

УДК 631.95/.58.12:612.1

Научная статья



DOI: 10.32634/0869-8155-2026-404-03-42-49

О.В. Кван^{1,2} ✉

В.В. Гречкина^{1,3}

Е.В. Шейда^{1,2}

И.А. Вершинина¹

¹Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия,

²Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия,

³Оренбургский государственный аграрный университет, Оренбург, Россия

✉ kwan111@yandex.ru

Поступила в редакцию: 15.12.2025

Одобрена после рецензирования: 15.02.2026

Принята к публикации: 28.02.2026

© Кван О.В., Гречкина В.В., Шейда Е.В., Вершинина И.А.

Влияние изотопов УДЧ металлов на физиолого-биохимические показатели цыплят-бройлеров

РЕЗЮМЕ

В исследовании изучали показатели роста и развития цыплят-бройлеров, переваримость компонентов корма, морфо-биохимические показатели крови, а также обмен элементов в теле под влиянием изотопов УДЧ. Контрольная группа получала ОР, I группа — ОР + изотоп УДЧ Fe (17 мг/кг корма), II группа — ОР + изотоп УДЧ Cu (1,7 мг/кг корма). Было отмечено изменение динамики набора живой массы по сравнению с контролем, наиболее выраженное в I опытной группе (на 2,1–6,0%). Переваримость органического вещества и сырого жира была выше контроля в I и II опытной группе, переваримость сырого протеина была выше контроля на 9,55–16,7% во всех опытных группах. В крови птицы I и II опытной группе отмечали повышение числа лимфоцитов, в I группе – повышении гемоглобина и его снижение — во II группе. Биохимические показатели сыворотки крови птицы (АСТ, креатинин, общий билирубин) свидетельствуют об усилении обменных процессов в I и II группы. В I и II группе отмечалась тенденция к уменьшению содержания в теле птицы токсичных элементов и увеличению — эссенциальных. Для II опытной группы было характерно увеличение эндогенных потерь по сравнению с контролем.

Ключевые слова: УДЧ, кормление, метаболизм, коэффициенты переваримости, элементный обмен, эндогенные потери

Для цитирования: Кван О.В., Гречкина В.В., Шейда Е.В., Вершинина И.А. Влияние изотопов УДЧ металлов на физиолого-биохимические показатели цыплят-бройлеров. *Аграрная наука*. 2026; 404(03): 42–49.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-404-03-42-49>

Research article



DOI: 10.32634/0869-8155-2026-404-03-42-49

Olga V Kvan^{1,2} ✉

Viktoriya V. Grechkina^{1,3}

Elena V. Sheida^{1,2}

Irina A. Vershinina¹

¹Federal Scientific Center of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

²Orenburg State University, Orenburg, Russia,

³Orenburg State Agrarian University, Orenburg, Russia

✉ kwan111@yandex.ru

Received by the editorial office: 15.12.2025

Accepted in revised: 15.02.2026

Accepted for publication: 28.02.2026

© Kvan O.V., Grechkina V.V., Sheida E.V., Vershinina I.A.

The influence of ultra-fine metal isotopes on the physiological and biochemical parameters of broiler chickens

ABSTRACT

The study examined the growth and development indicators of broiler chickens, the digestibility of feed components, the morpho-biochemical parameters of the blood, and the metabolism of elements in the body under the influence of UFC isotopes. The control group received OR, group I — OR + UFC Fe isotope (17 mg/kg of feed), group II — OR + UFC Cu isotope (1.7 mg/kg of feed). A change in the dynamics of live weight gain was noted compared to the control, most pronounced in the first experimental group (by 2.1–6.0%). Digestibility of organic matter and crude fat was higher than the control in the first and second experimental groups, digestibility of crude protein was higher than the control by 9.55–16.7% in all experimental groups.

In the blood of birds from experimental groups I and II, an increase in the number of lymphocytes was observed, in group I — an increase in hemoglobin and its decrease in group II. Biochemical parameters of the bird's blood serum (AST, creatinine, total bilirubin) indicate an increase in metabolic processes in groups I and II. In groups I and II, a tendency towards a decrease in the content of toxic elements in the bird's body and an increase in essential elements was noted. In group III, the content of Zn, Cr, Al and Ni in the bird's body increased. In experimental group I, a decrease in endogenous losses of Fe and Cu was observed. For experimental group II, an increase in endogenous losses was characteristic compared to the control.

Key words: UDC, feeding, metabolism, digestibility coefficients, elemental exchange, endogenous losses

For citation: Kvan O.V., Grechkina V.V., Sheida E.V., Vershinina I.A. The influence of ultra-fine metal isotopes on the physiological and biochemical parameters of broiler chickens. *Agrarian science*. 2026; 404(03): 42–49 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-404-03-42-49>

Введение/Introduction

Роль эндогенных минералов в обеспечении продуктивности животных обусловлена их значительным поступлением в пищеварительную систему, часто превосходящим экзогенные источники в несколько раз. Воздействие отдельных добавок в кормах, микроорганизмов и самого пищеварительного тракта на минеральный метаболизм и производительность животных до сих пор остается малоизученной областью [1].

Минеральные вещества важны в питании сельскохозяйственных животных не только благодаря их прямому влиянию на обмен веществ, степени усвоения и участию в регулировании кислотно-щелочного равновесия. Их значение также определяется способностью вступать во взаимодействие с другими элементами, что может как улучшать, так и ухудшать состояние здоровья животных и птицы. Разнообразные виды взаимодействий между минералами способны оказывать значительное влияние на продуктивные показатели и общее благополучие сельскохозяйственной птицы [2]. Дисбаланс макро- и микроэлементов в питании, будь то их нехватка или переизбыток, влечет за собой нарушение равновесия между питательными веществами и биологически активными компонентами, что негативно сказывается на обмене веществ. Богданович Д.М. (2020) установил, что гомеостатические параметры организма в значительной степени зависят от функционального значения микроэлементов, так как они обеспечивают организм химически активными катионами и анионами [3].

