

Физиология человека и животных / Human and Animal Physiology

Научная статья

Original article

DOI: 10.12731/2658-6649-2026-18-2-1517

EDN: QDWAIT

УДК 57.042



Дозозависимое влияние цитрата кальция на процессы минерализации, эндокринные функции и метаболический статус у кур-несушек

К.С. Нечитайло^{1,2}, Т.Н. Холодилина^{1,2}, Е.А. Сизова^{1,2}, Д.Е. Шошин^{1,2},
К.В. Рязанцева^{1,2}, Е.В. Яшуева^{1,2}

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

²Оренбургский государственный университет, Оренбург, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. Цитрат кальция рассматривается как перспективная органическая форма кальция с высокой биодоступностью.

Цель – оценка динамики минерального обмена, метаболического статуса и качества яичной скорлупы у кур-несушек (*Gallus gallus L.*) кросса Хайсекс Браун при частичной замене известняка (CaCO_3) в рационе птицы на цитрат кальция ($\text{Ca}_3(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2$).

Материалы и методы. Опыт проведен на курах-несушках, распределённых между контрольной и тремя опытными группами ($n = 30$): ОГ1, ОГ2 и ОГ3, где 10%, 20% и 30% известняка рациона заменяли на цитрат кальция. Исследовали морфологические и биохимические показатели крови, уровень гормонов, маркеры костного ремоделирования, а также элементный состав сыворотки, берцовой кости и яичной скорлупы.

Результаты. Наиболее выраженные положительные сдвиги были выявлены при 20% замещении: увеличение концентраций Ca, P и K в скорлупе, снижение H/L-индекса, повышение уровня остеопротегерина (OPG) и снижение концентрации паратиреоидного гормона в сыворотке крови. Напротив, при 30% замещении отмечены признаки метаболической нагрузки – рост концентрации АЛТ при одновременном снижении концентраций OPG, меди, цинка и железа. Во всех группах уменьшалось содержание Sr и Ba в костной ткани и скорлупе. Таким образом, замена 20% известняка рациона цитратом кальция целесообразна и способствует

улучшению минерального гомеостаза и качества скорлупы. Более высокие дозы требуют коррекции микроэлементного состава рациона. Цитрат кальция проявляет себя как биоактивный модулятор минерального и энергетического обмена.

Ключевые слова: хлорид кальция; цитрат кальция; яйценоскость; курица-несушка; скелет; остеопротегерин; паратиреоидный гормон

Для цитирования. Нечитайло, К. С., Холодилина, Т. Н., Сизова, Е. А., Шошин, Д. Е., Рязанцева, К. В., & Яушева, Е. В. (2026). Дозозависимое влияние цитрата кальция на процессы минерализации, эндокринные функции и метаболический статус у кур-несушек. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 72–102. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1517>

Dose-dependent effect of calcium citrate on mineralization, endocrine regulation, and metabolic status in laying hens

K.S. Nechitailo^{1,2}, T.N. Kholodilina^{1,2}, E.A. Sizova^{1,2}, D.E. Shoshin^{1,2},
K.V. Ryazantseva^{1,2}, E.V. Yausheva^{1,2}

¹*Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies
of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russian Federation*

²*Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation*

Abstract

Background. Calcium citrate is considered as a promising organic form of calcium with high bioavailability.

Purpose. Assessment of the dynamics of mineral metabolism, metabolic status and eggshell quality in laying hens (*Gallus gallus* L.) of the Hayesex Brown cross with partial replacement of limestone (CaCO_3) in the poultry diet with calcium citrate ($\text{Ca}_3(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2$).

Materials and methods. The experiment was carried out on laying hens distributed between the control and three experimental groups ($n = 30$): EG1, EG2 and EG3, where 10%, 20% and 30% of the limestone of the diet was replaced with calcium citrate. Morphological and biochemical parameters of blood, hormone levels, markers of bone remodeling, as well as the elemental composition of serum, tibia and eggshell were studied.

