

Животноводство и кормопроизводство. 2026. Т. 109. № 1. С. 184-196.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2026. Vol. 109. No. 1. P. 184-196.

Научная статья

УДК 636.5:577.17

doi: 10.33284/2658-3135-109-1-184

Влияние пробиотико-минерального комплекса на зоотехнические показатели в различные периоды продуктивности кур-несушек

Дмитрий Алексеевич Силин¹, Святослав Валерьевич Лебедев²

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

¹dasilin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6438-139X>

²lsv74@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9485-7010>

Аннотация. Использование хелатных форм микроэлементов в комплексе с пробиотиком является одним из решений проблем в яичном производстве, связанных с обеспеченностью в микро- и макронутриентах. В данном исследовании предложен вариант совместного использования пробиотика Лактобифадол-Форте в дозировке 1,5, 1 и 0,5 г/кг корма с комплексом хелатных микроэлементов Cu, Fe, Mn, Se и Zn (пробиотико-минеральный комплекс – ПМК) и чистого комплекса микроэлементов (опытные группы) на основании оценки зоотехнических показателей, морфологического и химического состава яиц кур-несушек кросса «Хайсекс-Браун». В период эксперимента с 17- до 26-недельного возраста в опытных группах яйценоскость увеличилась до 9,8 % при сравнении с контрольной. При дозировке 1,5 г/кг пробиотика и микроэлементов при расчете на 10 яиц конверсия корма увеличилась на 12,4 % на фоне увеличения массы яйца на 6,5 % ($P \leq 0,05$), содержание белка и желтка – на 1,13 % ($P \leq 0,05$). Толщина скорлупы была выше по сравнению с контрольной на 3,91-6,14 % ($P \leq 0,05$), а единицы Хау при дозировке пробиотика 1,5 и 1 г/кг с микроэлементами – на 4,98 % и 7,91 %. В группе с чистым комплексом микроэлементов отмечалось увеличение количества яиц на 9,8 %, конверсии корма – на 16,1 % с одновременным снижением качественных показателей яиц – индексов формы, белка и желтка на 0,3-0,7 %, единиц Хау – на 4,4 % на фоне более низкой массы яиц, уступающей контрольной на 2,1 %. Таким образом, оптимальными результатами по совокупности показателей характеризовались опытные группы, в комплексе которым вводился пробиотик Лактобифадол-Форте в дозировке 1,5 г/кг и 1 г/кг совместно с хелатными формами микроэлементов.

Ключевые слова: куры-несушки, яйценоскость, продуктивность, конверсия корма, качество яиц, единицы Хау, пробиотик, хелатные минералы, химический состав яиц

Благодарности: работа выполнена в соответствии с планом НИР за 2024-2026 гг. ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (№ FNWZ-2024-0003).

Для цитирования: Силин Д.А., Лебедев С.В. Влияние пробиотико-минерального комплекса на зоотехнические показатели в различные периоды продуктивности кур-несушек // Животноводство и кормопроизводство. 2026. Т. 109. № 1. С. 184-196. [Silin DA, Lebedev SV. The effect of the probiotic-mineral complex on the zootechnical indicators in different periods of productivity of laying hens. Animal Husbandry and Fodder Production. 2026;109(1):184-196. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-109-1-184>

Original article

The effect of the probiotic-mineral complex on the zootechnical indicators in different periods of productivity of laying hens

Dmitriy A Silin¹, Svyatoslav V Lebedev²

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

¹dasilin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6438-139X>

²lsv74@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9485-7010>

Abstract. The use of chelated forms of microelements in combination with a probiotic is one of the solutions to the problems in egg production related to the availability of micro- and macronutrients. In this study, we proposed a combined use of the probiotic Lactobifadol-Forte at a dosage of 1.5, 1, and 0.5 g/kg of feed with a complex of chelated micronutrients Cu, Fe, Mn, Se, and Zn (probiotic-mineral complex – PMC) and a pure complex of microelements (experimental groups) based on the assessment of zootechnical indicators, morphological, and chemical composition of eggs from laying hens of the Hisex-Brown cross. During the experimental period from 17 to 26 weeks of age, egg production in the experimental groups increased to 9.8% compared with the control group. At a dosage of 1.5 g/kg of probiotic and trace elements, feed conversion increased by 12.4% based on 10 eggs, while egg weight increased by 6.5% ($P \leq 0.05$), the percentage of egg white and yolk by 1.13% ($P \leq 0.05$). The shell thickness was higher than in the control by 3.91-6.14% ($P \leq 0.05$), and the Haugh units at probiotic dosages of 1.5 and 1 g/kg with trace elements by 4.98% and 7.91%. In the group with pure complex of trace elements, there was an increase in the number of eggs by 9.8%, feed conversion by 16.1%, while reducing the quality of eggs – shape, white and yolk indices by 0.3-0.7%, Haugh units by 4.4% against the background of a lower egg weight, which was on 2.1% lower than the control. Therefore, the optimal results in terms of the totality of indicators were characterized by the experimental groups, in which the probiotic Lactobifadol Forte was administered in a dosage of 1.5 g /kg and 1 g/kg together with chelated forms of trace elements.

Keywords: laying hens, egg production, productivity, feed conversion, egg quality, Haugh units, probiotic, chelated minerals, chemical composition of eggs

Acknowledgments: the work was supported in accordance to the plan of research works for 2024-2026 FSBRI FRC BST RAS (No. FNWZ-2024-0003).

For citation: Silin DA, Lebedev SV. The effect of the probiotic-mineral complex on the zootechnical indicators in different periods of productivity of laying hens. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2026;109(1):184-196. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-109-1-184>

Введение.

Современное птицеводство направлено на поиск решений оптимизации минерального питания, новых биологических активных компонентов для сохранения роста и рентабельности производства. Одним из решений является замена неорганических форм микроэлементов органическими (Brugger D and Windisch WM, 2015) с целью оптимизации обменных процессов, сокращения расхода корма и увеличения выхода получаемой продукции (Холодилина Т.Н. и др., 2025).

Пробиотики обладают стимулирующим действием на развитие и увеличение биомассы полезной кишечной микрофлоры, что обеспечивает лучшее усвоение питательных веществ при сохранении ингредиентного состава корма (Лебедев С.В. и др., 2023; Петруша Ю.К. и др., 2023).

Использование в рационе кур-несушек минеральных премиксов является обязательным элементом современной системы кормления, в состав которых входят различные формы микроэлементов. В частности, использование неорганических форм сопровождается меньшей биодоступностью и в большем выделением с пометом в окружающую среду таковых. (Мусабаева Л.Л. и др., 2022).

