

Животноводство и кормопроизводство. 2026. Т. 109. № 2. С. 46-58.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2026. Vol. 109. No. 2. P. 46-58.

Научная статья
УДК 636.22/.28.082.13:577.17
doi: 10.33284/2658-3135-109-2-46

Оценка влияния смеси ультрадисперсных частиц на элементный статус цыплят-бройлеров

Алексей Петрович Тузиков¹, Сергей Александрович Мирошников²,
Ольга Вилориевна Кван³, Артем Владимирович Быков⁴

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

¹sergey_ru01@mail.ru

²rector_osu@mail.osu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1173-1952>

³kwan111@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0561-7002>

⁴artem19782@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4844-4631>

Аннотация: Современное промышленное птицеводство требует пересмотра подходов к минеральному питанию ввиду высокой продуктивности кроссов и низкой биодоступности традиционных неорганических солей микроэлементов. Перспективной является использование ультрадисперсных частиц металлов (УДЧ), однако их комплексное влияние на минеральный статус в организме птицы изучено недостаточно. Целью работы являлась оценка смеси УДЧ Fe, Cu, Zn и Mn на углеродной подложке на рост и элементный статус цыплят-бройлеров. Исследования показали, что дополнительное введение смеси УДЧ способствовало перераспределению минеральных веществ в тканях исследуемой птицы. В мышечной ткани опытной птицы выявлено достоверное увеличение кальция в 3,8 раза ($P \leq 0,001$), селена – на 24,6 % ($P \leq 0,05$) и хрома – на 27,2 % ($P \leq 0,05$) на фоне снижения натрия на 14,7 % ($P \leq 0,05$). В теле птицы отмечено значительное накопление никеля, йода, хрома и кобальта ($P \leq 0,001$). Важным эффектом стало снижение уровня токсичных элементов на 43,0-52,0 % ($P \leq 0,01$). Полученные данные свидетельствуют о том, что смесь УДЧ элементов способствует снижению содержания токсичных элементов в тканях и изменению распределения ряда макро- и микроэлементов в организме цыплят-бройлеров.

Ключевые слова: цыплята-бройлеры, кормление, ультрадисперсные частицы, минеральный обмен, элементный состав

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

Для цитирования: Оценка влияния смеси ультрадисперсных частиц на минеральный обмен в организме цыплят-бройлеров / А.П. Тузиков, С.А. Мирошников, О.В. Кван, А.В. Быков // Животноводство и кормопроизводство. 2026. Т. 109. № 2. С. 46-58. [Tuzikov AP, Miroshnikov SA, Kvan OV, Bykov AV. Assessment of the effect of a mixture of ultrafine particles on the elemental status of broiler chickens. Animal Husbandry and Fodder Production. 2026;109(2):46-58. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-109-2-46>

Original article

Assessment of the effect of a mixture of ultrafine particles on the elemental status of broiler chickens

Alexey P Tuzikov¹, Sergey A Miroshnikov², Olga V Kvan³, Artem V Bykov⁴

^{1,2,3,4}Orenburg State University named after VA Bondarenko, Orenburg, Russia

¹sergey_ru01@mail.ru

²rector_osu@mail.osu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1173-1952>

³kwan111@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0561-7002>

⁴artem19782@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4844-4631>

Abstract. Modern industrial poultry farming requires a revision of approaches to mineral nutrition due to the high productivity of crosses and low bioavailability of traditional inorganic salts of trace ele-

ments. The use of ultrafine metal particles (UMP) is promising; however, their comprehensive effect on the mineral status in the poultry body has not been sufficiently studied. The aim of the study was to evaluate the effect of a mixture of UMP of Fe, Cu, Zn and Mn on a carbon substrate on the growth and elemental status of broiler chickens. Studies have shown that the additional administration of the UMP mixture contributed to the redistribution of minerals in the tissues of the studied bird. In the muscle tissue of the experimental bird, a significant increase in calcium by 3.8 times ($P \leq 0.001$), selenium by 24.6% ($P \leq 0.05$) and chromium by 27.2% ($P \leq 0.05$) was detected against the background of a decrease in sodium by 14.7% ($P \leq 0.05$). Significant accumulation of nickel, iodine, chromium and cobalt ($P \leq 0.001$) was noted in the body of the bird. An important effect was a decrease in the level of toxic elements by 43.0-52.0% ($P \leq 0.01$). The data obtained indicate that the mixture of UMP elements helps to reduce the content of toxic elements in tissues and change the distribution of a number of macro- and microelements in the body of broiler chickens.

Keywords: broiler chickens, feeding, ultrafine particles, mineral metabolism, elemental composition

Acknowledgements: the work was carried out with the financial support of a grant for major scientific projects in priority areas of scientific and technological development (No. 075-15-2024-550).

For citation: Tuzikov AP, Miroshnikov SA, Kvan OV, Bykov AV. Assessment of the effect of a mixture of ultrafine particles on the elemental status of broiler chickens. Animal Husbandry and Fodder Production. 2026;109(2):46-58. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-109-2-46>

Введение.

Современное промышленное птицеводство как комплекс передовых решений в различных областях науки и техники во многом эффективно благодаря чрезвычайно высокому генетическому потенциалу современных пород и кроссов. Появление последних заставило практиков пересмотреть существовавшие ранее подходы к кормлению птицы, наращивая нормы ввода питательных и жизненно необходимых веществ. Это в полной мере относится и к минеральному питанию, нормы которого в последние десятилетия несколько раз пересматривались в сторону наращивания суточных дозровок жизненно необходимых химических элементов.

К числу последних относятся и микроэлементы – железо, медь, цинк и марганец, играющие ключевую роль в метаболических процессах (Jankowski J et al., 2019; Zulficar S et al., 2025).

