu ZH, Masood A., Vargas-Bello-Pérez E. Effects of copper nanoparticles on performance, muscle and bone characteristics and serum metabolites in broilers. *Brazilian Journal of Biology*. 2022;84:e261578. doi: 10.1590/1519-6984.261578
8. Al Shap NF, El-Sherbeny EM, El Masry DMA. The efficacy of metal nanocomposite (Fe₃O₄/CuO/ZnO) to ameliorate the toxic effects of ochratoxin in broilers. *BMC Veterinary Research*. 2022;18(1):312. doi: 10.1186/s12917-022-03400-7
9. Aminisough SA, Daneshjou S, Khajeh K. Effects of ZnO nanoparticles on mortality and growth performance in broiler chickens. *Scientific Reports*. 2025;15:41285. doi: 10.1038/s41598-025-25179-x
10. Bhagat S, Singh S. Nanominerals in nutrition: Recent developments, present burning issues and future perspectives. *Food Research International*. 2022;160:111703. doi: 10.1016/j.foodres.2022.111703
11. Deryabin D, Lazebnik C, Vlasenko L, Karimov I, Kosyan D, Zatevalov A, Duskaev G. Broiler chicken cecal microbiome and poultry farming productivity: a meta-analysis. *Microorganisms*. 2024;12(4):747. doi: 10.3390/microorganisms12040747
12. Dosoky WM, Al-Banna AA, Zahran SM, Farag SA, Abdelsalam NR, Khafaga AF. Zinc oxide nanoparticles induce dose-dependent toxicosis in broiler chickens reared in summer season. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2022;29(36):54088-54107. doi: 10.1007/s11356-022-19156-4
13. Elbaz AM, Ashmawy ES, Farahat MAA, Abdel-Maksoud A, Amin SA, Mohamed ZS. Dietary *Nigella sativa* nanoparticles enhance broiler growth performance, antioxidant capacity, immunity, gene expression modulation, and cecal microbiota during high ambient temperatures. *Science Reports*. 2025;15(1):861. doi: 10.1038/s41598-024-82725-9
14. Fathi M, Mardani P, Shokri A, Rezaee V. A comparative study between cinnamon extract and cinnamon nanoparticles on growth performance, blood metabolites and gut microbiota of broiler chickens. *Poultry Science*. 2025;104(12):106065. doi: 10.1016/j.psj.2025.106065
15. Ganesan S, Sivam S, Elanchezian M, Senthilkumar S, Ramakrishan SG, Soundappan T, Ponnusamy VK. Novel delipidated chicken feather waste-derived carbon-based molybdenum oxide nanocomposite as efficient electrocatalyst for rapid detection of hydroquinone and catechol in environmental waters. *Environmental Pollution*. 2022;293:118556. doi: 10.1016/j.envpol.2021.118556
16. Gomaa NH, Abd El-Aziz NK, El-Naenaey E-SY, Abdelaziz WS, Sewid AH. Antimicrobial potential of myricetin-coated zinc oxide nanocomposite against drug-resistant *Clostridium perfringens*. *BMC Microbiology*. 2023;23(1):79. doi: 10.1186/s12866-023-02800-5
17. Hassan AHA, Youssef IM, Abdel-Atty NS, Abdel-Daim ASA. Effect of thyme, ginger, and their nano-particles on growth performance, carcass characteristics, meat quality and intestinal bacteriology of broiler chickens. *BMC Veterinary Research*. 2024;20:269. doi: 10.1186/s12917-024-04101-z
18. Hassanen EI, Hussien AM, Mehanna S, Morsy EA. Chitosan coating silver nanoparticles as a promising feed additive in broilers chicken. *BMC Veterinary Research*. 2023;19:265. doi: 10.1186/s12917-023-03826-7
19. Hatab MH, Rashad E, Salth HM, El-Sayed E-S, Abu Taleb AM. Effects of dietary supplementation of myco-fabricated zinc oxide nanoparticles on performance, histological changes, and tissues Zn concentration in broiler chicks. *Scientific reports*. 2022;12(1):18791. doi: 10.1038/s41598-022-22836-3
20. Hosein AT, Toghyani M, Shahsavan M. Impact of zinc hydroxychloride and oxide nanoparticles on broiler chicken growth, gut microbiota, immunity and serum biochemistry. *Veterinary Medicine and Science*. 2025;11(2):e70306. doi: 10.1002/vms3.70306
21. Khan S, Moore RJ, Stanley D, Chousalkar KK. The gut microbiota of laying hens and its manipulation with prebiotics and probiotics to enhance gut health and food safety. *Applied and Environmental Microbiology*. 2020;86(13):e00600-e00620. doi: 10.1128/AEM.00600-20
22. Kuttappan VA, Manangi M, Bekker M, Chen J, Vazquez-Anon M. Nutritional intervention strategies using dietary antioxidants and organic trace minerals to reduce the incidence of

wooden breast and other carcass quality defects in broiler birds. *Frontiers in Physiology*. 2021;12:663409. doi: 10.3389/fphys.2021.663409