Прежде чем перейти к подробному изучению физиологического и биохимического воздействия каждого микроэлемента, необходимо подчеркнуть, что их способность к образованию биокластеров является основополагающей для проявления биологической активности. Другими словами, они способны формировать как подвижные, так и устойчивые биологические комплексы, которые чаще всего находятся в активных центрах ферментов. Именно эти биоконплексы играют непосредственную роль в кислотно-основных реакциях и окислительно-восстановительных процессах, осуществляемых в организме птицы [4]. Растительная пища — основной поставщик необходимых минеральных веществ для животных и птицы. Однако, минеральный состав растительных кормов может существенно варьироваться. Эти колебания обусловлены не только биохимическими особенностями различных территорий страны, но и спецификой отдельных регионов [5].

В современных научных исследованиях акцентируется внимание на взаимодействии микроэлементов и эндокринной системы, а также влиянии гормонов на организм. Они играют важную роль в определении уровня естественной резистентности организма, поддержании иммунных

функций и обеспечении антиоксидантной защиты у животных. [6].

Микроэлементы присутствуют в тканях животных в незначительных, постоянных количествах, однако их роль в процессах роста и развития очень важна. Элементы Cu, Fe, Mn и Zn выполняют, прежде всего, функцию катализаторов в ферментативных реакциях, протекающих внутри клеток, либо являются компонентами ферментов. Эти элементы играют незаменимую роль в поддержании здоровья и жизнедеятельности [7].

Железо принимает участие в процессах транспортировки и хранения железа внутри клеток, а также регуляции активности железосодержащих ферментов, как стимулируя, так и подавляя их экспрессию [8]. Медь — в обеспечении клеточного дыхания, поддержании здоровья сердца и сосудов, создании костей, развитии компонентов соединительной ткани, образовании кератина и пигментов в тканях [9].

Одним из перспективных направлений в современной науке, позволяющих решить вопросы этиологии и патогенеза заболеваний, является выявление и определение изменений в содержании макро- и микроэлементов, а также их коррекции. Учитывая биологическую роль микроэлементов, участие металлов и радиоизотопов практически во всех биохимических процессах в организме животных и птицы, вопросы загрязнения окружающей среды волнуют сегодня не только экологов, но и специалистов сельского хозяйства [10]. Очевидно, что важно оценивать не только валовое содержания того или иного элемента, но и учитывать соотношение различных изотопов конкретного элемента, вводимого в рацион животных и птицы, так как его избыточное поступление/усвоение может спровоцировать изотопный дисбаланс и повлиять на проявление патологии.

Цель исследования — изучить рост и развитие цыплят-бройлеров, переваримость компонентов корма, морфо-биохимические показатели крови, а также обмен элементов в теле под влиянием изотопов УДЧ.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Исследования проводили в период 2024–2025 гг. на базе отдела кормления сельскохозяйственных животных и технологии кормов им. профессора С.Г. Леушина ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук» (Оренбург, Россия).

Обслуживание животных и экспериментальные исследования осуществлялись в соответствии с требованиями инструкций и рекомендаций к выполнению биологических исследований. При проведении исследований были предприняты меры, чтобы свести к минимуму страдания

животных и уменьшить количество исследованных опытных образцов.¹

Объектом исследований служили цыплята-бройлеры кросса Арбор Эйкрес (Arbor Acres), полученные от ЗАО «Птицефабрика Оренбургская». Для эксперимента было отобрано 105 голов 7-дневных цыплят-бройлеров, которых методом пар-аналогов разделили на 3 группы (n = 30). Во время эксперимента вся птица находилась в одинаковых условиях содержания. Поение осуществлялось вволю. Формирование общих рационов (ОР) для подопытной птицы в ходе исследований проводилось с учетом рекомендаций ВНИТИП (Всероссийский научно-исследовательский и технологический институт птицеводства, Россия).

В ходе проведения исследований по изучению воздействия изотопов УДЧ Fe⁵⁶, Cu⁶³ на подопытную птицу были сформированы следующие группы (таблица 1).

Использованная дозировка в эксперименте была выбрана на основании ранее полученных данных [11]. УДЧ Cu⁶³ были синтезированы с помощью метода конденсации паров металла в газе в институте физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН (г. Екатеринбург) из проволоки соответствующего состава. Средний размер НЧ составляет около 60 нм. УДЧ Fe⁵⁶ были получены от АО «ПО Электрохимический завод».

Декапитация птицы проводилась под нембутовым эфиром на 42-е сутки жизни.

Лабораторные исследования проводили в Испытательном центре ЦКП ФНЦ Федерального научного центра биологических систем и агротехнологий Российской академии наук.

В ходе экспериментальных исследований УДЧ были приготовлены путем диспергирования водных смесей частиц ультразвуком (f — 35 кГц, N — 300 (450) Вт, A — 10 мкм) в течение 30 минут, смешивание проводилось ступенчато.

Сохранность поголовья учитывали ежедневным осмотром подопытной птицы. Динамику живой массы молодняка определяли по результатам еженедельных взвешиваний, на основании которых рассчитывали абсолютный, относительный и среднесуточный прирост живой массы.

В ходе опыта устанавливали переваримость питательных компонентов рациона по методикам ВНИТИП (Фисинин В.И. и др., 2009). Исходя из результатов ежесуточного учета массы помета, производили расчет потери веществ с установлением усвоенного количества корма².

Массовую долю сухого вещества (СВ) определяли по ГОСТ 31640³, сырого протеина (СП) — по ГОСТ 13496.4⁴, массовую долю сырого

Таблица 1. Схема опыта

Table 1. Experimental design

Группа (n = 35)	Обозначение	Рацион
Контрольная группа	K	Основной рацион (ОР)
Опытная группа	I	ОР + изотоп УДЧ Fe ⁵⁶ (17 мг/кг корма)
Опытная группа	II	ОР + изотоп УДЧ Cu ⁶³ (1,7 мг/кг корма)

жира (СЖ) — по ГОСТ 13496.15⁵, массовую долю сырой клетчатки (СК) — по ГОСТ 31675⁶, массовую долю сырой золы (СЗ) — по ГОСТ 26226⁷.