В настоящее время эти вещества вводят в рацион птицы через применение минеральных солей. Этот подход имеет свои недостатки ввиду невысокой биологической доступности химических элементов из солей, способности негативно влиять на пищеварение. Важным негативным фактором применения минеральных солей в питании птицы является пагубное влияние на окружающую среду (Ouyang Z et al., 2021). В связи с этим наука сегодня ищет новые решения по оптимизации минерального питания птицы. Одним из таких решений является применение ультрадисперсных форм микроэлементов, которые обладают повышенной реакционной способностью и биологической доступностью (Gopi M et al., 2017) и при включении в корм позволяют повышать интенсивность роста, снижать расход кормов, способствовать улучшению состояния здоровья (Amlan P and Lalhriatpuii M, 2020) и улучшать конверсию корма животными в продукцию (Yusof HM et al., 2019). По мнению ряда авторов использование препаратов УДЧ металлов-микроэлементов в кормлении животных вполне конкурентоспособно по сравнению с практикой применения минеральных солей и органических форм (Сизова Е.А. и др., 2018).

Между тем несмотря на значительный интерес к данной тематике, механизмы действия металлов-микроэлементов в ультрадисперсной форме на элементный статус организма птицы еще пока не достаточно ясны. Так, в литературе (Мирошникова Е.П. и др., 2025) встречаются указания на значительное и выраженное действие препаратов УДЧ металлов на обмен химических элементов, далеко выходящее за пределы действия кормовых добавок – ультрадисперсных частиц как набора микроэлементов. Это выражается в изменениях минерального обмена в организме животных на фоне минимальных дозровок химических элементов в вводимой добавке УДЧ.

Цель исследования.

Оценить влияние смеси ультрадисперсных частиц микроэлементов на рост и элементный статус цыплят-бройлеров.

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Цыплята-бройлеры кросса «РОСС-308».

Обслуживание животных и экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с инструкциями и рекомендациями нормативных актов: Модельный закон Межпарламентской Ассамблеи государств-участников Содружества Независимых Государств "Об обращении с животными", ст. 20 (постановление МА государств-участников СНГ № 29-17 от 31.10.2007 г., протоколы Женевской конвенции и принципы надлежащей лабораторной практики (Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53434-2009). При проведении исследований были приняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов.

Схема эксперимента. Исследования проводились в условиях ОАО «Птицефабрика Оренбургская». Для эксперимента был оборудован цех размером 10 на 4 метра с трехъярусной батареей для содержания птицы, изготовленной компанией «Стимул Инк». Для проведения исследований было отобрано 128 голов десятисуточных цыплят-бройлеров (кросс РОСС-308), разделенных методом пар-аналогов на две группы по 64 головы: одна контрольная и одна опытная, размещенных на среднем ярусе. Средняя живая масса 64 голов цыплят-бройлеров сформированной контрольной группы составляла $341,3 \pm 2,9$ г, а опытной $341,4 \pm 2,6$ г (рис. 1). Птица контрольной группы получала стандартный рацион, опытная – стандартный рацион с добавлением кормовой добавки в виде ультрадисперсных частиц в дозировке 0,2 мг/кг корма, составляющих 0,01-0,16 % от суточного потребления птицей металлов-микроэлементов – железа, марганца, цинка и меди.

Смесь ультрадисперсных частиц железа, меди, цинка и марганца на углеродной подложке, в равных пропорциях. Препараты были синтезированы методом плазменно-дуговой технологией на углеродной матрице в Институте Теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН, размер частиц 40 нм.

Кормовая добавка вводилась в комбикорм в составе премикса. Комбикорм после смешивания гранулировали. Соотношение химических элементов в кормовой добавке УДЧ: углерода – 70 %; железа – 8 %; меди – 8 %; цинка – 8 % и марганца – 6 % соответственно.

Состав стартового комбикорма ПК-5-101-5: пшеница, жмых соевый, кукуруза, шрот соевый, жмых подсолнечный, мука мясокостная свиная, масло растительное, известняковая мука, синтетические аминокислоты, монокалийфосфат, витаминно-минеральный премикс, соль поваренная, органические кислоты, сорбент, сульфат натрия безводный, холин хлорид 70 %, пробиотик, эмульгатор жиров, ферменты, фитаза, антиоксидант.

В составе стартового комбикорма ПК-5-101-5 содержание железа составило 58,0 мг/кг; марганец – 89,0 мг/кг; цинк – 93,0 мг/кг и медь – 11,0 мг/кг. Доля микроэлементов, вводимых УДЧ в составе полнорационного комбикорма от общего суточного потребления птицей, составила 0,03 % по железу, 0,01 % – по марганцу, 0,02 % – по цинку и 0,16 % – по меди.

Состав ростового комбикорма ПК-6-101-7: пшеница, жмых соевый, кукуруза, шрот подсолнечный, мука мясокостная свиная, масло растительное, известняковая мука, синтетические аминокислоты, монокалийфосфат, витаминно-минеральный премикс, соль поваренная, органические кислоты, сорбент, сульфат натрия безводный, холин хлорид 70 %, пробиотик, эмульгатор жиров, ферменты, фитаза, антиоксидант.

В составе комбикорма ПК-6-101-7 содержание железа составило 67,0 мг/кг; марганца – 78,0 мг/кг; цинка – 82,0 мг/кг и меди – 9,0 мг/кг. Доля микроэлементов, вводимых УДЧ в составе полнорационного комбикорма от общего суточного потребления птицей, составила 0,02 % по железу, 0,02 % – по марганцу, 0,02 % – по цинку и 0,18 % – по меди.

Все группы цыплят-бройлеров содержались в идентичных условиях, режим кормления, поения, освещения и другие мероприятия строго соответствовали утвержденным технологическим регламентам и графикам. Кормление птицы проводилось неограниченно один раз в сутки. Учет поедаемости корма проводился ежедневно, по необходимости корректировалась норма корма на голову. Поение птицы проводилось без ограничения.