23. Lochi GM, Shah MG, Gandahi JA, Gadahi JA, Hadi SA, Farooq T, Vistro WA, Rahmani MM. Effect of selenium nanoparticles and chitosan on production performance and anti-oxidant integrity of heat-stressed broiler. *Biological Trace Element Research*. 2023;201:1977-1986. doi: 10.1007/s12011-022-03262-y

24. Nguyen HD, Moss AF, Yan F, Romero-Sanchez H, Dao TH. Effects of feeding methionine hydroxyl analogue chelated zinc, copper, and manganese on growth performance, nutrient digestibility, mineral excretion and welfare conditions of broiler chickens: Part 1: Performance aspects. *Animals (Basel)*. 2025;15(3):421. doi: 10.3390/ani15030421

25. Pinto FP, Duarte AM, Silva F, Barroso S, Mendes S, Pinto E, Almeida A, Sequeira V, Vieira AR, Gordo LS, Gil MM. Annual variations in the mineral element content of five fish species from the Portuguese coast. *Food Research International*. 2022;158:111482. doi: 10.1016/j.foodres.2022.111482

26. Semikolenova O, Sakovina L, Akhmetova E, Kim D, Vokhtantsev I, Golyshev V, Vorobyeva M, Novopashin S, Novopashina D. Photoactivatable nanoCRISPR/Cas9 system based on crRNA reversibly immobilized on carbon nanoparticles. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(20):10919. doi: 10.3390/ijms222010919

27. Shariff S, Kwan SHA, Parag SN, Yahia A, Hammoud D, Nazir A, Abubakar MBBS, Uwishema O, Wojtara M. Unlocking the gut-heart axis: exploring the role of gut microbiota in cardiovascular health and disease. *Annals of Medicine and Surgery*. 2024;86(5):2752-2758. doi: 10.1097/ms9.0000000000001744

28. Wang Y, Yuan Z. Gut microbiota in two chickens' breeds: Characteristics and dynamic changes. *Microbial Pathogenesis*. 2024;197:107101. doi: 10.1016/j.micpath.2024.107101

29. Yang J, Tong C, Xiao D, Xie L, Zhao R, Hou Z, Tang Z, Hao J, Zqng Z, Xiong W. Metagenomic insights into chicken gut antibiotic resistomes and microbiomes. *Microbiology Spectrum*. 2022;10(2):e0190721. doi: 10.1128/spectrum.01907-21

Информация об авторе:

Марина Сергеевна Мингазова, кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры «Биотехнология животного сырья и аквакультуры», Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко, 460018, г. Оренбург, пр. Победы 13, тел.: 8-922-853-24-46.

Елена Петровна Мирошникова, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой «Биотехнология животного сырья и аквакультуры», Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко (ОГУ), 460018, г. Оренбург, пр. Победы 13, тел.: 8-987-862-98-86.

Сергей Александрович Мирошников, доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН, ректор, Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13, тел.: 8 (3532) 77-67-70.

Юлия Владимировна Киякова, кандидат биологических наук, доцент кафедры «Биотехнология животного сырья и аквакультуры», Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко, 460018, г. Оренбург, пр. Победы 13, тел.: 8-961-920-40-64.

Азамат Ерсанович Аринжанов, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры «Биотехнология животного сырья и аквакультуры», Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко, 460018, г. Оренбург, пр. Победы 13, тел.: 8-922-806-33-43.

Information about the authors:

Marina S Mingazova, Cand. Sci. (Biology), Senior Lecturer of the Department of Biotechnology of Animal Raw Materials and Aquaculture, Orenburg State University named after VA Bondarenko, 13 Pobedy Ave, Orenburg, 460018, tel.: 8-922-853-24-46.

Elena P Miroshnikova, Dr. Sci. (Biology), Professor, Head of the Department of Biotechnology of Animal Raw Materials and Aquaculture, Orenburg State University named after VA Bondarenko, 13 Pobedy Ave, Orenburg, 460018, tel.: 8-987-862-98-86.

Sergey A Miroshnikov, Dr. Sci. (Biology), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Rector, Orenburg State University named after VA Bondarenko, 13 Pobedy Ave, Orenburg, 460018, tel.: 8 (3532)77-67-70.

Yulia V Kilyakova, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Department of Biotechnology of Animal Raw Materials and Aquaculture, Orenburg State University named after VA Bondarenko, 13 Pobedy Ave, Orenburg, 460018, tel.: 8-961-920-40-64.

Azamat E Arinzhanov, Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor, Department of Biotechnology of Animal Raw Materials and Aquaculture, Orenburg State University named after VA Bondarenko, 13 Pobedy Ave, Orenburg, 460018, tel.: 8-922-806-33-43.

Статья поступила в редакцию 28.11.2025; одобрена после рецензирования 15.01.2026; принята к публикации 16.03.2026.

The article was submitted 28.11.2025; approved after reviewing 15.01.2026; accepted for publication 16.03.2026.