Для оценки элементного состава проведена анатомическая разделка тушек (кости, перья, внутренние органы) с последующим измельчением и озолением в микроволновой системе разложения Multiwave 3000 («Anton Paar», Австрия). Оценку содержания элементов в тушке определяли на масс-спектрометре Elan 9000 («Perkin Elmer», США) и атомно-эмиссионном спектрометре Optima 2000V («Perkin Elmer», США).

Отбор крови у птиц осуществлялся утром в 42-суточном возрасте из подкрыльцовой вены, на внутренней стороне крыла над локтевым сочленением, в количестве 2 мл. Для морфологических исследований использовали специальные вакуумные пробирки, где в качестве антикоагулянта применяется ЭДТА — фиолетовая крышка (стерильные вакуумные пробирки объемом 4,0 мл). Морфологические показатели крови определяли на гематологическом анализаторе URIT-2900 Vet Plus, биохимический анализ сыворотки крови — на анализаторе CS-T240 (DIRUI Industrial Co., Ltd, Китай) с коммерческими наборами для ветеринарии (ЗАО «ДИАКОН-ДС», Россия). В биохимических исследованиях применяли пробирки с активатором свертывания.

Для оценки влияния нутриентной обеспеченности рационов на метаболические процессы в организме цыплят были просчитаны некоторые коэффициенты и индексы: коэффициент Де Ритиса (отношение АСТ (аспартатаминотрансфераза)/АЛТ (аланинаминотрансфераза) (Медицинская энциклопедия, 1991–1996).

Для оценки эндогенных потерь был введен нормированный индекс эндогенных потерь (EPI, %), отражающий относительную долю элемента, теряемую организмом за счет эндогенной секреции.

Полученные данные были обработаны с помощью программы SPSS «Statistics 20» («IBM», США), рассчитывали средние (M), среднеквадратичные отклонения ($\pm \sigma$), ошибки стандартного отклонения ($\pm SE$). Для сравнения вариантов использовали непараметрический метод анализа. Различия

¹ Сарымсакова Б.Е., Розенсон Р.И., Баттакова Ж.Е. Руководство по этике научных исследований: методические рекомендации. Астана. 2007; 98.

² Научные основы кормления сельскохозяйственной птицы: монография / В.И. Фисинин, И.А. Егоров, Т.М. Околелова, Ш.А. Имангулов. Сергиев Посад: Всероссийский научно-исследовательский и технологический институт птицеводства, 2009. 352 с.

³ ГОСТ 31640-2012 Межгосударственный стандарт корма. Методы определения содержания сухого вещества.

⁴ ГОСТ 13496.4-2019 Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания азота и сырого протеина.

⁵ ГОСТ 13496.15-2016 Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения массовой доли сырого жира.

⁶ ГОСТ 31675-2012 Корма. Методы определения содержания сырой клетчатки с применением промежуточной фильтрации

⁷ ГОСТ 26226-95 Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения сырой золы.

считали статистически значимыми при $p \leq 0,05$, $p \leq 0,01$.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Живая масса опытной птицы определялась каждые 7 дней эксперимента с 14-суточного возраста цыплят. Результаты представлены на графике (рисунок 1).

Динамика живой массы отличалась в опытных группах, по сравнению с контрольной, начиная со 2 недели эксперимента. На 14 день опыта в I опытной группе живая масса была выше контроля на 2,1%, во II опытной — на 1,5%. На 21 день опыта было отмечено статистически значимое различие с контрольными показателями по живой массе в I группе (на 6,0 %, $p < 0,05$), в то время как различия с контролем во II опытной группе были не достоверны. На конец эксперимента (28 день опыта) было выявлено, что в I опытной группе живая масса была выше контрольных показателей на 5,2% ($p < 0,05$). Таким образом, введение УДЧ в рацион цыплят-бройлеров вело к изменению динамики набора живой массы по сравнению с контролем, наиболее выраженное в I опытной группе (на 2,1–6,0 %) на конец эксперимента.

Переваримость питательных веществ

Сегодня подбор кормовых добавок для повышения переваримости и усвояемости питательных веществ рационов у птицы является одним из приоритетных направлений исследований. Это позволяет обеспечить больший выход мясной продукции более высокого качества.

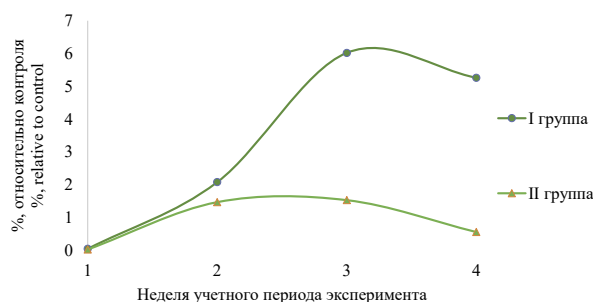
В данном эксперименте было изучено воздействие УДЧ в рацион цыплят-бройлеров на переваримость сухого и органического вещества, сырого жира, протеина и углеводов. Были получены следующие результаты (рисунок 2).

Переваримость сухого вещества в рационе цыплят-бройлеров была на 3,74% и 2,95% выше контроля в I и II опытной группе, однако различия были статистически незначимы. Переваримость органического вещества была выше контроля в I и II группе (на 4,51% и 4,06%, соответственно, $p < 0,05$). Переваримость сырого жира повышалась при введении в рацион кормовых добавок в I и II опытной группе (на 5,66% и 7,04%, соответственно, $p < 0,05$). Наибольшая переваримость питательных веществ рациона при введении кормовых добавок цыплятам-бройлерам была отмечена для сырого протеина. Показатели переваримости сырого протеина были достоверно выше контроля на 16,2% и 16,7% ($p < 0,05$), соответственно, в I и II опытной группе. Переваримость углеводов корма в опытных группах не обнаруживала статистически значимых различий с контрольными показателями.