Контроль массы тела проводили путем индивидуального взвешивания утром перед кормлением в течение учетного периода при помощи электронных весов МТ 6 МГДА «Базар» (Мидл, г. Москва, Россия). Для определения элементного состава в мясе и в теле цыплят-бройлеров использовали метод масс-спектрометрии с индуктивной связанной плазмой Agilent 7900 с системой ВЭЖХ 1260 Infinity II BIO-Inert (Agilent Technologies, США). Элементный состав тела определяли в средних пробах, состоящих из мышечной ткани, костной, центрально-нервной системы, кожи, внутренних органов и жира, для анализа мяса отбирали мышечную ткань зон большеберцовой и бедренной костей после удаления костной ткани при обвалке, все образцы хранили при -25°C .

Для оценки элементного статуса подопытной птицы в конце эксперимента был проведен убой птицы по рекомендациям ВНИТИП (2021). В ходе убоя были сформированы средние пробы тканей и органов, что в последующем с учетом массы последних, позволило определить общий пул химических элементов в организме птицы.

Оборудование и технические средства. Исследования выполнены в Центре коллективного пользования ФНЦ БСТ РАН (г. Оренбург) (<http://цкп-бст.рф>). Элементный состав биосубстратов исследован на базе Центра коллективного пользования ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (<https://цкп-бст.рф>) (масс-спектрометр с индуктивной связанной плазмой Agilent 7900 с системой ВЭЖХ 1260 Infinity II BIO-Inert).

Статистическая обработка. Численные данные были обработаны с помощью программы SPSS «Statistics 20» («IBM», США), рассчитывали средние значения (М) и ошибку среднего значения ($\pm m$).

Результаты исследования.

Наибольшее значение живой массы было отмечено в 35-дневном возрасте в опытной группе на уровне 2623,1 г против 2589,7 г – в контрольной с разницей 1,29 % соответственно. На момент окончания экспериментального исследования аналогичные значения живой массы составили 2971,8 г в опытной группе и 2957,6 г – в контрольной с разницей 0,48 % соответственно (рис. 1).

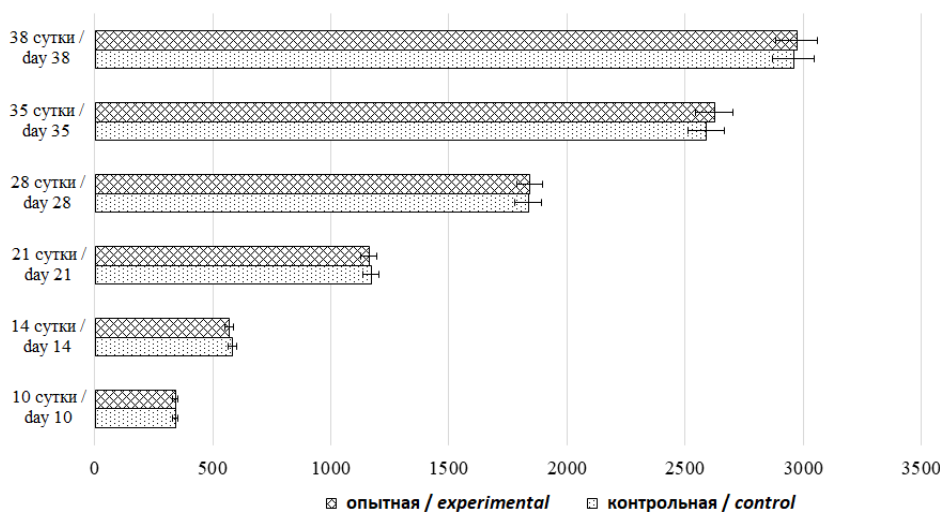


Рисунок 1. Динамика живой массы цыплят-бройлеров, г
Figure 1. Dynamics of live weight of broiler chickens, g

В связи с этим можно указать на то, что смесь ультрадисперсных частиц оказало умеренное действие на живую массу исследуемых цыплят-бройлеров.

Введение смеси УДЧ микроэлементов оказало комплексное влияние на элементный состав цыплят-бройлеров, что проявилось в изменении содержания химических элементов как в мясе, так и в теле птицы.

Рационы цыплят-бройлеров были сбалансированы по основным питательным веществам, что позволяет рассматривать выявленные различия как следствие введения УДЧ.

По результатам полученных данных выявлены тенденции в перераспределении макроэлементов (табл. 1).

Таблица 1 Концентрация макроэлементов в теле подопытной птицы, мг/кг
Table 1. The concentration of macronutrient in the body of the experimental bird, mg/kg

Элемент / <i>Element</i>	Группа / <i>Group</i>	
	контрольная/ <i>control</i>	опытная/ <i>experimental</i>
Na	2 356,7±58,1	2 532,3±49,3
Mg	865,0±61,5	802,7±40,3
K	7 458,7±135,5	7 216,3±178,5
Ca	13 097,3±1 637,9	12 744,7±1 180,7
P	12 788,0±643,5	12 094,3±836,6

В опытной группе наблюдалось увеличение содержания натрия на 7,5 %, магния – на 7,2 %, калия – на 3,2 %. Концентрация кальция и фосфора также несколько уменьшилась на 2,7 % и на 5,4 % соответственно, все изменения не были ярко выраженными, но сам факт снижения можно связать с перераспределением данных элементов в организме цыплят-бройлеров.

Наиболее выраженные изменения выявлены в содержании микроэлементов в теле птицы (табл. 2).

Таблица 2. Концентрация эссенциальных и условно-эссенциальных элементов в теле подопытной птицы, мг/кг

Table 2. The concentration of essential and conditionally essential elements in the body of experimental poultry, mg/kg

Элемент / <i>Element</i>	Группа / <i>Group</i>	
	контрольная/ <i>control</i>	опытная/ <i>experimental</i>
Mn	1,16±0,096	1,65±0,093
Ni	0,13±0,011	0,70±0,516***
Cu	2,25±0,037	2,35±0,088
Se	0,68±0,069	0,64±0,098
Mo	0,06±0,004	0,08±0,008*
I	1,65±0,359	4,28±0,843***
Cr	0,19±0,04	1,61±1,20***
Fe	51,8±1,80	57,2±4,40
Zn	43,9±2,66	46,6±1,67
Co	0,01±0,002	0,03±0,013***

Примечание: * – $P \leq 0,05$, *** – $P \leq 0,001$

Note: * – $P \leq 0.05$, *** – $P \leq 0.001$

Так, концентрация никеля увеличилась на 0,57 мг/кг ($P \leq 0,001$), йода – на 2.63 мг/кг ($P \leq 0,001$), хрома – на 1,42 мг/кг ($P \leq 0,001$), кобальта – на 0,02 мг/кг ($P \leq 0,001$). Незначительные изменения выявлены по уровню содержания железа и цинк, а именно, их увеличение на 10,4 % и на 6,1 % соответственно.