Results. The most pronounced positive changes were detected with 20% substitution: increased concentrations of Ca, P, and K in the shell, decreased H/L index, increased levels of osteoprotegerin (OPG), and decreased serum concentrations of parathyroid hormone. On the contrary, with a 30% substitution, signs of metabolic stress were noted – an increase in ALT concentration with a simultaneous decrease in OPG, copper, zinc, and iron concentrations. In all groups, the content of Sr and Ba in bone tissue and

shell decreased. Thus, replacing 20% of the limestone in the diet with calcium citrate is advisable and helps to improve mineral homeostasis and shell quality. Higher doses require correction of the trace element composition of the diet. Calcium citrate manifests itself as a bioactive modulator of mineral and energy metabolism.

Keywords: calcium chloride; calcium citrate; egg production; laying hen; skeleton; osteoprotegerin; parathyroid hormone

For citation. Nechitailo, K. S., Kholodilina, T. N., Sizova, E. A., Shoshin, D. E., Ryazantseva, K. V., & Yausheva, E. V. (2026). Dose-dependent effect of calcium citrate on mineralization, endocrine regulation, and metabolic status in laying hens. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 72–102. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1517>

Введение

В условиях растущей общественной озабоченности вопросами благополучия сельскохозяйственных животных в современном птицеводстве активно рассматриваются альтернативные системы содержания и кормления коммерческих кур-несушек [39].

Селекция кур-несушек по продуктивным признакам привела к существенным генетическим изменениям, проявившимся в более раннем половом созревании. Одновременно отмечается повышение эффективности использования корма, снижение естественной смертности и уменьшение живой массы при сохранении или увеличении продуктивности [11]. Кроме того, селекционная работа позволила достичь более высоких показателей массы яйца и качества скорлупы, а также обеспечить стабильную яйценоскость на протяжении всего продуктивного периода [23].

Одним из ключевых последствий интенсивной селекции является также повышенная предрасположенность кур-несушек к метаболическим нарушениям, обусловленным высоким уровнем яйценоскости [7]. К числу таких патологий относятся нарушения кальциево-фосфорного обмена, жировая инфильтрация печени и остеопороз, которые оказывают значительное влияние на физиологическое состояние птицы [30]. Тяжесть и выраженность этих расстройств варьируют в зависимости от генетических особенностей, возраста птицы, а также условий содержания, включая режим освещения, плотность посадки, доступ к корму и качество минеральных добавок. Особое внимание в этом контексте требует состояние костной ткани, поскольку скелет кур-несушек испытывает колоссальную нагрузку в период активной яйцекладки [23]. Костная ткань выполняет

функцию основного депо кальция и фосфора в организме птицы. Кальций является незаменимым макроэлементом, необходимым для обеспечения минерализации скелета и формирования яичной скорлупы [53]. Для формирования яйца необходимо около 2,2 г кальция. Около 60–75% кальция, необходимого для образования яичной скорлупы, поступает непосредственно из рациона. В то время как 25–40% мобилизуется непосредственно из костной ткани, в первую очередь из медуллярной кости – специализированной формы костного вещества, формирующейся у птиц в предкладковый период [15]. Установлено, что потребность кур-несушек в кальции существенно варьирует в зависимости от физиологического статуса и этапа продуктивного цикла, достигая максимума в период интенсивной яйцекладки [53].

Именно поэтому качество и биодоступность источников кальция в рационе становятся критически важными факторами не только для обеспечения высокого качества скорлупы, но и для профилактики системного остеопороза, переломов и других скелетных патологий. В традиционных рационах в качестве основного источника кальция используется известняк, однако его усвоение зависит от уровня кислотности в желудке и может быть нестабильным, особенно у ремонтного молодняка кур в предкладковый период с ещё не до конца сформированной пищеварительной системой [37].