Результаты Scherzad A., et al. (2017) показали, что Cu, Fe, Mn и Zn способны к образованию гидроксиполимеров и хорошо растворяются в кислой среде. Однако в нейтральных условиях

Рис. 1. Динамика изменений показателей живой массы птицы (в %, относительно контроля)

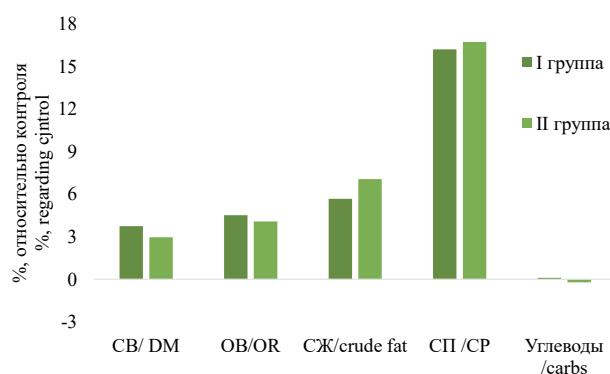
Fig. 1. Dynamics of live weight indicators of poultry (in %, relative to control)



Примечание: * — $p \leq 0,05$; ** — $p \leq 0,01$ при сравнении с контрольным образцом

Рис. 2. Показатели переваримости питательных веществ рационов опытной птицы (в %, относительно контроля)

Fig. 2. Digestibility indices of nutrients in diets of experimental poultry (in %, relative to the control)



кишечника они быстро преобразуются в нерастворимые гидроксидные соединения, выпадающие в осадок. Следовательно, абсорбция этих микроэлементов, вероятно, зависит от секреции желудочного сока в желудке. Существенное падение кислотности желудочного сока способно уменьшить концентрацию растворенных и, как следствие, биодоступных металлов в желудке [12].

Таким образом, переваримость питательных веществ рациона (органического вещества и сырого жира) при даче цыплятам-бройлерам кормовых добавок была, преимущественно, выше контроля в I и II опытной группе. При этом переваримость сырого протеина была выше контроля на 9,55–16,7% во всех опытных группах.

Морфологические показатели крови

На 28 сутки эксперимента были определены показатели морфологии крови цыплят-бройлеров при введении опытных УДЧ в рацион (таблица 2).

Было показано, что содержание эритроцитов в периферической крови изменялось (на 11,8% и 5,4% выше контроля в I и II опытной группе, соответственно), однако различия с контролем были не достоверны. Содержание гемоглобина в I опытной групп было выше контроля на 10,4% ($p < 0,05$).

Число лейкоцитов находилось в пределах физиологической нормы в крови опытной птицы, а число лимфоцитов имело тенденцию к повышению

Таблица 2. Морфологические показатели крови цыплят-бройлеров при введении опытных добавок в рацион

Table 2. Morphological blood parameters in broiler chickens following the introduction of experimental dietary supplements

Показатели	Группы		
	контрольная	I опытная	II опытная
Эритроциты, 10^{12} г/л	3,46 ± 0,18	3,87 ± 0,22	3,65 ± 0,25
Гемоглобин, г/л	125,40 ± 4,47	138,21 ± 5,18*	127,00 ± 3,69
Лейкоциты, 10^9 г/л	31,81 ± 2,81	33,22 ± 3,60	30,90 ± 2,71
Лимфоциты, 10^{12} г/л	55,11 ± 1,19	58,70 ± 1,06*	58,91 ± 0,95*
Моноциты, 10^{12} г/л	7,37 ± 0,22	7,69 ± 0,29	8,22 ± 0,24
Тромбоциты, 10^{12} г/л	76,52 ± 3,15	78,40 ± 2,79	76,02 ± 4,47

Примечание: * — $p \leq 0,05$ при сравнении с контрольным образцом

в I и II опытной группе (на 6,5% и 6,8%, соответственно, по сравнению с контролем, $p < 0,05$). Это может свидетельствовать о повышении иммунного статуса опытной птицы и усилении иммунного ответа организма в ответ на введение опытных добавок. При этом количество моноцитов в периферической крови птицы не обнаруживало статистически значимых различий с контрольными показателями птиц, получавших только основной рацион. Количество тромбоцитов в крови цыплят также не обнаруживало тенденции к изменению, по сравнению с контрольными значениями в эксперименте. Отмечено изменение гематологических показателей крови птицы, выразившееся в усилении защитных сил организма в I и II опытной группе, повышении гемоглобина в I и его снижение — во II группе.

Экспериментальными исследованиями Гарипова Н.В. и др. (2022) установлено, что введение УДЧ, таких как Cu и Co, в рацион телят приводит к стимуляции активности церулоплазмينا, повышению уровня тиоловых соединений, сульфгидрильных групп и гамма-глобулиновой фракции протеинов в сыворотке крови. Это, в свою очередь, способствует увеличению скорости набора веса у животных. Вероятно, лишь небольшая доля биогенных металлов, присутствующих в корме, способна образовывать комплексы, легко усваиваемые организмом [13].

Биохимические показатели сыворотки крови

Для изучения особенностей функционирования различных систем организма подопытной птицы в эксперименте было выполнено исследование показателей биохимии сыворотки крови (таблица 3).