Концентрация токсичных элементов в теле птицы также существенно снизилось (табл. 3).

Таблица 3. Концентрация токсичных элементов в теле подопытной птицы, мг/кг
Table 3. The concentration of toxic elements in the body of an experimental bird, mg/kg

Элемент / <i>Element</i>	Группа / <i>Group</i>	
	контрольная/control	опытная/experimental
Al	13,4±0,93	6,38±0,39**
Sr	8,85±2,610	8,57±0,864
Cd	0,02±0,001	0,01±0,001*
Sn	0,59±0,014	0,61±0,006
Ba	0,86±0,248	0,80±0,099
Hg	0,02±0,015	0,01±0,001*
Pb	0,02±0,002	0,02±0,005

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

Note: * – $P \leq 0.05$, ** – $P \leq 0.01$

Концентрация алюминия уменьшилась на 52,0 % ($P \leq 0,01$), кадмия и ртути – на 50,0 % ($P \leq 0,01$) соответственно в сравнении с контрольной группой.

Введение смеси ультрадисперсных частиц микроэлементов привело к выраженному перераспределению минеральных веществ в организме птицы, повышению содержания ряда биологических значимых элементов и снижению накопления токсических.

Обсуждение полученных результатов.

Непрерывный рост продуктивности современных кроссов сельскохозяйственной птицы предопределил необходимость наращивания дозировок минеральных веществ в рационе, что на современном уровне продуктивности не может быть реализовано через применение «традиционных» препаратов минеральных солей или других источников эссенциальных химических элементов с низкой биодоступностью. Так как высокие дозы последних могут привести к загрязнению окружающей среды (Matuszewski A et al., 2020), в связи с этим необходимо найти альтернативу современным источникам, которая была бы более эффективной.

Потенциальным решением этого вопроса может стать применение относительно более низких доз ультрадисперсных частиц металлов-микроэлементов. Последние характеризуются значительно большей биодоступностью, что позволяет снизить дозировки (Khot LR et al., 2012; Gubajdullina IZ et al., 2019). Между тем, при всей обширности знаний об использовании металлов-микроэлементов в ультрадисперсной форме в кормлении птицы, в том числе, по меди (Miroshnikov SA et al., 2015), железу (Bhanja S and Verma S, 2021), цинку (Szuba-Trznadel A et al., 2021; El-Maddawy ZK et al., 2022) и т. д., пока остается не изученным сложный механизм воздействия ультрадисперсных форм химических элементов на обмен других элементов. В частности, не ясен механизм действия крайне незначительных дозировок УДЧ металлов, описанных ранее (Мирошникова Е.П. и др., 2020). Эти дозировки, по определению, не способны запустить антагонистические или синергические взаимодействия между химическими элементами, например, по причине ингибирования ионами одного металла в кишечнике всасывания других (Fung EB et al., 1997; Choi JW et al., 2005; Wang Y et al., 2012), но оказывают выраженное воздействие на пулы в организме целого ряда химических элементов, не входящих в состав препаратов УДЧ.

С целью изучения этого вопроса нами был проведен эксперимент по оценке влияния смеси ультрадисперсных частиц микроэлементов на рост и элементный статус цыплят-бройлеров при использовании кормовой добавки в крайне незначительных дозировках, обеспечивающих покрытие только 0,01-0,16 % от суточного потребления птицей металлов-микроэлементов – железа, марганца, цинка и меди.

Как следует из анализа полученных результатов, нам не удалось констатировать достоверного продуктивного эффекта опытной кормовой добавки. Опытная птица по параметрам динамики роста ничем не отличалась от контроля. Объяснить это оказалось сложным, в том числе при опоре на ранее проведенные исследования (Мирошникова Е.П. и др., 2025). Возможно, это было связано с гранулированием комбикорма. Ранее знания о влиянии гранулирования на свойства УДЧ были получены в фармакологии (Košir D, Vrečer F, 2017; Sahren F et al., 2020).

В то же время, даже на фоне отсутствия продуктивного действия опытной кормовой добавки, при крайне низких дозировках последней, обеспечивающих покрытие только 0,01-0,16 % от суточного потребления птицей металлов-микроэлементов, мы в своих исследованиях констатировали значительные изменения в минеральном статусе подопытной птицы. При этом не были отмечены достоверные изменения в величине пулов вводимых микроэлементов Fe, Cu, Zn и Mn, применение смеси УДЧ сопровождается выраженным накоплением других микроэлементов. В частности, концентрация никеля увеличилась на 0,57 мг/кг ($P \leq 0,001$), йода – на 2,63 мг/кг ($P \leq 0,001$), хрома – на 1,42 мг/кг ($P \leq 0,001$), кобальта – на 0,02 мг/кг ($P \leq 0,001$), что само по себе не является новым. Известно, что химические элементы, поступающие в организм в ультрадисперсной форме, способны оказывать влияние на обмен других химических элементов (Sizova E et al., 2015).