В исследовании 216 кур-несушки кросса «Хайсекс-Браун» в возрасте 22 недель получали различные дозировки пробиотика, и в результате было зафиксировано улучшение поедаемости корма, конверсии, массы и качественных показателей яиц по сравнению со стандартным рационом (Abd El-Hack ME et al., 2017).

Использование хелатных форм микроэлементов в комплексе с пробиотиком может создать оптимальные условия для увеличения доступности минеральных веществ (Лебедев С.В. и др., 2016), а введение пробиотико-минерального комплекса на ранних сроках начала продуктивности способно поддержать организм в стрессовой ситуации для обеспечения высоких темпов яйценоскости (Фисинин В.И. и др., 2022).

Цель исследования.

Оценка влияния введения пробиотика в комплексе с хелатными формами микроэлементов Cu, Fe, Mn, Se и Zn в рацион кур-несушек в различные периоды продуктивности на зоотехнические показатели птицы.

Материалы и методы исследования.

Объект исследования. Кур-несушки кросса «Хайсекс-Браун».

Обслуживание животных и экспериментальные исследования выполняли 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 No 29-17 от 31.10.2007 г.), протоколы Женевской конвенции и принципы надлежащей лабораторной практики (Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 53434-2009), Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными (http://fncbst.ru/?page_id=3553). При проведении исследований были приняты меры для обеспечения минимума страданий животных и уменьшения количества исследуемых опытных образцов. Методика проведения эксперимента была одобрена комитетом по Биотике ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (протокол № 5 от 23.12.2024).

Схема эксперимента. Для проведения экспериментальных исследований на базе ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН методом групп-аналогов из 17-недельных кур-несушек были сформированы 5 групп по 30 голов в каждой согласно методике ВНИТИП (Егоров И.А. и др., 2013). Продолжительность эксперимента составила 60 суток, с 17- до 26-недельного возраста птицы.

Рацион кур-несушек контрольной группы по питательности соответствовал рекомендациям ВНИТИП (Егоров И.А. и др., 2021). Опытные группы получали аналогичный рацион с заменой 0,15 %, 0,1 % и 0,05 % зерновой части в I, II и III опытных группах на пробиотик и хелатные формы микроэлементов (МЭ) Cu, Fe, Mn, Se, Zn. Так, I опытная группа получала пробиотик Лактобифадол-Форте в дозировке 1,5 г/кг корма и МЭ, II опытная группа – Лактобифадол-Форте в дозировке 1 г/кг корма и МЭ, III опытная группа – Лактобифадол-Форте в дозировке 0,5 г/кг корма и МЭ, а IV опытная группа получала основной рацион с комплексом МЭ.

Условия содержания, кормления и поения птицы, а также параметры микроклимата в помещении соответствовали руководству по работе с птицей кросса Хайсекс Браун (Хмельницкая Т.А. и др., 2007). Птица содержалась в типовых клетках для кур-несушек БН-1 («Стимул-Инк», г. Пушкино, Россия).

Хелатные формы микроэлементов вводились в качестве замены неорганических форм. Комплекс вводимых в рацион хелатных форм микроэлементов состоял из глицината меди в дозировке 4,8 мг/кг корма, глицината железа в дозировке 44 мг/кг корма, глицината марганца в дозировке 19,8 мг/кг корма, селена метионина в дозировке 120 мкг/кг корма и цитрата цинка в дозировке 20 мг/кг корма.

Поедаемость, расход корма и яичная продуктивность фиксировались ежедневно (Кавтарашвили А.Ш., 2014).

Оборудование и технические средства. Исследования выполнены с использованием приборной базы Центра коллективного пользования БСТ РАН (г. Оренбург) (<http://цкп-бст.рф>). Морфологические показатели яиц определялись по общепринятым методикам. Взвешивание яиц проводилось индивидуально ($\pm 0,01$ г) на весах лабораторных Масса-К ВК-3000.1 («Масса-К», Россия), плотность яиц определялась на основании отношения массы яйца к объему и рассчитывалась по формуле:

$$P = m/V,$$

где P – плотность яйца;

m – масса яйца;

V – объем яйца.

Малый и большой диаметр яйца, высоту и диаметр белка и желтка отдельно определяли с помощью штангенциркуля «ШЦЦ-1-150 0,01» (Россия) и затем рассчитывали индекс формы яйца, белка и желтка по общепринятым формулам (Мойсевич В.И. и др., 2023).

Толщина скорлупы определялась с помощью точечного микрометра МКЦ-ТП-25 0.001 («Micron», Россия) после измерения массы составных частей яйца – белка, желтка и скорлупы.

Химический состав яиц кур-несушек определялся по стандартизированным методикам ГОСТ 31469-2012 (Методы физико-химического анализа яиц): жир – на автоматическом экстракторе SER 148/6 (Velp, Италия), белок – с применением автоматической системы дистилляции UDK 139 (Velp, Италия).

Статистическая обработка. Полученные результаты исследования обрабатывали с применением программы «Excel» («Microsoft», США) и обработкой данных в «Statistica 10.0» («StatSoft Inc.», США). и включали расчет среднего значения (M) и стандартные ошибки среднего (\pm SEM). Достоверность различий сравниваемых показателей определяли по t-критерию Стьюдента. Уровень значимой разницы был установлен на $P \leq 0,05$ (* – при сравнении опытных групп с контрольной).

Результаты исследования.

При исследовании зоотехнических показателей (табл. 1) было установлено, что наименьшая поедаемость основного рациона птицей была в контрольной группе и составила $92,57 \pm 1,61$ г корма на гол./сутки за учетный период. В то же время наибольшая поедаемость корма была в группе, получавшей пробиотико-минеральный комплекс (ПМК) с дозировкой пробиотика 1 г/кг корма и превосходила контрольную на 7,4 % ($P \leq 0,05$), в то время как разница в дозировке ПМК 1,5 и 0,5 г/кг пробиотика, а также в группе только с комплексом хелатных форм микроэлементов составила от 0,7 % до 2,3 %.

Количество снесенных яиц определяется в показателе интенсивности яйценоскости. Самое низкое значение данного показателя отмечалось в группе, получавшей основной рацион, в то время как опытные группы, получавшие комплекс пробиотика (1,5, 1 и 0,5 г/кг) совместно с хелатными формами микроэлементов, опережали ее значения на 8,4 %, 4,6 % и 0,3 % соответственно, а IV опытная группа показала самый высокий результат, где разница с контролем составила 9,8 %.