Повышение общего билирубина в крови опытных животных было выше контроля на 76,9% и 61,5% в I и II опытной группе, соответственно, что может быть связано с высоким уровнем гемоглобина в опытных группах, и как результат расщепления белков, содержащих гем. Содержание АЛТ в крови цыплят-бройлеров не имело достоверных различий с контрольной группой. При этом показатель АСТ был выше контроля в I опытной группе (на 12,54 %, $p < 0,05$), что может свидетельствовать о повреждении гепатоцитов, например, особенно с высоким уровнем

Таблица 3. Биохимические показатели крови цыплят-бройлеров при введении опытных добавок в рацион (n = 35)

Table 3. Biochemical parameters of blood in broiler chickens upon inclusion of experimental dietary supplements (n = 35)

Показатели	Группы		
	контрольная	I опытная	II опытная
Общий белок, г/л	44,61 ± 1,12	49,30 ± 0,76*	49,80 ± 2,07*
Альбумины, г/л	18,01 ± 0,92	20,50 ± 1,02	18,10 ± 0,28
Глюкоза, ммоль/л	7,70 ± 0,35	8,10 ± 0,29	7,90 ± 0,33
Общий билирубин, мкмоль/л	0,39 ± 0,11	0,69 ± 0,09*	0,63 ± 0,14*
АЛТ, Ед/л	6,38 ± 0,94	6,92 ± 1,03	6,87 ± 0,87
АСТ, Ед/л	45,51 ± 22,92	51,60 ± 18,47*	46,90 ± 22,15
Коэффициент де Ритиса	7,13	7,45	6,82
Мочевина, ммоль/л	0,58 ± 0,07	0,65 ± 0,05	0,62 ± 0,12
Креатинин, мкмоль/л	32,31 ± 0,96	39,42 ± 1,11*	33,22 ± 0,68
Железо, мкмоль/л	18,72 ± 0,74	22,31 ± 1,17*	16,71 ± 0,83
Магний, ммоль/л	0,93 ± 0,05	1,09 ± 0,03*	1,03 ± 0,08
Кальций, ммоль/л	3,03 ± 0,14	3,29 ± 0,12	3,13 ± 0,09
Фосфор, ммоль/л	2,14 ± 0,09	2,27 ± 0,17	2,12 ± 0,12

Примечание: * — $p \leq 0,05$ при сравнении с контрольным образцом

билирубина у цыплят-бройлеров. Коэффициент де Ритиса в опытных группах увеличивался по сравнению с контрольной группой цыплят: в I группе на 4,2% ($P \leq 0,05$), что может говорить о проблемах также сердечно-сосудистой системы. При этом II опытная группа, получавшая УДЧ Cu⁶³, по данному коэффициенту была ниже на 0,31.

Уровень общего белка в сыворотке крови цыплят-бройлеров увеличивался во всех опытных группах: в I опытной (на 9,99%) и II опытной (на 10,99%) ($p < 0,05$) относительно контрольной группы птицы.

Мирошников С.А. и др. (2019) выявил критически важную связь между микроэлементами и работой ферментных систем в организме животных. Одно- и двухвалентные ионы металлов интегрированы в структуру ферментов, имеющих асимметричное строение, что является причиной их повышенной каталитической способности. Ряд микроэлементов, таких как медь, цинк, кобальт и марганец, в форме ионов напрямую включаются в активный центр ферментов, оказывая значительное влияние на их функциональность [14].

Уровень мочевины в сыворотке крови не имел статистически значимых различий с контрольными значениями. Количество креатинина в крови птицы было выше контроля в I опытной группе (на 21,9%, $p < 0,05$). Это может являться косвенным свидетельством усиления белкового обмена в организме птицы.

Исследования демонстрируют, что микроэлементы в форме ультрадисперсных частиц характеризуются повышенной биодоступностью по сравнению с традиционно используемыми в кормах неорганическими соединениями, такими как оксиды, сульфаты и карбонаты [15, 16].

Далее были рассмотрены показатели содержания минеральных веществ в крови птицы. Было

обнаружено, что содержание железа в крови было выше контроля в I группе при введении ультрадисперсных частиц одноименного изотопа элемента (на 19,2%, $p < 0,05$). В I группе также увеличивалось содержание магния в сыворотке крови — на 17,2% выше контроля ($p < 0,05$). Содержания кальция и фосфора в опытных группах не имело статистически значимых различий по сравнению с показателями контрольной группы.

Таким образом, изученные биохимические показатели сыворотки крови птицы свидетельствуют об усилении обменных процессов в I и II группах.

Содержание минеральных веществ

Внесение опытных добавок в рацион цыплят-бройлеров привело к различным изменениям в содержании химических элементов в организме птицы (рисунок 3).

Для I опытной группы было характерно, преимущественно, снижение содержания токсичных элементов в теле птицы по сравнению с контролем — Cd, Co, Hg, Sn, Pb, Ni, Sr, Cr и Zn на 97,2; 89,3; 76,2; 67,3; 61,2; 45,7; 39,7; 39,1 и 23,6%, соответственно ($p < 0,05$). При этом, по сравнению с контролем, в теле птицы данной группы повышалось содержание макро- и эссенциальных микроэлементов — Na, Mg, Si, As, P, Ca и Fe на 5,2; 7,4; 7,9; 8,3; 21,6; 37,4 и 65,7%, соответственно ($p < 0,05$).

Препараты наночастиц меди, введенные в организм животных, обладают пролонгированным действием и меньшей токсичностью по сравнению с солями. Наночастицы Cu при введении в организм стимулируют механизмы регуляции микроэлементного состава и активность антиоксидантных ферментов [17].

Для II опытной группы тенденция к изменению содержания в теле химических элементов, по сравнению с контролем, представлена на рисунке 4.

Можно выделить группу элементов, содержание которых уменьшалось, по сравнению с контрольными показателями — Sn, Sr, Hg, Co, Pb и Zn на 98,0; 86,5; 78,3; 69,7; 56,7 и 12,1%, соответственно ($p < 0,05$). Данные элементы относятся к токсичным элементам. Пул элементов, чье содержание было выше контроля составили I, Cr, Al, Mn, Si, Cu, P, Se, Mg, Ca, K и Na — на 6,6; 6,8; 9,3; 10,8; 12,0; 12,6; 12,8; 15,6; 23,2; 29,0; 36,7 и 56,4%, соответственно ($p < 0,05$).

Таким образом, в I и II опытной группе отмечалась тенденция к уменьшению содержания в теле птицы токсичных элементов и увеличению — эссенциальных элементов.

Эндогенные потери

В ходе исследования была проведена оценка влияния опытных добавок на эндогенные потери химических элементов в теле цыплят-бройлеров (таблица 4).