Однако, интерес представляет регуляторный эффект крайне небольших дозировок металлов-микроэлементов в ультрадисперсной форме. В литературе описаны гипотезы этого явления, в том числе по причине повышения активности кишечных ферментов (Hassan S et al., 2020) или развития антагонистических взаимодействий между элементами (Skřivan M et al., 2005; Ao T et al., 2009), на наш взгляд – это умозаключение не соответствует действительности. Объяснить этот феномен можно, опираясь на различные механизмы поступления химических элементов из состава препаратов ультрадисперсных металлов и ионных формам в межклеточный обмен (Sizova E et al., 2015). Известно, что всасывание микроэлементов происходит преимущественно в тонком кишечнике, где они могут транспортироваться как посредством активных механизмов, так и путем пассивной диффузии (Tian X et al., 2026). Ввиду высокой адсорбционной способностью, наночастицы металлов способны проникать в клетки кишечника, минуя традиционные пути связывания и транспорта белками (Bhanja S and Verma S., 2021). Этот факт принципиально способен повлиять на регулирование минерального обмена в организме животного. Очевидно, что обмен элементов в организме строго контролируется системами гомеостаза, которые через «оценку» уровня в межклеточном обмене химических элементов и потребности тканей в них регулируют процессы ретенции/выделения химических элементов. Эти процессы тесно связаны с синтезом белков переносчиков металлов в ходе энтеральной фазы обмена (Braun V and Killmann H, 1999; Delaby C et al., 2005; Aslam MF et al., 2014).

Отмеченное увеличение концентрации данных элементов согласуется с результатами исследований (Patra A, Lalhriatpuii M, 2020), в которых показано, что применение высокобиодоступных форм микроэлементов способствует улучшению метаболических процессов у птицы. Повышение содержания хрома в организме опытной птицы указывает на усиление антиоксидантной защиты и углеводного обмена (Birt DF et al., 1988). Хром, участвует в регуляции инсулиновой чувствительности тканей и обмена глюкозы (Lebedev S et al., 2021).

Таким образом, когда «неожиданно» (вне систем переноса через стенку пищеварительной трубки) в межклеточном обмене появляется некоторое, возможно небольшое количества металлов из состава наночастиц, системы гомеостатирования внутренней среды срабатывают и снижают как синтез металлов переносчиков, так и активизируют процессы выделения отдельных веществ во вне. Таким образом, крайне низкие дозировки металлов в наноформе способны действовать на обмен широкого круга химических элементов не по пути конкуренции за белки переносчики (элементарный антагонизм между химическими элементами), а влияя на системы регулирования гомеостаза в межклеточном обмене.

Заключение.

Дополнительное введение смеси ультрадисперсных частиц железа, меди, цинка и марганца на углеродной подложке в дозировках, замещающих 0,01-0,17 % по каждому из микроэлементов в суточном потреблении цыплят-бройлеров, не оказало выраженного влияния на интенсивность роста птицы. При этом выявлены существенные изменения минерального состава тканей, указывающие на метаболическую активность используемой добавки.

Отмечено, что в теле птицы выявлено достоверное накопление хрома, никеля, йода и кобальта, что указывает на системное перераспределение микроэлементов в организме птицы при введении смеси УДЧ.

Одновременно установлено выраженное снижение уровня токсичных элементов в теле птицы. Так, содержание алюминия, кадмия, свинца, ртути снизилось на 43,0-52,0 % соответственно, что указывает на факт снижения токсической нагрузки и возможных детоксикационных свойств ультрадисперсных частиц.

Таким образом, несмотря на отсутствие достоверных изменений в содержании в тканях тела птицы непосредственно вводимых элементов Fe, Cu, Zn и Mn, применение смеси УДЧ сопровождается выраженным накоплением других макро- и микроэлементов, а также снижением токсичных химических элементов, что свидетельствуют о системном характере влияния ультрадисперсных частиц на организм цыплят-бройлеров. Это требует дальнейшего изучения природы воздействия ультрадисперсных форм микроэлементов на организм птицы, включая оценку биодоступности и оценку механизмов регулирования минерального обмена.

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, Kvan OV, Rusakova EA, 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. Методическое пособие по кормлению сельскохозяйственной птицы / И.А. Егоров и др.; под общ. ред. В.И. Фисинина, И.А. Егорова. Сергиев Посад: ВНИТИП, 2021. 360 с. [Egorov I, et al. *Metodicheskoe posobie po kormleniyu selskokhozyaistvennoy ptitsi*. Pod obshch. red. Fisinin V, Yegorova IA. Sergiev Posad: VNITIP; 2021:360 p. (In Russ.)].
3. Сравнительные испытания ультрадисперсного сплава, солей и органических форм Cu и Zn как источников микроэлементов в кормлении цыплят-бройлеров / Е.А. Сизова, С.А. Мирошников, С.В. Лебедев, Ю.И. Левахин, И.А. Бабичева, В.И. Косилов // Сельскохозяйственная биология. 2018. Т. 53. № 2. С. 393-403. [Sizova EA, Miroshnikov SA, Lebedev SV, Levakhin YuI, Babicheva IA, Kosilov VI. Comparative tests of various sources of microelements in feeding chicken-broilers. *Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]*. 2018;53(2):393-403. (In Russ.)]. doi: 10.15389/agrobiology.2018.2.393rus doi: 10.15389/agrobiology.2018.2.393eng
4. Сравнительный анализ элементного состава крови и мышечной ткани у цыплят-бройлеров при введении в рацион нанокмпозитов железа и цинка / Е.П. Мирошникова, В.А. Рязанов, И.С. Мирошников, А.П. Тузиков // Достижения науки и техники АПК. 2025. Т. 39. № 8. С. 82-88. [Miroshnikova EP, Ryazanov VA, Miroshnikov IS, Tuzikov AP. Comparative analysis of the elemental composition of blood and muscle tissue in broiler chickens when introducing iron and zinc nanocomposites into the diet. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*. 2025;39(8):82-88. (In Russ.)]. doi: 10.53859/02352451_2025_39_8_82
5. Amlan P, Lalhriatpuii M. Progress and prospect of essential mineral nanoparticles in poultry nutrition and feeding – a review. *Biol Trace Elem Res*. 2020;197(1):233-253. doi: 10.1007/s12011-019-01959-1