При расчете на 1 кг яйцемассы конверсия корма самая высокая была при введении ПМК в дозировке 0,5 г/кг корма – 4,13 кг, а наиболее низкая при введении комплекса пробиотика с микроэлементами в дозировке 1,5 г/кг – 3,41 кг и чистого комплекса микроэлементов – 3,47 кг, что превосходило контрольную группу на 16 % и 14,5 % соответственно, в то время как при расчете конверсии на 10 яиц в I опытной затраты корма снизились на 12,4 %, а в IV опытной – на 16,1 % по сравнению с контролем.

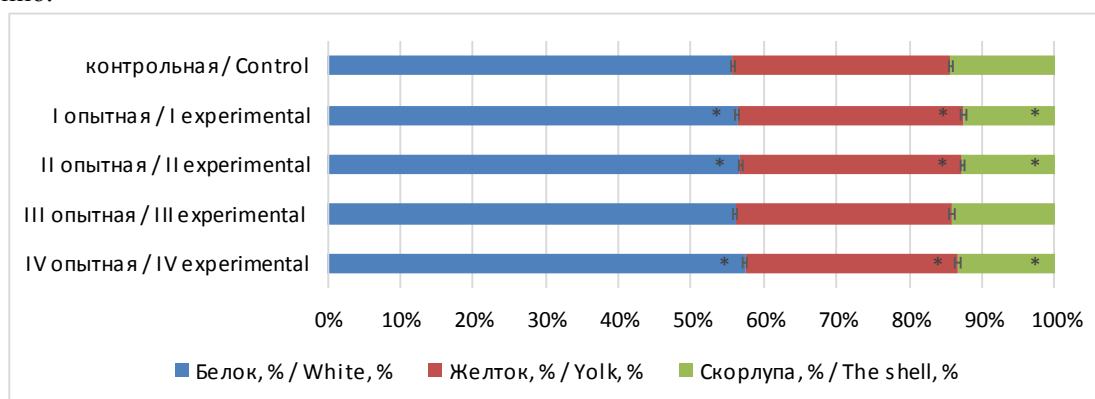
Средняя масса яиц была достоверно выше значений контрольной группы при дозировке пробиотика в составе ПМК 1,5 г/кг на 4 % ($P \leq 0,05$) и 1 г/кг на 6,5 % ($P \leq 0,05$), в то время как доза 0,5 г/кг и комплекса МЭ не отличались значимыми отличиями и уступали контролю на 1,7 % и 2,1 % соответственно.

Таблица 1. Зоотехнические показатели выращивания кур-несушек (17-26 неделя)
Table 1. Zootechnical indicators of laying hens breeding (17-26 weeks)

Показатели / Indicators	Группа / Group				
	контрольная / Control	I опытная / I experimental	II опытная / II experimental	III опытная / III experimental	IV опытная / IV experimental
Поедаемость, г/гол/сут / <i>Feed intake, g/head/day</i>	92,57±1,61	94,72±1,54	99,42±1,26*	93,39±2,06	93,22±1,45
Интенсивность яйценоскости, % / <i>Intensity of egg production, %</i>	47,9	56,1	52,5	48,2	57,7
Яйценоскость на начальную не- сушку, шт. / <i>Egg productivity per laying hen, pcs.</i>	29,2	34,2	32	29,4	35,2
Средняя масса яйца, г / <i>Average egg weight, g</i>	47,6±0,59	49,5±0,50*	50,7±1,20*	46,8±1,08	46,6±0,71
Конверсия, кг корма на 1 кг яй- цемассы/ 10 шт. яиц / <i>Conversion rate, kg of feed per 1 kg of egg mass/ 10 pcs. of eggs</i>	4,06 / 1,93	3,41 / 1,69	3,73 / 1,90	4,13 / 1,94	3,47 / 1,62

Примечание: * – $P \leq 0,05$ при сравнении опытных групп с контрольной
Note: * – $P \leq 0.05$ comparing the experimental groups with the control

Расчет относительного содержания составных частей яиц (рис. 1) показал, что процент белка был выше значений контрольной группы при включении ПМК в дозировке 1,5 и 1 г/кг, а также в группе только с комплексом МЭ на 0,69 % ($P \leq 0,05$), 1,13 % ($P \leq 0,05$) и 1,62 % ($P \leq 0,05$) соответственно.



Примечание: * – $P \leq 0,05$ при сравнении опытных групп с контрольной

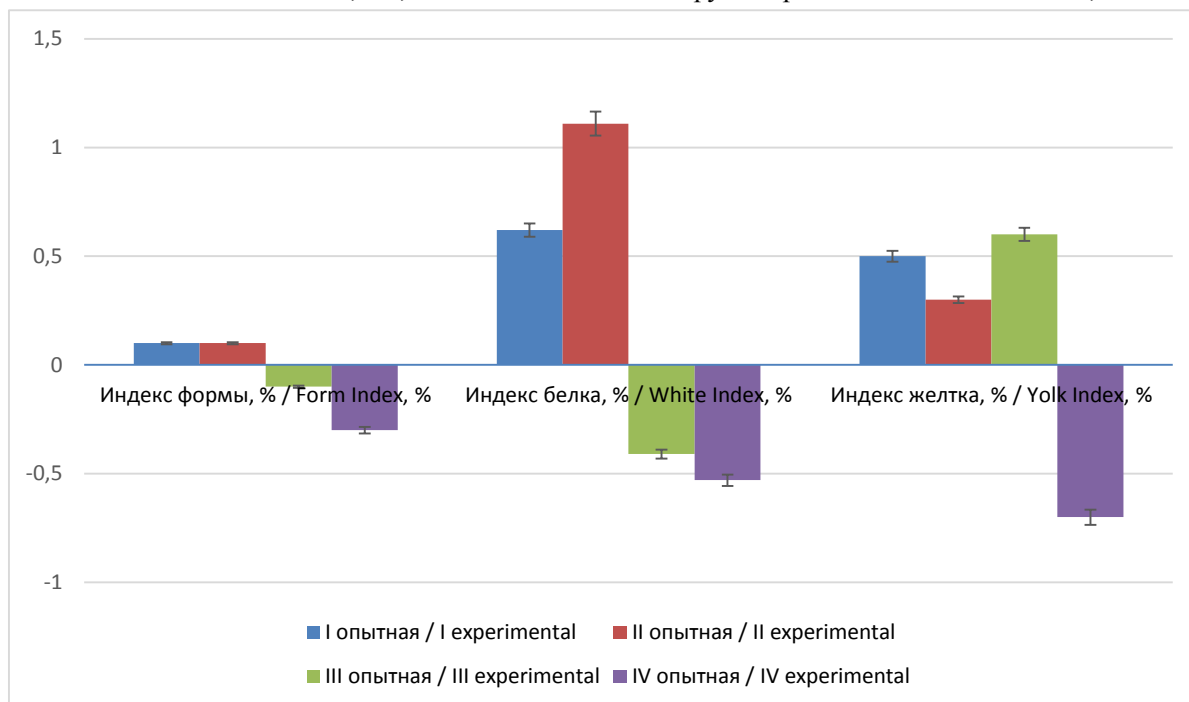
Note: * – $P \leq 0.05$ comparing the experimental groups with the control

Рисунок 1. Относительное содержание составных частей яиц кур-несушек в возрасте 17-26 недель, %

Figure 1. Percentage of egg components of laying hens in age 17-26 weeks, %

Процент содержания желтка относительно контроля был достоверно выше при дозировке ПМК 1,5 г/кг на 1,07 % ($P \leq 0,05$) и 1 г/кг на 0,53 % ($P \leq 0,05$) и достоверно снижался в группе, получавшей только комплекс микроэлементов на 0,86 % ($P \leq 0,05$).