Введение кормовой добавки в I группе позволило снизить эндогенные потери, по сравнению с контролем, железа (на 5,6%), меди (на 6,8%) и

Рис. 3. Изменение содержания химических элементов в теле птицы I опытной группы (в %, относительно контроля)
Fig. 3. Change in the content of chemical elements in the body of birds from the first experimental group (in % relative to the control).

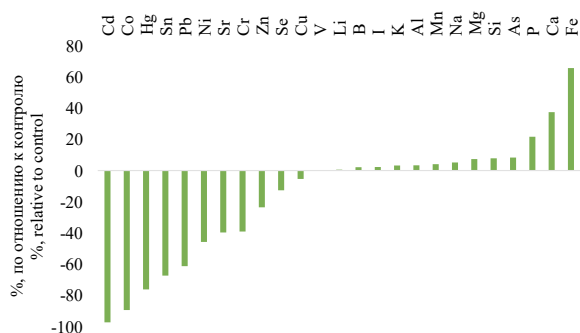


Рис. 4. Изменение содержания химических элементов в теле птицы II опытной группы (в %, относительно контроля)
Fig. 4. Change in the content of chemical elements in the body of birds from the second experimental group (in % relative to the control)

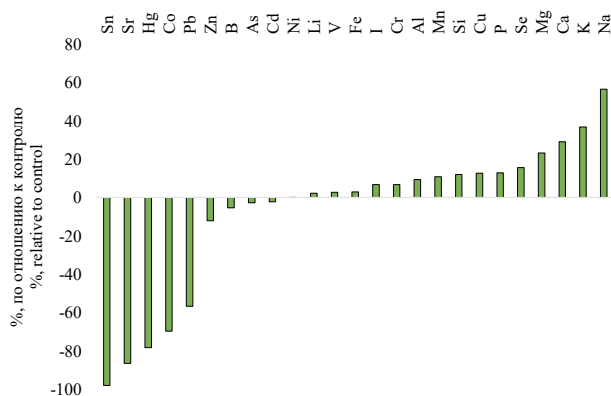


Таблица 4. Эндогенные потери химических элементов в тушке цыплят-бройлеров (% по отношению к контрольной группе)

Table 4. Endogenous losses of chemical elements in the carcasses of broiler chickens (% relative to the control group)

Химический элемент	Группы	
	I опытная	II опытная
Fe	+5,6	-2,7
Cu	+6,8	-19,0
Mn	+10,4	-6,1
Zn	-5,7	-12,4
Se	-6,1	-3,5
Co	-36,8	-45,0

марганца (на 10,4%). При этом во II опытной группе для всех изучаемых элементов было характерно увеличение эндогенных потерь, по сравнению с контрольными показателями.

Помимо неоспоримых положительных свойств нано-частиц, большинство исследователей указывает на некоторые отрицательные стороны применения препаратов на их основе, которые определяются цитотоксическим, генотоксическим и другими негативными воздействиями как на организм, так и на экологию в целом [18]. Особенно это касается размера наночастиц. При их уменьшении (до 5–10 нм) отмечаются негативные последствия на организм [19]. При попадании в

организм животных повышенных доз нано-частиц металлов, таких как кадмий, свинец, селен и др. (особенно малых размеров), может отмечаться их накопление в организме животных и человека, что ведет к выраженному нейротоксическому эффекту, изменяет ход течения патологий [20].

Таким образом, в I опытной группе отмечалось снижение эндогенных потерь Fe и Cu. Для II опытной группы было характерно увеличение эндогенных потерь по сравнению с контролем.

На основании проведенных исследований была отмечена перспективность дальнейшего изучения кормовых опытных добавок, используемых в I и II опытной группе, по совокупности изучения показателей морфо-биохимических показателей и обмена веществ для изучения возможности внедрения в практику сельского хозяйства.

Выводы/Conclusions

Усвоение и обмен веществ наночастиц в организме птиц обусловлены их физико-химическими характеристиками. Это — ключевой фактор, демонстрирующий потенциал использования наночастиц как действенного источника изотопов УДЧ

меди и железа для бройлеров, а также расширения их применения в рационе сельскохозяйственной птицы.

В данной работе было показано, что существует потенциал использования изотопов ^{63}Cu и ^{56}Fe в качестве компонентов для моделирования искусственных депо микроэлементов с минимальным воздействием на нормальную микрофлору кишечника. Учитывая отсутствие выраженного антимикробного эффекта, данные изотопы потенциально безопасны при создании кормовых добавок или фармакологических форм, направленных на восполнение дефицита микроэлементов у сельскохозяйственных животных [21].

На сегодняшний день существует очень ограниченное число исследований, отражающих использование нерадиоактивных изотопов в кормлении животных. С учетом полученных результатов можно предположить, что внесение изотопов металлов в корма птице может служить дополнительным депо элементов, что подтверждается расчетом эндогенных потерь при введении изотопов железа, а также позволит регулировать содержание в теле эссенциальных и токсичных элементов.