Способность организма к эффективному депонированию и мобилизации кальция является ключевым фактором, определяющим репродуктивную способность кур-несушек [17]. Полноценное развитие скелета, включающее достижение максимальной длины костей и формирование достаточной массы кортикальной костной ткани, должно быть завершено до полового созревания, поскольку дальнейший прирост кортикальной кости после активации репродуктивной функции практически отсутствует [47]. Включение гипоталамо-гипофизарно-гонадной оси и рост концентрации 17β -эстрадиола в предкладковый период индуцируют функциональную трансформацию остеобластов [16; 17]. Их синтетическая активность переключается с минерализации кортикальной кости на образование медуллярной костной ткани. Данная ткань формируется на эндостальной поверхности трубчатых костей, преимущественно в полостях бедренной и большеберцовой костей, где выступает динамическим депо кальция для обеспечения минерализации яичной скорлупы в период яйцекладки [47]. Таким образом, предкладковый период представляет собой критически важный период, в котором необходимо заложить минеральный резерв ске-

лета, способный выдержать интенсивную репродуктивную нагрузку [20]. В данных условиях качество и биодоступность источников кальция в рационе становятся определяющими факторами [17].

В связи с этим особый интерес представляют органические формы кальция, характеризующиеся более высокой биодоступностью [35; 38; 52]. В частности, экспериментальные данные свидетельствуют о том, что включение лактата кальция в рацион кур-несушек способствует улучшению продуктивных показателей и качества яиц, что, вероятно, обусловлено его положительным влиянием на метаболизм кальция, функциональное состояние кишечного эпителия, а также на иммунологическую реактивность слизистой оболочки тонкой кишки. Повышенная биодоступность лактата кальция по сравнению с неорганическими формами обеспечивает более эффективное всасывание ионов Ca^{2+} в тонком кишечнике, что особенно актуально в период интенсивного яйцекладки [35]. Также добавление в рацион 0,5% бутирата кальция или 0,5% пропионата кальция улучшило качество яичной скорлупы у старых кур-несушек, возможно, за счёт модуляции минерального обмена – снижения отложения или повышения мобилизации кальция и фосфора в костной ткани [38]. Таким образом, использование органических форм кальция представляет собой перспективную стратегию коррекции минерального питания кур-несушек, направленную на поддержание гомеостаза кальция.

В частности, целью представленного исследования стала оценка динамики минерального обмена, метаболического статуса и качества яичной скорлупы у кур-несушек (*Gallus gallus L.*) кросса Хайсекс Браун при частичной замене известняка (CaCO_3) в рационе птицы на цитрат кальция ($\text{Ca}_3(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2$).

Материалы и методы

Объектом исследований были куры-несушки (*Gallus gallus L.*) кросса Хайсекс Браун. Для проведения исследований было отобрано 120 голов ремонтного молодняка промышленного стада, в возрасте 13 недель. Птица была распределена методом пар-аналогов на 4 группы ($n = 30$): Контроль [Control] – основной рацион (ОР), где в качестве источника кальция использовали известняковую муку (CaCO_3 , ООО «Инеско», Россия); I, или ОГ1 [EG I] – ОР с заменой известняковой муки на цитрат кальция ($\text{Ca}_3(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2$) в количестве 10%; II, или ОГ2 [EG II] – ОР с заменой известняковой муки на цитрат кальция ($\text{Ca}_3(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2$) в количестве 20%; III, или ОГ3 [EG III] – ОР с заменой известняковой муки на цитрат кальция

($\text{Ca}_3(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2$) в количестве 30%. Замену известняковой муки, содержащейся в основном рационе на цитрат кальция проводили после двухнедельного подготовительного периода (акклиматизации) в возрасте 15 недель. Содержание кальция во всех группах в пересчете на ионы кальция было одинаковым. Длительность эксперимента составила 5 недель. Кормление птицы осуществлялось в соответствии с возрастными нормами, согласно рекомендациям ВНИТИП [1]. Поение птицы осуществлялось без ограничений. Состав основного рациона представлен в табл. 1.

Таблица 1.