Индексы формы яйца, белка и желтка являются важными показателями при оценке качества яиц кур-несушек (рис. 2). Индекс формы яйца во всех группах находился на уровне от 79,6 % до 80 %. Индекс белка превосходил контрольные значения в I опытной на 0,62 % и во II опытной – на 1,11 %, в то время как в III и IV опытных группах он снижался на 0,41 % и 0,53 %. Индекс желтка в IV опытной был ниже на 0,7 %, тогда как в III опытной группе превосходство составляло 0,6 %.



Примечание: * – $P \leq 0,05$ при сравнении опытных групп с контрольной

Note: * – $P \leq 0,05$ comparing the experimental groups with the control

Рисунок 2. Разница в интегральных показателях качества яиц кур-несушек в возрасте 17-26 недель в сравнении с контрольной группой, %

Figure 2. The difference in the integral indicators of egg quality of laying hens aged 17-26 weeks compared with the control group, %

Для исследования морфологических показателей яиц кур-несушек в возрасте 17-26 недель отбирались 10 % яиц (табл. 2). Оценка яиц выявила достоверные различия в объеме яиц в пользу групп, получавших 1,5 и 1 г/кг пробиотика и МЭ, на 7,69 % ($P \leq 0,05$) и 8,39 % ($P \leq 0,05$) при снижении в группе, получавшей только комплекс микроэлементов, на 4,89 % ($P \leq 0,05$).

Превосходство по толщине скорлупы во всех опытных группах по сравнению с контрольной варьировало от 3,91 до 6,14 % ($P \leq 0,05$), а единицы Хау как показатель качества яиц были наиболее высокими при включении в рацион опытных групп пробиотико-минерального комплекса в дозировке 1,5 и 1 г/кг корма, которые опережали контрольную на 4,98 % и 7,91 % соответственно, в то время как в группе, получавшей только комплекс микроэлементов, данный показатель был ниже на 4,4 %.

Оценка химического состава яиц (табл. 3) установила, что наибольшее содержание белка было при дозировке пробиотика 1 и 0,5 г/кг совместно с МЭ, а также в опытной группе, получавшей только комплекс микроэлементов, которые достоверно превосходили контрольную на 10,5 % ($P \leq 0,05$), 17,6 % ($P \leq 0,05$) и 8,6 % ($P \leq 0,05$) соответственно. Схожая тенденция наблюдалась и в содержании жира, где превосходство сохранялось за теми же группами.

Таблица 2. Морфологические показатели яиц кур-несушек в возрасте 17-26 недель
Table 2. Morphological Indicators of eggs of laying hens in age 17-26 weeks

Показатели / Indicators	Группа / Group				
	контрольная / Control	I опытная / I experi- mental	II опытная / II experi- mental	III опытная / III experi- mental	IV опытная / IV experi- mental
Плотность яиц, г/см ³ / Density eggs, g/cm ³	1,09±0,02	1,08±0,02	1,09±0,02	1,10±0,03	1,09±0,02
Объем яиц, см ³ / Egg volume, cm ³	14,3±0,18	15,4±0,15*	15,5±0,37*	13,9±0,32	13,6±0,21*
Толщина скорлупы, мм / Shell thickness, mm	0,358±0,003	0,380±0,007*	0,372±0,006	0,378±0,006*	0,378±0,005*
Единицы Хау / Haugh Units	68,3±2,76	71,7±2,48	73,7±3,81	65,8±2,94	65,3±2,36

Примечание: * – P≤0,05 при сравнении опытных групп с контрольной
Note: * – P≤0.05 comparing the experimental groups with the control

Таблица 3. Химический состав яиц кур-несушек в возрасте 17-26 недель, %
Table 3. Chemical Composition of eggs of laying hens in age 17-26 weeks, %

Показатели / Indicators	Группа / Group				
	контрольная / Control	I опытная / I experi- mental	II опытная / II experi- mental	III опытная / III experi- mental	IV опытная / IV experi- mental
Белок / Protein	12,90±0,16	13,18±0,13	14,25±0,34*	15,17±0,35*	14,01±0,21*
Жир / Fat	7,69±0,09	7,66±0,08	8,73±0,21*	11,39±0,26*	9,56±0,15*

Примечание: * – P≤0,05 при сравнении опытных групп с контрольной
Note: * – P≤0.05 comparing the experimental groups with the control

Таким образом, результаты исследования показали, что использование пробиотика в дозировке 1 и 0,5 г/кг совместно с микроэлементами, а также применение только комплекса микроэлементов, способствует увеличению содержания белка и жира в яйцах кур-несушек.

Обсуждение полученных результатов.

Применение новых соединений металлов и биоорганического компонента позволит повысить биодоступность минералов в рационах птицы (Pacheco ВН et al., 2017), что продемонстрировано в наших исследованиях.

Наблюдаемый положительный эффект, связанный со снижением поедаемости и конверсии кормов, увеличением массы и количества снесенных яиц на фоне применения пробиотических препаратов, описывался в похожих исследованиях другими учеными (Zhang КК et al., 2021). В исследованиях Davis GS и Anderson KE (2002) введение комплексного пробиотика, включающего *Lactobacillus*, *Enterococcus* и *Bifidobacterium* в дозировке 0,9 г/кг и 0,45 г/кг корма, наблюдалось увеличение массы яиц, сохранности птицы, а также лучшей конверсии корма по сравнению с контролем.