6. Ao T, Pierce JL, Power R, Pescatore AJ, Cantor AH, Dawson KA, Ford MJ. Effects of feeding different forms of zinc and copper on the performance and tissue mineral content of chicks. *Poult Sci.* 2009;88(10):2171-2175. doi: 10.3382/ps.2009-00117
7. Aslam MF, Frazer DM, Faria N, Bruggraber SF, Wilkins SJ, Mirciov C, Powell JJ, Anderson GJ, Pereira DI. Ferroportin mediates the intestinal absorption of iron from a nanoparticulate ferritin core mimetic in mice. *J. FASEB* 2014;28(8):3671-3678. doi: 10.1096/fj.14-251520
8. Bhanja S, Verma S. Prospects of Nano minerals in poultry nutrition. *Indian Journal of Poultry Science.* 2021;56(1):1-8. doi: 10.5958/0974-8180.2021.00006.4
9. Birt DF, Julius AD, Runice CE, White LT, Lawson T, Pour PM. Enhancement of BOP-induced pancreatic carcinogenesis in selenium-fed Syrian golden hamsters under specific dietary conditions. *Nutrition and Cancer.* 1988;11(1):21-33. doi: 10.1080/01635588809513966
10. Braun V, Killmann H. Bacterial solutions to the iron-supply problem. *Trends Biochem Sci.* 1999;24(3):104-109. doi: 10.1016/s0968-0004(99)01359-6
11. Choi JW, Kim SK. Relationships of lead, copper, zinc, and cadmium levels versus hematopoiesis and Iron parameters in healthy adolescents. *Annals of Clinical and Laboratory Science.* 2005;35(4):428-434.
12. Delaby C, Pilard N, Goncalves AS, Beaumont C, Canonne-Hergaux F. Presence of the iron exporter ferroportin at the plasma membrane of macrophages is enhanced by iron loading and down-regulated by hepcidin. *Blood.* 2005;106(12): 3979-3984, 2005. doi: 10.1182/blood-2005-06-2398
13. El-Maddawy ZK, El-sawy A-EF, Ashoura NR, Aboelenin SM, Soliman MM, Ellakany HF, Elbestawy AR, El-Shall NA. Use of zinc oxide nanoparticles as anticoccidial agents in broiler chickens along with its impact on growth performance, antioxidant status, and hematobiochemical profile. *Life.* 2022;12(1):74. doi: 10.3390/LIFE12010074
14. Fung EB, Ritchie LD, Woodhouse LR, Roehl R, King JC. Zinc absorption in women during pregnancy and lactation: a longitudinal study. *Am J Clin Nutr.* 1997;66(1):80-88. doi: 10.1093/ajcn/66.1.80
15. Gopi M, Pearlin B, Kumar RD. Role of nanoparticles in animal and poultry nutrition: modes of action and applications in formulating feed additives and food processing. *International Journal of pharmacology.* 2017;13(7):724-731. doi: 10.3923/ijp.2017.724.731
16. Gubajdullina IZ, Gavrish IA, Lebedev SV. Effect of metallic nanoparticles on exchange of chemical elements in broiler chickens. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2019;341(1):012169. doi:10.1088/1755-1315/341/1/012169
17. Hassan S, Hassan Fu, Rehman MSu. Nano-particles of trace minerals in poultry nutrition: potential applications and future prospects. *Biol Trace Elem Res.* 2020;195:591-612. doi: 10.1007/s12011-019-01862-9
18. Jankowski J, Katarzyna O, Stepniowska A, Zdunczyk ZZ, et al. The effect of the source and dose of manganese on the performance, digestibility and distribution of selected minerals, redox and immune status of turkeys. *Poultry Science.* 2019;98(3):1379-1389. doi: 10.3382/ps/pey467
19. Khot LR, Sankaran S, Maja JM, et al. Applications of nanomaterials in agricultural production and crop protection: a review. *Crop Protection.* 2012;35:64-70 doi: 10.1016/j.cropro.2012.01.007
20. Košir D, Vrečer F. The performance of HPMC matrix tablets using various agglomeration manufacturing processes. *Drug Dev Ind Pharm.* 2017;43(2):329-337. doi: 10.1080/03639045.2016.1249374
21. Lebedev S, Sheida E, Vershinina I. 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. doi: 10.3934/agrfood.2021002
22. Matuszewski A, Łukasiewicz M, Niemiec J. Calcium and phosphorus and their nanoparticle forms in poultry nutrition. *World's Poult Sci J.* 2020;76(2):328-345. doi: 10.1080/00439339.2020.1746221