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

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-16-00111

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кван О.В. Эндогенные потери веществ: оптимизация микро-нутриентной обеспеченности рационов сельскохозяйственных животных (обзор). *Животноводство и кормопроизводство*. 2023; 106(4): 148–163. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-4-148>
2. Gadde U., Kim W.H., Oh S.T., Lillehoj H.S. Alternatives to antibiotics for maximizing growth performance and feed efficiency in poultry: a review. *Animal Health Research Reviews*. 2017; 18(1): 26–45. <https://doi.org/10.1017/S1466252316000207>
3. Singh V.V, Singh V.K, Tewari D., Gautam S., Singh V.B, Singh P. Performance of Broiler Chicken Fed Diets Supplemented with a Phyto-genic Mixture. *Indian Journal of Animal Nutrition*. 2019; 36(1): 58–64. <https://doi.org/10.5958/2231-6744.2019.00010.0>
4. Jiao L. et al. Preparation, characterization, antimicrobial and cytotoxicity studies of copper/zinc- loaded montmorillonite. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2017; 8: 27. <https://doi.org/10.1186/s40104-017-0156-6>
5. Liu S.Y., Macelline S.P., Chrystal P.V., Selle P.H. Progress towards reduced-crude protein diets for broiler chickens and sustainable chicken-meat production. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2021; 12: 20. <https://doi.org/10.1186/s40104-021-00550-w>
6. Yadav S., Jha R. Strategies to modulate the intestinal microbiota and their effects on nutrient utilization, performance, and health of poultry. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2019; 10: 2. <https://doi.org/10.1186/s40104-018-0310-9>
7. Espinosa C.D., Stein H.H. Digestibility and metabolism of copper in diets for pigs and influence of dietary copper on growth performance, intestinal health, and overall immune status: a review. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2021; 12: 13. <https://doi.org/10.1186/s40104-020-00533-3>
8. Byrne L., Murphy R.A. Relative Bioavailability of Trace Minerals in Production Animal Nutrition: A Review. *Animals*. 2022; 12(15): 1981. <https://doi.org/10.3390/ani12151981>
9. Sai Kumar B.A.A. Hormonal Regulation of Metabolism, Water, and Minerals. Das P.K., Sejian V., Mukherjee J., Banerjee D. (eds.). *Textbook of Veterinary Physiology*. Singapore: Springer. 2023; 391–415. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9410-4_16

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

FUNDING

The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation №. № 25-16-00111

REFERENCES

1. Kvan O.V. Endogenous losses of substances: optimization of micronutrient supply of farm animal diets (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023; 106(4): 148–163 (in Russian). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-4-148>
2. Gadde U., Kim W.H., Oh S.T., Lillehoj H.S. Alternatives to antibiotics for maximizing growth performance and feed efficiency in poultry: a review. *Animal Health Research Reviews*. 2017; 18(1): 26–45. <https://doi.org/10.1017/S1466252316000207>
3. Singh V.V, Singh V.K, Tewari D., Gautam S., Singh V.B, Singh P. Performance of Broiler Chicken Fed Diets Supplemented with a Phyto-genic Mixture. *Indian Journal of Animal Nutrition*. 2019; 36(1): 58–64. <https://doi.org/10.5958/2231-6744.2019.00010.0>
4. Jiao L. et al. Preparation, characterization, antimicrobial and cytotoxicity studies of copper/zinc- loaded montmorillonite. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2017; 8: 27. <https://doi.org/10.1186/s40104-017-0156-6>
5. Liu S.Y., Macelline S.P., Chrystal P.V., Selle P.H. Progress towards reduced-crude protein diets for broiler chickens and sustainable chicken-meat production. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2021; 12: 20. <https://doi.org/10.1186/s40104-021-00550-w>
6. Yadav S., Jha R. Strategies to modulate the intestinal microbiota and their effects on nutrient utilization, performance, and health of poultry. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2019; 10: 2. <https://doi.org/10.1186/s40104-018-0310-9>
7. Espinosa C.D., Stein H.H. Digestibility and metabolism of copper in diets for pigs and influence of dietary copper on growth performance, intestinal health, and overall immune status: a review. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2021; 12: 13. <https://doi.org/10.1186/s40104-020-00533-3>
8. Byrne L., Murphy R.A. Relative Bioavailability of Trace Minerals in Production Animal Nutrition: A Review. *Animals*. 2022; 12(15): 1981. <https://doi.org/10.3390/ani12151981>
9. Sai Kumar B.A.A. Hormonal Regulation of Metabolism, Water, and Minerals. Das P.K., Sejian V., Mukherjee J., Banerjee D. (eds.). *Textbook of Veterinary Physiology*. Singapore: Springer. 2023; 391–415. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9410-4_16