Полученные объективные результаты обеспечены биологическим действием комплекса органических форм микроэлементов и пробиотика, что объясняется, в частности, влиянием железа на метаболизм кислорода, энергетический и белковый виды обмен, влияющие на яйценоскость (Xie С et al., 2019). Недостаток марганца (Gheisari AA et al., 2011) и меди (Palanisamy V et al., 2023) в рационе сельскохозяйственной птицы может повысить процент аномально развитых яиц, истонченной скорлупы с проявлением эффекта полупрозрачности верхнего слоя, что негативно отражается

на яйценоскости и морфологических показателях и позволяет сделать вывод о влиянии данных микроэлементов на биохимические процессы в организме, отвечающие за формирование яиц.

Оценивая качественные показатели яиц в нашем исследовании при введении пробиотика в дозе 1,5 и 1 г/кг совместно с микроэлементами было отмечено увеличение процента белка в яйце на 0,69-1,62 % ($P \leq 0,05$), а желтка – на 0,53-1,07 % ($P \leq 0,05$), толщины скорлупы – на 3,91-6,14 % ($P \leq 0,05$), а единиц Хау – до 8 %, в то время как введение чистого комплекса микроэлементов в IV опытной группе, несмотря на увеличение количества яиц на 9,8 % и конверсии корма на 10 яиц на 16,1 %, приводило к снижению индексов формы, белка и желтка на 0,3-0,7 % и единиц Хау – на 4,4 %, что может быть связано с более низкой массой яиц в данной группе, уступающей контрольной на 2,1 %. Основной эффект по увеличению содержания белка и желтка связывают с введением пробиотиков, что объясняется увеличением синтеза белка и переносом воды из желтка (Lei K et al., 2013). Объяснением полученного стимулирующего эффекта является увеличение переваримости основных питательных веществ и лучшей усвояемостью кальция и фосфора в кишечнике, которые связывают со стимуляцией микрофлоры желудочно-кишечного тракта. Лактобактерии и бифидобактерии, входящие в состав пробиотика, увеличивают выработку жирных кислот, которая стимулируется лучшей ферментативной активностью в кишечнике (Borda-Molina D et al., 2018). Априори колонизация слепого кишечника молочнокислыми бактериями связана с улучшенной способностью этих видов бактерий подавлять патогенные штаммы благодаря сильному средству этих микроорганизмов к прикреплению к слизистой оболочке кишечника (Neijat M et al., 2019).

Органические формы микроэлементов (Cu, Mn, Zn) играют важную роль в образовании скорлупы во многом благодаря мукополисахаридам и изодесмозину, входящим в состав углекислой ангидразы. Указанные вещества обеспечивают стабильность и целостность структуры скорлупы. Медь участвует в синтезе лизилоксидазы – фермента, стабилизирующего коллагеновую матрицу скорлупы (Palanisamy V et al., 2023). Марганец необходим для синтеза гликопротеинов, формирующих каркас оболочки скорлупы (Saleh AA et al., 2020), а цинк усиливает активность карбоангидразы, обеспечивая правильное формирование кристаллов кальция в оболочке (Zarghi H et al., 2023).

Кальцитовые минералы образуются в процессе сложной реакции, начинающейся с участия витамина D3, необходимого для активации кальций-связывающих белков плазмы крови. Витамин D3 обеспечивает абсорбцию кальция в кишечнике, которая усиливается бактериями, входящими в состав пробиотика. Затем в печени и почках птицы D3 переходит в активную форму – кальцитриол, способствующую связыванию кальция белком остеопонтином (Mona RM Ahmed et al., 2023), который затем запускает процесс кальцификации скорлупы, в котором принимают участие ферменты, связанные с Cu, Zn и Mn, что в последствии увеличивает толщину скорлупы и ее прочность, благодаря лучшей форме ультраструктуры (Zhang YN et al., 2017).

Химический состав яйца также претерпел изменения при введении комплекса микроэлементов в органической форме совместно с пробиотиком – фиксировалось увеличение содержания белка и желтка во всех опытных группах. По сообщениям dos Reis JH et al. (2019), на химический состав влияет способность яиц к хранению, за которую отвечают антиоксидантные свойства в яйце. Органические формы селена способны повысить эти характеристики, одновременно с этим влияя на жирнокислотный состав и индекс желтка, что позволяет лучше удерживать влагу внутри яйца и продлевать сроки хранения.

Заключение.

Введение пробиотико-минерального комплекса с хелатными формами микроэлементов (Cu, Fe, Mn, Se, Zn) в рацион кур-несушек в период с 17- до 26-недельного возраста положительно влияет на массу яиц, эффективность использования кормов, морфологические показатели и химический состав, в то время как введение чистого комплекса микроэлементов увеличивает общее количество яиц, но снижает их массу и качественные показатели, что позволяет сделать вывод о том, что оптимальными результатами по совокупности показателей характеризовались опытные груп-

пы, в комплексе которым вводился пробиотик Лактобифадол-Форте в дозировке 1,5 г/кг и 1 г/кг совместно с хелатными формами микроэлементов.