23. Miroshnikov S, Yausheva E, Sizova E, Miroshnikova E. Comparative assessment of effect of copper nano- and microparticles in chicken. *Orient J Chem.* 2015;31(4):2327-2336. doi: 10.13005/ojc/310461
24. Ouyang Z, Ren P, Zheng D, Huang L, Wei T, Yang C, Kong X, Yin Y, He S, He Q. Hydrothermal synthesis of a new porous zinc oxide and its antimicrobial evaluation in weanling piglets. *Livestock Sci.* 2021;248:104499. doi: 10.1016/j.livsci.2021.104499
25. Patra A, Lalhriatpuii M. Progress and prospect of essential mineral nanoparticles in poultry nutrition and feeding—a review. *Biol Trace Elem Res.* 2020;197:233-253. doi: 10.1007/s12011-019-01959-1
26. Sahnen F, Kamps JP, Langer K. Conversion of indomethacin nanosuspensions into solid dosage forms via fluid bed granulation and compaction. *Eur J Pharm Biopharm.* 2020;154:89-97. doi: 10.1016/j.ejpb.2020.06.020
27. Sizova E, Miroshnikov S, Yausheva E, Polyakova V. Assessment of morphological and functional changes in organs of rats after intramuscular introduction of iron nanoparticles and their agglomerates. *Biomed Res Int.* 2015; 3:243173. doi: 10.1155/2015/243173
28. Skřivan M, Skřivanová V, Marounek M. Effects of dietary zinc, iron, and copper in layer feed on distribution of these elements in eggs, liver, excreta, soil, and herbage. *Poultry Science.* 2005;84(10):1570-1575. doi: 10.1093/ps/84.10.1570
29. Szuba-Trznadel A, Rzaşa A, Hikawczuk T, Fuchs B. Effect of zinc source and level on growth performance and zinc status of weaned piglets. *Animals.* 2021;11(7):2030. doi: 10.3390/ani11072030
30. Tian X, Chen H, Ren D, Yang X. Selenium nanoparticles driving innovations across the food chain: applicationa in food systems, feed supplementation, and sustainable agriculture. *Journal of Agricultural and Food Chemistry.* 2026;74(7):5941-5961. doi: 10.1021/acs.jafc.5c16705
31. Wang Y, Ou YL, Liu YQ, Xie Q, Liu QF, Wu Q, Fan TQ, Yan LL, Wang JY. Correlations of trace element levels in the diet, blood, urine, and feces in the Chinese male. *Biol Trace Elem Res.* 2012;145(2):127-135. doi: 10.1007/s12011-011-9177-8
32. Yusof HM, Mohamad R, Zaidan UH, Rahman NAA. Microbial synthesis of zinc oxide nanoparticles and their potential application as an antimicrobial agent and a feed supplement in animal industry: a review. *J Anim Sci Biotechnol.* 2019;10:57. doi: 10.1186/s40104-019-0368-z
33. Zulficar S, Riasat M, Majeed S, Rehman Z. Investigation of the influence of dietary iron oxide nanoparticles on immunity and oxidative stress markers in *Gallus gallus domesticus*. *Pakistan Journal of Zoological Sciences.* 2025;1(3):1-8. doi: 10.65139/xrztbz33

References

1. Miroshnikova EP, Kvan OV, Rusakova EA, 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. Egorov I, et al. A Methodological Guide to Feeding Farm Poultry. Edited by Fisinin V, Yegorova IA. Sergiev Posad: VNITIP; 2021:360 p.
3. Sizova EA, Miroshnikov SA, Lebedev SV, Levakhin YuI, Babicheva IA, Kosilov VI. Comparative tests of various sources of microelements in feeding chicken-broilers. *Agricultural Biology.* 2018;53(2):393-403. doi: 10.15389/agrobiolgy.2018.2.393rus doi: 10.15389/agrobiolgy.2018.2.393eng
4. Miroshnikova EP, Ryazanov VA, Miroshnikov IS, Tuzikov AP. Comparative analysis of the elemental composition of blood and muscle tissue in broiler chickens when introducing iron and zinc nanocomposites into the diet. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex.* 2025;39(8):82-88. doi: 10.53859/02352451_2025_39_8_82

5. Amlan P, Lalhriatpuii M. Progress and prospect of essential mineral nanoparticles in poultry nutrition and feeding – a review. *Biol Trace Elem Res.* 2020;197(1):233-253. doi: 10.1007/s12011-019-01959-1
6. Ao T, Pierce JL, Power R, Pescatore AJ, Cantor AH, Dawson KA, Ford MJ. Effects of feeding different forms of zinc and copper on the performance and tissue mineral content of chicks. *Poult Sci.* 2009;88(10):2171-2175. doi: 10.3382/ps.2009-00117
7. Aslam MF, Frazer DM, Faria N, Bruggraber SF, Wilkins SJ, Mirciov C, Powell JJ, Anderson GJ, Pereira DI. Ferroportin mediates the intestinal absorption of iron from a nanoparticulate ferritin core mimetic in mice. *J. FASEB* 2014;28(8):3671-3678. doi: 10.1096/fj.14-251520
8. Bhanja S, Verma S. Prospects of Nano minerals in poultry nutrition. *Indian Journal of Poultry Science.* 2021;56(1):1-8. doi: 10.5958/0974-8180.2021.00006.4
9. Birt DF, Julius AD, Runice CE, White LT, Lawson T, Pour PM. Enhancement of BOP-induced pancreatic carcinogenesis in selenium-fed Syrian golden hamsters under specific dietary conditions. *Nutrition and Cancer.* 1988;11(1):21-33. doi: 10.1080/01635588809513966
10. Braun V, Killmann H. Bacterial solutions to the iron-supply problem. *Trends Biochem Sci.* 1999;24(3):104-109. doi: 10.1016/s0968-0004(99)01359-6
11. Choi JW, Kim SK. Relationships of lead, copper, zinc, and cadmium levels versus hematopoiesis and Iron parameters in healthy adolescents. *Annals of Clinical and Laboratory Science.* 2005;35(4):428-434.
12. Delaby C, Pilard N, Goncalves AS, Beaumont C, Canonne-Hergaux F. Presence of the iron exporter ferroportin at the plasma membrane of macrophages is enhanced by iron loading and down-regulated by hepcidin. *Blood.* 2005;106(12): 3979-3984, 2005. doi: 10.1182/blood-2005-06-2398
13. El-Maddawy ZK, El-sawy A-EF, Ashoura NR, Aboelenin SM, Soliman MM, Ellakany HF, Elbestawy AR, El-Shall NA. Use of zinc oxide nanoparticles as anticoccidial agents in broiler chickens along with its impact on growth performance, antioxidant status, and hematobiochemical profile. *Life.* 2022;12(1):74. doi: 10.3390/LIFE12010074
14. Fung EB, Ritchie LD, Woodhouse LR, Roehl R, King JC. Zinc absorption in women during pregnancy and lactation: a longitudinal study. *Am J Clin Nutr.* 1997;66(1):80-88. doi: 10.1093/ajcn/66.1.80
15. Gopi M, Pearlin B, Kumar RD. Role of nanoparticles in animal and poultry nutrition: modes of action and applications in formulating feed additives and food processing. *International Journal of pharmacology.* 2017;13(7):724-731. doi: 10.3923/ijp.2017.724.731
16. Gubajdullina IZ, Gavrish IA, Lebedev SV. Effect of metallic nanoparticles on exchange of chemical elements in broiler chickens. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2019;341(1):012169. doi:10.1088/1755-1315/341/1/012169
17. Hassan S, Hassan Fu, Rehman MSu. Nano-particles of trace minerals in poultry nutrition: potential applications and future prospects. *Biol Trace Elem Res.* 2020;195:591-612. doi: 10.1007/s12011-019-01862-9
18. Jankowski J, Katarzyna O, Stepniowska A, Zdunczyk ZZ, et al. The effect of the source and dose of manganese on the performance, digestibility and distribution of selected minerals, redox and immune status of turkeys. *Poultry Science.* 2019;98(3):1379-1389. doi: 10.3382/ps/pey467
19. Khot LR, Sankaran S, Maja JM, et al. Applications of nanomaterials in agricultural production and crop protection: a review. *Crop Protection.* 2012;35:64-70 doi: 10.1016/j.cropro.2012.01.007
20. Košir D, Vrečer F. The performance of HPMC matrix tablets using various agglomeration manufacturing processes. *Drug Dev Ind Pharm.* 2017;43(2):329-337. doi: 10.1080/03639045.2016.1249374
21. Lebedev S, Sheida E, Vershinina I. 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. doi: 10.3934/agrfood.2021002