Состав основного рациона кур-несушек (*Gallus gallus* L.)
Table 1. Composition of the Main Diet for Laying Hens (*Gallus gallus* L.)

Компонент	Масса вещества, г/кг
Пшеница	500
Ячмень	200
Кукуруза	20
Жмых подсолнечный	50
Шрот соевый	50
Рыбная мука	50
Подсолнечное масло	10
Дрожжи кормовые	5
Отруби	40
Известняковая мука	65
Премикс	10

Примечание: В 100 г. основного рациона содержится: обменная энергия – 11,3 МДж/кг; сырой протеин – 16 %; сырой жир – 4,5 %; сырая клетчатка – 4,5 %; крахмал – 2,8 %; лизин – 0,71; метионин – 0,37 %, метионин+цистин – 0,58 %; кальций – 2,4 %; фосфор общий – 0,6 %, фосфор усвояемый – 0,51 %.

Note: Per 100 g of the main diet: metabolizable energy – 11.3 MJ/kg; crude protein – 16%; crude fat – 4.5%; crude fiber – 4.5%; starch – 2.8%; lysine – 0.71; methionine – 0.37%; methionine + cystine – 0.58%; calcium – 2.4%; total phosphorus – 0.6%; available phosphorus – 0.51%.

Препарат цитрата кальция получали путем химического синтеза из доломитовой муки (ООО «Аккерманцемент», Россия). Для получения цитрата кальция в раствор технической лимонной кислоты (концентрация 10%) вносили доломитовую муку, ожидали окончания пенообразования и оставляли на свету на 2 часа. В результате образовывались микрокристаллы цитрата кальция, являющиеся центрами кристаллизации. Целевой продукт (цитрат кальция) постепенно выпадал в осадок. В данном методе не требуется использовать систему нагрева. Далее, при необходимости

получить соль с нужной оводненностью, можно использовать сушильный шкаф (при температуре 80–90°C можно за 3–4 часа достичь 4-гидратной оводненности), также можно выполнить сушку на воздухе. Практический выход реакции = 88,77%, что, в совокупности с малыми затратами на получение, является плюсом использования данного метода.

Уровень гормонов-регуляторов кальциевого обмена в организме определяли в сыворотке крови методом иммуноферментного анализа с помощью наборов ELISA Kit (25OHD₃ – витамин D₃, CTX1 – поперечно-сшитый карбоксиконцевой телопептид I типа, OPG – остеопротегерин, PTH – паратиреоидный гормон, CT – кальцитонин) (Cloud-Clone, KHP) на многофункциональном микропланшетном ридере TECAN Infinite F200 (Tecan Austria GmbH, Австрия).

Для проведения масс-спектрального элементного анализа берцовые кости, полученные при убое, высушивали и тщательно измельчали без обезжиривания. Порцию полученного образца массой 0,2 г взвешивали с точностью до 0,0001 г. Добавляли 4 мл азотной кислоты (особой степени очистки), разрушая органическую матрицу и проводя минерализацию в микроволновой системе подготовки образцов TOPEX+ (PREEKEM, Китай) при температуре 180°C и максимальном давлении 22 атм. Полученные растворы анализировали с 10-кратным разбавлением на одноквадрупольном масс-спектрометре Agilent 7900 ICP-MS с генератором ионов в виде индуктивно связанной плазмы (Agilent, США). Cr, Fe, Zn и As были проанализированы в гелиевом режиме с использованием коллизионной ячейки, остальные элементы были определены без ее использования. Стандартные растворы были получены из многокомпонентной смеси «111355» фирмы Merck (Германия) с добавлением дополнительного монокомпонентного государственного стандартного образца. Были определены концентрации следующих элементов: Ca, P, Mg, Na, K, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Se, Zn, As, B, Ni, Sr, Al, Ba, Bi, Cd, Pb, Tl, Ag, In, Ga.