Список источников

1. Влияние комбикормов со сниженным уровнем обменной энергии, лизина и метионина при использовании разных источников этих аминокислот на показатели неспецифического иммунитета, переваримость и использование основных питательных веществ и аминокислот мясными курами / В. И. Фисинин, Т. А. Егорова, И. А. Егоров и др. // Птицеводство. 2022. № 10. С. 58-63. [Fisinin VI, Egorova TA, Egorov IA, et al. The effects of diets with reduced levels of energy, lysine, and methionine and different dietary forms of these amino acids on non-specific immunity, natural resistibility, and nutrient digestibility in broiler breeder hens. Ptitsevodstvo. 2022;10:58-63. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.33845/0033-3239-2022-71-10-58-63>
2. Влияние цитрата кальция на производительность и качество яиц кур-несушек в раннепродуктивный период / Т.Н. Холодилина, А.С. Мустафина, Т.А. Климова, Е.В. Яушева, К.А. Казаев // Животноводство и кормопроизводство. 2025. Т. 108. № 2. С. 129-142. [Kholodilina TN, Mustafina AS, Klimova TA, Yausheva EV, Kazaev KA. Effect of calcium citrate on egg quality and quantity of laying hens in early laying period. Animal Husbandry and Fodder Production. 2025;108(2):129-142. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-108-2-129>
3. ГОСТ 31469-2012. Пищевые продукты переработки яиц сельскохозяйственной птицы. Методы физико-химического анализа. Введ. 01.07.2013. М.: Стандартиформ, 2014. 39 с. [GOST 31469-2012. Foodstuffs of processed domestic poultry eggs. Methods for physicochemical analysis. Vved. 01.07.2013. Moscow: Standartinform; 2014:39 p. (In Russ.)].
4. Кавтарашвили А.Ш. Усовершенствованные методики ускоренного определения эффективности производства птицеводческой продукции // Вестник ОрёлГАУ. 2014. № 5(50). С. 182-186. [Kavtarashvily ASH. Improved methods of accelerated efficiency determination of poultry product manufacturing. Vestnik OrelGAU. 2014;5(50):182-186. (In Russ.)].
5. Критерии оценки качества яиц / В.И. Мойсевич, В.В. Матюхина, Е.С. Васильева, Т.П. Гущина, В.А. Семейкина, А.А. Каминская // Молодые ученые - науке и практике АПК: материалы науч.-практ. конф. аспирантов и молодых ученых (г. Витебск, 27-28 апр. 2023 г.). Витебск: Учреждение образования "Витебская ордена "Знак Почета" государственная академия ветеринарной медицины", 2023. С. 304-307. [Moisevich VI, Matyukhina VV, Vasilyeva ES, Gushchina TP, Semeykina VA, Kaminskaya AA. Egg quality criteria. (Conference proceedings) Molodye uchenye - nauke i praktike APK: materialy nauch.-prakt. konf. aspirantov i molodyh uchenyh (g. Vitebsk, 27-28 apr. 2023 g.). Vitebsk: Uchrezhdenie obrazovaniya "Vitebskaja ordena "Znak Pocheta" gosudarstvennaja akademiya veterinarnoj mediciny"; 2023:304-307. (In Russ.)].
6. Лебедев С.В., Кван О.В., Суханова О.Н. Особенности обмена химических элементов в организме кур-несушек при введении в рацион ферментных, пробиотических и антибиотических препаратов // Вестник мясного скотоводства. 2016. № 2(94). С. 81-90. [Lebedev SV, Kvan OV, Sukanova ON. Peculiarities of chemical elements exchange in the body of hens after introduction of enzymatic, probiotic and antibiotic preparations in the diet. Herald of Beef Cattle Breeding. 2016;94(2):81-90. (In Russ.)].
7. Методика проведения научных и производственных исследований по кормлению сельскохозяйственной птицы. Молекулярно-генетические методы определения микрофлоры кишечника / И.А. Егоров и др. Сергиев Посад: Весь Сергиев Посад, 2013. 51 с. [Egorov IA et al. Metodika provedeniya nauchnikh i proizvodstvennikh issledovaniy po kormleniyu selskokhozyaistvennoi ptitsi. Molekulyarno-geneticheskie metodi opredeleniya mikroflori kishechnika. Sergiev Posad: Ves' Sergiev Posad; 2013:51 p. (In Russ.)].
8. Методическое пособие по кормлению сельскохозяйственной птицы / И.А. Егоров и др.; под общ. ред. В.И. Фисинина, И.А. Егорова. Сергиев Посад: ВНИТИП, 2021. 359 с. [Egorov IA et al. Metodicheskoe posobie po kormleniyu selskokhozyaistvennoi ptitsi / I.A. Egorov i dr.; pod obsh. red. V.I. Fisininina, I.A. Egorova. Sergiev Posad: VNIITIP, 2021. 359 s. (In Russ.)].

et al. Metodicheskoe posobie po kormleniyu selskokhozyaistvennoi ptitsi. Pod obshch. red. Fisina VI, Yegorova IA, Sergiev Posad: VNITIP; 2021:57 p. (*In Russ.*).

9. Морфобioхимические показатели крови цыплят-бройлеров при применении кремнийсодержащей кормовой добавки / Л.Л. Мусабаева, Е.А. Сизова, Я.В. Лутковская, А.П. Иванищева // Животноводство и кормопроизводство. 2022. Т. 105. № 2. С. 95-106. [Musabaeva LL, Sizova EA, Lutkovskaya YaV, Ivanishheva AP. Morphobiochemical parameters of blood of broilers using a silicon-containing feed additive. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022;105(2):95-106. (*In Russ.*). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-105-2-95>

10. Оценка эффективности пробиотиксодержащих препаратов на различных носителях на продуктивные качества сельскохозяйственной птицы / С.В. Лебедев, С.С. Акимов, О.В. Маршинская, Т.В. Казакова // Достижения науки и техники АПК. 2023. Т. 37. № 4. С. 26-30. [Lebedev SV, Akimov SS, Marshinskaya OV, Kazakova TV. Evaluation of the effectiveness of probiotic-containing preparations on various carriers on the productive qualities of poultry. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*. 2023;37(4):26-30. (*In Russ.*). https://doi.org/10.53859/02352451_2023_37_4_26

11. Применение пробиотических препаратов в кормлении кур-несушек и цыплят-бройлеров (обзор) / Ю.К. Петруша, Д.А. Силин, С.В. Лебедев, В.В. Гречкина // Аграрный научный журнал. 2023. № 12. С. 116-121. [Petrusha YuK, Silin DA, Lebedev SV, Grechkina VV. The application of probiotic preparations in the feeding of laying hens and broiler chickens (review). *The Agrarian Scientific Journal*. 2023;12:116-121. (*In Russ.*). <https://doi.org/10.28983/asj.y2023i12pp116-121>

12. Руководство по работе с птицей кросса Хайсекс Браун / Т.А. Хмельницкая и др. Кашино: ОАО ППЗ «Свердловский», 2007. 78 с. [Khmelnitskaya TA et al. *Rukovodstvo po rabote s pticej krossa Hajseks Braun*. Kashino: ОАО PPZ «Sverdlovskij»; 2007:78 p. (*In Russ.*).

13. Abd El-Hack ME, Mahgoub SA, Alagawany M, Ashour EA. Improving productive performance and mitigating harmful emissions from laying hen excreta via feeding on graded levels of corn DDGS with or without *Bacillus subtilis* probiotic. *J Anim Physiol Anim Nutr*. 2017;101(5):904-913. <https://doi.org/10.1111/jpn.12522>

14. Borda-Molina D, Seifert J, Camarinha-Silva A. Current perspectives of the chicken gastrointestinal tract and its microbiome. *Computational and Structural Biotechnology Journal*. 2018;16:131-139. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2018.03.002>

15. Brugger D, Windisch WM. Environmental responsibilities of livestock feeding using trace mineral supplements. *Animal Nutrition*. 2015;1(3):113-118. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2015.08.005>

16. Davis GS, Anderson KE. The effects of feeding the direct-fed microbial, primalac, on growth parameters and egg production in single comb white leghorn hens. *Poultry Science*. 2002;81(6):755-759. <https://doi.org/10.1093/ps/81.6.755>

17. dos Reis JH, Gebert RR, Fortuoso BF, Dos Santos DS, Souza CF, Baldissera MD, Tavernari FC, Boiago MM, Paiano D, Da Silva AS. Selenomethionine as a dietary supplement for laying hens: impacts on lipid peroxidation and antioxidant capacity in fresh and stored eggs. *J Food Biochem*. 2019;43(8):e12957. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12957>