22. Matuszewski A, Łukasiewicz M, Niemiec J. Calcium and phosphorus and their nanoparticle forms in poultry nutrition. *World's Poult Sci J.* 2020;76(2):328-345. doi: 10.1080/00439339.2020.1746221
23. Miroshnikov S, Yausheva E, Sizova E, Miroshnikova E. Comparative assessment of effect of copper nano- and microparticles in chicken. *Orient J Chem.* 2015;31(4):2327-2336. doi: 10.13005/ojc/310461
24. Ouyang Z, Ren P, Zheng D, Huang L, Wei T, Yang C, Kong X, Yin Y, He S, He Q. Hydrothermal synthesis of a new porous zinc oxide and its antimicrobial evaluation in weanling piglets. *Livestock Sci.* 2021;248:104499. doi: 10.1016/j.livsci.2021.104499
25. Patra A, Lalhriatpuii M. Progress and prospect of essential mineral nanoparticles in poultry nutrition and feeding—a review. *Biol Trace Elem Res.* 2020;197:233-253. doi: 10.1007/s12011-019-01959-1
26. Sahren F, Kamps JP, Langer K. Conversion of indomethacin nanosuspensions into solid dosage forms via fluid bed granulation and compaction. *Eur J Pharm Biopharm.* 2020;154:89-97. doi: 10.1016/j.ejpb.2020.06.020
27. Sizova E, Miroshnikov S, Yausheva E, Polyakova V. Assessment of morphological and functional changes in organs of rats after intramuscular introduction of iron nanoparticles and their agglomerates. *Biomed Res Int.* 2015; 3:243173. doi: 10.1155/2015/243173
28. Skřivan M, Skřivanová V, Marounek M. Effects of dietary zinc, iron, and copper in layer feed on distribution of these elements in eggs, liver, excreta, soil, and herbage. *Poultry Science.* 2005;84(10):1570-1575. doi: 10.1093/ps/84.10.1570
29. Szuba-Trznadel A, Rząsa A, Hikawczuk T, Fuchs B. Effect of zinc source and level on growth performance and zinc status of weaned piglets. *Animals.* 2021;11(7):2030. doi: 10.3390/ani11072030
30. Tian X, Chen H, Ren D, Yang X. Selenium nanoparticles driving innovations across the food chain: application in food systems, feed supplementation, and sustainable agriculture. *Journal of Agricultural and Food Chemistry.* 2026;74(7):5941-5961. doi: 10.1021/acs.jafc.5c16705
31. Wang Y, Ou YL, Liu YQ, Xie Q, Liu QF, Wu Q, Fan TQ, Yan LL, Wang JY. Correlations of trace element levels in the diet, blood, urine, and feces in the Chinese male. *Biol Trace Elem Res.* 2012;145(2):127-135. doi: 10.1007/s12011-011-9177-8
32. Yusof HM, Mohamad R, Zaidan UH, Rahman NAA. Microbial synthesis of zinc oxide nanoparticles and their potential application as an antimicrobial agent and a feed supplement in animal industry: a review. *J Anim Sci Biotechnol.* 2019;10:57. doi: 10.1186/s40104-019-0368-z
33. Zulficar S, Riasat M, Majeed S, Rehman Z. Investigation of the influence of dietary iron oxide nanoparticles on immunity and oxidative stress markers in *Gallus gallus domesticus*. *Pakistan Journal of Zoological Sciences.* 2025;1(3):1-8. doi: 10.65139/xrztbz33

Информация об авторах:

Алексей Петрович Тузиков, младший научный сотрудник, Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13, тел.: 8 (3532) 77-67-70.

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.

Ольга Вилориевна Кван, доктор биологических наук, профессор кафедры, Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко, 460018, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13, тел.: 89225485657.

Артем Владимирович Быков, доктор биологических наук, доцент кафедры, Оренбургский государственный университет имени В.А. Бондаренко, 460018, г. Оренбург, пр. Победы 13, тел.: 8-922-869-74-09.

Information about the authors:

Alexey P Tuzikov, Junior Researcher, Orenburg State University named after VA Bondarenko, 13 Pobedy Ave., Orenburg, 460018, tel.: 8 (3532) 77-67-70.

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.

Olga V Kvan, Dr. Sci. (Biology), Professor of the Department, Orenburg State University named after VA Bondarenko, 13 Pobedy ave., Orenburg, 460018, tel.: 89225485657.

Artem V Bykov, Dr. Sci. (Biology), docent of the Department, Orenburg State University named after VA Bondarenko, 13 Pobedy Ave, Orenburg, 460018, tel.: 8-922-869-74-09.

Статья поступила в редакцию 20.04.2026; одобрена после рецензирования 26.05.2026; принята к публикации 15.06.2026.

The article was submitted 20.04.2026; approved after reviewing 26.05.2026; accepted for publication 15.06.2026.