10. Kvan O.V., Sizova E.A., Vershinina I.A., Kamirova A.M. Изучение влияния ультрадисперсных частиц меди и железа на минеральный обмен в организме цыплят-бройлеров, находящихся на полусинтетической диете. *Аграрная наука*. 2022; (6): 48–51. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-360-6-48-51>
11. Sizova E.A., Miroshnikov S.A., Lebedev S.V., Levakhin Yu.I., Babicheva I.A., Kosilov V.I. Сравнительные испытания ультрадисперсного сплава, солей и органических форм Cu и Zn как источников микроэлементов в кормлении цыплят-бройлеров. *Сельскохозяйственная биология*. 2018; 53(2): 393–403. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2018.2.393rus>
12. Scherzad A., Meyer T., Kleinsasser N., Hackenberg S. Molecular Mechanisms of Zinc Oxide Nanoparticle-Induced Genotoxicity. *Materials*. 2017; 10(12): 1427. <https://doi.org/10.3390/ma10121427>
13. Гарипова Н.В., Рязанов В.А. Ультрадисперсные частицы железа в животноводстве. *Микроэлементы в медицине*. 2022; 23(4): 3–13. <https://doi.org/10.19112/2413-6174-2022-23-4-3-13>
14. Мирошников С.А., Гарипова Н.В., Холодиллина Т.Н., Курилкина М.Я., Дускаев Г.К. Продуктивное действие и переваримость кормов при использовании в кормлении птицы микрочастиц железа. *Животноводство и кормопроизводство*. 2018; 101(2): 7–16. EDN XZCKLZ
15. Adegbeye M.J. *et al.* Nanoparticles in Equine Nutrition: Mechanism of Action and Application as Feed Additives. *Journal of Equine Veterinary Science*. 2019; 78: 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2019.04.001>
16. Fan X., Yang F., Nie C., Ma L., Cheng C., Haag R. Biocatalytic Nanomaterials: A New Pathway for Bacterial Disinfection. *Advanced Materials*. 2021; 33(33): 2100637. <https://doi.org/10.1002/adma.202100637>
17. Fisinin V.I., Miroshnikov S.A., Sizova E.A., Ushakov A.S., Miroshnikova E.P. Metal particles as trace-element sources: current state and future prospects. *World's Poultry Science Journal*. 2018; 74(3): 523–540. <https://doi.org/10.1017/S0043933918000491>
18. Sizova E.A. Влияние включения в рацион наночастиц меди на уровень кадмия в организме цыплят-бройлеров. *Вестник мясного скотоводства*. 2017; (1): 13–20. EDN YHPSKZ
19. Lebedev S. *et al.* Use of chromium nanoparticles as a protector of digestive enzymes and biochemical parameters for various sources of fat in the diet of calves. *AIMS Agriculture and Food*. 2021; 6(1): 14–31. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2021002>
20. Xiao M. *et al.* Taurine regulates mucosal barrier function to alleviate lipopolysaccharide-induced duodenal inflammation in chicken. *Amino Acids*. 2018; 50(11): 1637–1646. <https://doi.org/10.1007/s00726-018-2631-6>
21. Гречкина В.В., Кван О.В., Шейда Е.В., Быков А.В. Экспериментальная оценка биотоксичности изотопов Cu-63 и Fe-56 в отношении смоделированной микрофлоры. *Актуальные проблемы прикладной биотехнологии и инженерии. Сборник материалов Международной научно-практической конференции*. Оренбург: Оренбургский государственный университет. 2025; 174–181. EDN MPETUC
10. Kvan O.V., Sizova E.A., Vershinina I.A., Kamirova A.M. Study of the effect of ultrafine particles of copper and iron on mineral metabolism in the body of broiler chickens on a semisynthetic diet. *Agrarian science*. 2022; (6): 48–51 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-360-6-48-51>
11. Sizova E.A., Miroshnikov S.A., Lebedev S.V., Levakhin Yu.I., Babicheva I.A., Kosilov V.I. Comparative tests of various sources of microelements in feeding chicken-broilers. *Agricultural Biology*. 2018; 53(2): 393–403. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2018.2.393eng>
12. Scherzad A., Meyer T., Kleinsasser N., Hackenberg S. Molecular Mechanisms of Zinc Oxide Nanoparticle-Induced Genotoxicity. *Materials*. 2017; 10(12): 1427. <https://doi.org/10.3390/ma10121427>
13. Garipova N.V., Ryzanov V.A. Ultrafine iron particles in animal husbandry (a review). *Trace elements in medicine*. 2022; 23(4): 3–13 (in Russian). <https://doi.org/10.19112/2413-6174-2022-23-4-3-13>
14. Miroshnikov S.A., Garipova N.V., Kholodilina T.N., Kurilkina M.Ya., Duskaev G.K. Productive action and digestibility of feeds after using iron microparticles for feeding of poultry. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2018; 101(2): 7–16 (in Russian). EDN XZCKLZ
15. Adegbeye M.J. *et al.* Nanoparticles in Equine Nutrition: Mechanism of Action and Application as Feed Additives. *Journal of Equine Veterinary Science*. 2019; 78: 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2019.04.001>
16. Fan X., *et al.* Biocatalytic nanomaterials: a new pathway for bacterial disinfection. *Adv Mater*. 2021;33(33):e2100637. <https://doi.org/10.1002/adma.202100637>
17. Fisinin V.I., Miroshnikov S.A., Sizova E.A., Ushakov A.S., Miroshnikova E.P. Metal particles as trace-element sources: current state and future prospects. *World's Poultry Science Journal*. 2018; 74(3): 523–540. <https://doi.org/10.1017/S0043933918000491>
18. Sizova E.A. Effect of copper nanoparticles introduced to the diet on cadmium level of broiler chickens. *Herald of beef cattle breeding*. 2017; (1): 13–20 (in Russian). EDN YHPSKZ
19. Lebedev S. *et al.* Use of chromium nanoparticles as a protector of digestive enzymes and biochemical parameters for various sources of fat in the diet of calves. *AIMS Agriculture and Food*. 2021; 6(1): 14–31. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2021002>
20. Xiao M. *et al.* Taurine regulates mucosal barrier function to alleviate lipopolysaccharide-induced duodenal inflammation in chicken. *Amino Acids*. 2018; 50(11): 1637–1646. <https://doi.org/10.1007/s00726-018-2631-6>
21. Grechkina V.V., Kvan O.V., Sheyda Ye.V., Bykov A.V. Experimental assessment of the biotoxicity of Cu-63 and Fe-56 isotopes in relation to modeled microflora. *Actual problems of applied biotechnology and engineering. Collection of materials of the International scientific and practical conference*. Orenburg: Orenburg State University. 2025; 174–181 (in Russian). EDN MPETUC

ОБ АВТОРАХ

Ольга Вилориевна Кван^{1,2}
 доктор биологических наук
 kwan111@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0561-7002>
Виктория Владимировна Гречкина^{1,3}
 кандидат биологических наук
 Viktoria1985too@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1159-0531>
Елена Владимировна Шейда^{1,2}
 доктор биологических наук
 elena-shejjda@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2586-613>
Ирина Александровна Вершинина¹
 кандидат биологических наук
 gavrish.irina.ogu@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-9377-7673>

¹ Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, ул. 9 Января, 29, Оренбург, 460000, Россия

² Оренбургский государственный университет, пр. Победы, 13, Оренбург, 460018, Россия

³ Оренбургский государственный аграрный университет, ул. Челюскинцев, 18, Оренбург, 460014, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Olga Vilorievna Kvan^{1,2}
 Doctor of Biological Sciences
 kwan111@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0561-7002>
Viktoriya Vladimirovna Grechkina^{1,3}
 Candidate of Biological Sciences
 Viktoria1985too@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1159-0531>
Elena Vladimirovna Sheyda^{1,2}
 Doctor of Biological Sciences
 elena-snejjda@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2586-613>
Irina Aleksandrovna Vershinina
 Candidate of Biological Sciences
 gavrish.irina.ogu@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-9377-7673>

¹ Federal Scientific Center of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29 January 9th st., Orenburg, 460000, Russia

² Orenburg State University, 13 Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russia

³ Orenburg State Agrarian University, 18 Chelyuskintsev st., Orenburg, 460014, Russia