18. Gheisari AA, Sanei A, Samie A, Gheisari MM, Toghyani M. Effect of diets supplemented with different levels of manganese, zinc, and copper from their organic or inorganic sources on egg production and quality characteristics in laying hens. *Biol Trace Elem Res*. 2011;142:557-571. <https://doi.org/10.1007/s12011-010-8779-x>

19. Lei K et al. Influence of dietary inclusion of *Bacillus licheniformis* on laying performance, egg quality, antioxidant enzyme activities, and intestinal barrier function of laying hens. *Poultry Science*. 2013;92(9):2389-2395. <https://doi.org/10.3382/ps.2012-02686>

20. Mona RM Ahmed, Wesam A Fares, Abdalla EA, Rizk RE. Effect of eggshell osteopontin protein on skeletal embryonic development and hatching traits of developed chicken strains. *Egyptian Poultry Science Journal*. 2023;37(1):73-90.

21. Neijat M, Shirley RB, Barton J, Thierry P, Welsher A, Kiarie E. Effect of dietary supplementation of *Bacillus subtilis* DSM29784 on hen performance, egg quality indices, and apparent retention of dietary components in laying hens from 19 to 48 weeks of age. *Poult Sci.* 2019;98(11):5622-5635. <https://doi.org/10.3382/ps/pez324>
22. Pacheco BH, Nakagi VS, Kobashigawa EH, Caniatto AR, Faria DE, Filho DEF. Dietary levels of zinc and manganese on the performance of broilers between 1 to 42 days of age. *Braz J Poult Sci.* 2017;19(2):171-178. <https://doi.org/10.1590/1806-9061-2016-0323>
23. Palanisamy V, Pc S, Pineda L, Han Y. Effect of supplementing hydroxy trace minerals (Cu, Zn, and Mn) on egg quality and performance of laying hens under tropical conditions. *Anim Biosci.* 2023;36(11):1709-1717. <https://doi.org/10.5713/ab.22.0416>
24. Saleh AA, Eltantawy MS, Gawish EM, Younis HH, Amber KA, Abd El- Moneim AEME, Ebeid TA. Impact of dietary organic mineral supplementation on reproductive performance, egg quality characteristics, lipid oxidation, ovarian follicular development, and immune response in laying hens under high ambient temperature. *Biol Trace Elem Res.* 2020;195(2):506-514. <https://doi.org/10.1007/s12011-019-01861-w>
25. Xie C, Elwan HAM, Elnesr SS, Dong XY, Zou XT. Effect of iron glycine chelate supplementation on egg quality and egg iron enrichment in laying hens. *Poult Sci.* 2019;98(12):7101-7109. <https://doi.org/10.3382/ps/pez421>
26. Zarghi H, Hassanabadi A, Barzegar N. Effect of organic and inorganic manganese supplementation on performance and eggshell quality in aged laying hens. *Vet Med Sci.* 2023;9(3):1256-1268. <https://doi.org/10.1002/vms3.1116>
27. Zhang KK, Han MM, Dong YY, Miao ZQ, Zhang JZ, Song XY, Feng Y, Li HF, Zhang LH, Wei QY, Xu JP, Gu DC, JH, Li. Low levels of organic compound trace elements improve the eggshell quality, antioxidant capacity, immune function, and mineral deposition of aged laying hens. *Animal.* 2021;15(12):100401. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100401>
28. Zhang YN, Wang J, Zhang HJ, Wu SG, Qi GH. Effect of dietary supplementation of organic or inorganic manganese on eggshell quality, ultrastructure, and components in laying hens. *Poult Sci.* 2017;96(7):2184-2193. <https://doi.org/10.3382/ps/pew495>

References

1. Fisinin VI, Egorova TA, Egorov IA, et al. The effects of diets with reduced levels of energy, lysine, and methionine and different dietary forms of these amino acids on non-specific immunity, natural resistibility, and nutrient digestibility in broiler breeder hens. *Poultry Farming.* 2022;10:58-63. <https://doi.org/10.33845/0033-3239-2022-71-10-58-63>
2. Kholodilina TN, Mustafina AS, Klimova TA, Yausheva EV, Kazaev KA. Effect of calcium citrate on egg quality and quantity of laying hens in early laying period. *Animal Husbandry and Fodder Production.* 2025;108(2):129-142. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-108-2-129>
3. State Standart 31469-2012. Foodstuffs of processed domestic poultry eggs. Methods for physicochemical analysis. Implementation date 01.07.2013. Moscow: Standartinform; 2014:39 p.
4. Kavtarashvily ASh. Improved methods of accelerated efficiency determination of poultry product manufacturing. *Vestnik OrelGAU.* 2014;5(50):182-186.
5. Moisevich VI, Matyukhina VV, Vasilyeva ES, Gushchina TP, Semeykina VA, Kamin-skaya AA. Egg quality criteria. (Conference proceedings) Young Scientists in Science and Agriculture: Proceedings of the Scientific and Practical Conference of Postgraduate Students and Young Scientists (Vitebsk, April 27-28, 2023). Vitebsk: Vitebsk order of the Badge of Honor State Academy of Veterinary Medicine; 2023:304-307.
6. Lebedev SV, Kvan OV, Suhanova ON. Peculiarities of chemical elements exchange in the body of hens after introduction of enzymatic, probiotic and antibiotic preparations in the diet. *Herald of Beef Cattle Breeding.* 2016;94(2):81-90.

7. Egorov IA et al. Methodology for conducting scientific and industrial research on poultry feeding. Molecular and genetic methods for determining intestinal microflora. Sergiev Posad: Ves' Ser-giev Posad; 2013:51 p.
8. Egorov IA et al. Guidelines for Feeding Poultry / I.A. Egorov et al.; edited by Fisinin VI, Yegorov IA. Sergiev Posad: FSC ARRTPI; 2021:57 p.
9. Musabaeva LL, Sizova EA, Lutkovskaya YaV, Ivanishheva AP. Morphobiochemical pa-rameters of blood of broilers using a silicon-containing feed additive. *Animal Husbandry and Fodder Pro-duction*. 2022;105(2):95-106. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-105-2-95>
10. Lebedev SV, Akimov SS, Marshinskaya OV, Kazakova TV. Evaluation of the effective-ness of probiotic-containing preparations on various carriers on the productive qualities of poultry. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*. 2023;37(4):26-30. https://doi.org/10.53859/02352451_2023_37_4_26
11. Petrusha YuK, Silin DA, Lebedev SV, Grechkina VV. The application of probiotic prepa-rations in the feeding of laying hens and broiler chickens (review). *The Agrarian Scientific Journal*. 2023;12:116-121. <https://doi.org/10.28983/asj.y2023i12pp116-121>
12. Khmel'nitskaya TA et al. Guide to Working with Hisex Brown Cross Poultry. Kashino: Joint Stock Company Breeding Poultry Farm «Sverdlovskij»; 2007:78 p.
13. Abd El-Hack ME, Mahgoub SA, Alagawany M, Ashour EA. Improving productive per-formance and mitigating harmful emissions from laying hen excreta via feeding on graded levels of corn DDGS with or without *Bacillus subtilis* probiotic. *J Anim Physiol Anim Nutr*. 2017;101(5):904-913. <https://doi.org/0.1111/jpn.12522>
14. Borda-Molina D, Seifert J, Camarinha-Silva A. Current perspectives of the chicken gas-trointestinal tract and its microbiome. *Computational and Structural Biotechnology Journal*. 2018;16:131-139. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2018.03.002>
15. Brugger D, Windisch WM. Environmental responsibilities of livestock feeding using trace mineral supplements. *Animal Nutrition*. 2015;1(3):113-118. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2015.08.005>
16. Davis GS, Anderson KE. The effects of feeding the direct-fed microbial, primalac, on growth parameters and egg production in single comb white leghorn hens. *Poultry Science*. 2002;81(6):755-759. <https://doi.org/10.1093/ps/81.6.755>
17. dos Reis JH, Gebert RR, Fortuoso BF, Dos Santos DS, Souza CF, Baldissera MD, Taver-nari FC, Boiago MM, Paiano D, Da Silva AS. Selenomethionine as a dietary supplement for laying hens: impacts on lipid peroxidation and antioxidant capacity in fresh and stored eggs. *J Food Biochem*. 2019;43(8):e12957. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12957>
18. Gheisari AA, Sanei A, Samie A, Gheisari MM, Toghyani M. Effect of diets supplemented with different levels of manganese, zinc, and copper from their organic or inorganic sources on egg pro-duction and quality characteristics in laying hens. *Biol Trace Elem Res*. 2011;142:557-571. <https://doi.org/10.1007/s12011-010-8779-x>
19. Lei K et al. Influence of dietary inclusion of *Bacillus licheniformis* on laying performance, egg quality, antioxidant enzyme activities, and intestinal barrier function of laying hens. *Poultry Science*. 2013;92(9):2389-2395. <https://doi.org/10.3382/ps.2012-02686>
20. Mona RM Ahmed, Wesam A Fares, Abdalla EA, Rizk RE. Effect of eggshell osteopontin protein on skeletal embryonic development and hatching traits of developed chicken strains. *Egyptian Poultry Science Journal*. 2023;37(1):73-90.
21. Neijat M, Shirley RB, Barton J, Thierry P, Welsher A, Kiarie E. Effect of dietary supple-mentation of *Bacillus subtilis* DSM29784 on hen performance, egg quality indices, and apparent retention of dietary components in laying hens from 19 to 48 weeks of age. *Poult Sci*. 2019;98(11):5622-5635. <https://doi.org/10.3382/ps/pez324>
22. Pacheco BH, Nakagi VS, Kobashigawa EH, Caniatio AR, Faria DE, Filho DEF. Dietary levels of zinc and manganese on the performance of broilers between 1 to 42 days of age. *Braz J Poult Sci*. 2017;19(2):171-178. <https://doi.org/10.1590/1806-9061-2016-0323>

23. Palanisamy V, Pe S, Pineda L, Han Y. Effect of supplementing hydroxy trace minerals (Cu, Zn, and Mn) on egg quality and performance of laying hens under tropical conditions. *Anim Biosci.* 2023;36(11):1709-1717. <https://doi.org/10.5713/ab.22.0416>
24. Saleh AA, Eltantawy MS, Gawish EM, Younis HH, Amber KA, Abd El- Moneim AEME, Ebeid TA. Impact of dietary organic mineral supplementation on reproductive performance, egg quality characteristics, lipid oxidation, ovarian follicular development, and immune response in laying hens under high ambient temperature. *Biol Trace Elem Res.* 2020;195(2):506-514. <https://doi.org/10.1007/s12011-019-01861-w>
25. Xie C, Elwan HAM, Elnesr SS, Dong XY, Zou XT. Effect of iron glycine chelate supplementation on egg quality and egg iron enrichment in laying hens. *Poult Sci.* 2019;98(12):7101-7109. <https://doi.org/10.3382/ps/pez421>
26. Zarghi H, Hassanabadi A, Barzegar N. Effect of organic and inorganic manganese supplementation on performance and eggshell quality in aged laying hens. *Vet Med Sci.* 2023;9(3):1256-1268. <https://doi.org/10.1002/vms3.1116>
27. Zhang KK, Han MM, Dong YY, Miao ZQ, Zhang JZ, Song XY, Feng Y, Li HF, Zhang LH, Wei QY, Xu JP, Gu DC, JH, Li. Low levels of organic compound trace elements improve the eggshell quality, antioxidant capacity, immune function, and mineral deposition of aged laying hens. *Animal.* 2021;15(12):100401. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100401>
28. Zhang YN, Wang J, Zhang HJ, Wu SG, Qi GH. Effect of dietary supplementation of organic or inorganic manganese on eggshell quality, ultrastructure, and components in laying hens. *Poult Sci.* 2017;96(7):2184-2193. <https://doi.org/10.3382/ps/pew495>

Информация об авторах:

Дмитрий Алексеевич Силин, младший научный сотрудник лаборатории прецизионных технологий в сельском хозяйстве, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, Россия, Оренбургская область, г. Оренбург, ул. 9 Января, д. 29, тел.: 89534575189.

Святослав Валерьевич Лебедев, доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории биологических испытаний и экспертиз, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, Россия, Оренбургская область, г. Оренбург, ул. 9 Января, д. 29, тел.: 89123458738.

Information about the authors:

Dmitriy A Silin, Junior Researcher of the Laboratory of Precision Technologies in Agriculture, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29, 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000, tel.: 89534575189.

Svyatoslav V Lebedev, Dr. Sci. (Biology), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of Biological Tests and Examinations, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 29, 9 Yanvarya St., Orenburg, 460000, tel.: 89123458738.

Статья поступила в редакцию 02.02.2026; одобрена после рецензирования 02.03.2026; принята к публикации 16.03.2026.

The article was submitted 02.02.2026; approved after reviewing 02.03.2026; accepted for publication 16.03.2026.