Кровь для анализа брали из подкрыльцовой вены при убое птицы. Анализ биохимических показателей сыворотки крови (общий белок, альбумин, креатинин, мочевины, билирубин (общий, прямой), холестерин, глюкоза, триглицериды, липопротеины высокой и низкой плотности) осуществляли при помощи коммерческих биохимических наборов для ветеринарии ДиаВетТест (Россия) на автоматическом биохимическом анализаторе CS-T240 («Dirui Industrial Co., Ltd», Китай). Морфологические показатели крови (эритроциты, концентрация гемоглобина, среднее содержание гемоглобина в эритроците (MCH), тромбоциты, лейкоциты, лимфоциты, моноциты, гранулоциты, гематокрит) устанавливали с помощью автоматического гематологического анализатора URIT-2900 Vet Plus, (URIT Medial Electronic Co., Китай).

Статистический анализ. Статистические данные были обработаны с использованием пакета программ Statistica 12 (StatSoft Inc., США) и Microsoft Excel (Microsoft Corporation, США). Нормальность распределения данных была проверена с помощью теста на соответствие Колмогорова-Смирнова. Для оценки статистической значимости был использован параметрический t-критерий Стьюдента при уровнях значимости 0,05 (*), 0,01 (**), 0,001 (***).

Результаты и обсуждение

Морфология и биохимия крови. Результаты морфологического и биохимического анализа крови свидетельствуют об изменении ряда показателей на фоне введения исследуемого фактора (табл. 2). Среди морфологических показателей наблюдалось увеличение доли лимфоцитов в лейкоцитарной формуле – на 6,6% ($p \leq 0,01$) в I опытной группе и на 6,9% ($p \leq 0,05$) во II группе по сравнению с контролем. Одновременно отмечено снижение содержания гетерофилов на 4,6% и 6,5% ($p \leq 0,05$) в I и II опытных группах, соответственно. На фоне выявленных сдвигов в лейкоцитарной формуле особое значение имеет анализ соотношения гетерофилов к лимфоцитам (Н/Л-индекс) – маркера функциональной активности иммунной системы у сельскохозяйственных птиц. У птиц контрольной группы Н/Л-индекс составил $1,05 \pm 0,06$. В опытных группах выявлено снижение Н/Л-индекса: до $0,84 \pm 0,04$ (ОГ1) и $0,80 \pm 0,09$ (ОГ2).

Таблица 2.

Морфологические и биохимические показатели крови кур-несушек (*Gallus gallus L.*)

Table 2. Morphological and Biochemical Parameters of Blood in Laying Hens (*Gallus gallus L.*)

Показатели	Группы			
	Контроль	ОГ 1	ОГ 2	ОГ 3
Глюкоза, ммоль/л	$9,63 \pm 0,68$	$8,45 \pm 2,75$	$8,41 \pm 1,24$	$9,06 \pm 0,57$
Общий протеин, г/л	$42,4 \pm 5,0$	$31,4 \pm 11,5$	$31,3 \pm 8,6$	$29,5 \pm 4,9$
Альбумин, г/л	$18,0 \pm 2,1$	$12,0 \pm 6,4$	$11,7 \pm 3,8$	$10,7 \pm 3,2$
АЛТ, Ед/л	$33,8 \pm 1,9$	$22,2 \pm 5,1^*$	$28,5 \pm 8,3$	$51,7 \pm 6,7^*$
АСТ, Ед/л	$150,4 \pm 7,3$	$122,3 \pm 25,3$	$127,4 \pm 28,8$	$140,3 \pm 30,4$
Холестерин, ммоль/л	$2,3 \pm 0,89$	$1,81 \pm 0,67$	$2 \pm 0,65$	$1,8 \pm 0,33$
Триглицериды, ммоль/л	$10,40 \pm 0,66$	$7,73 \pm 1,07^*$	$10,60 \pm 3,71$	$8,94 \pm 1,03$
Креатинин, мкмоль/л	$11,80 \pm 0,05$	$15,40 \pm 1,58^*$	$17,30 \pm 1,79^{**}$	$16,90 \pm 2,32^*$
Мочевая кислота, мкмоль/л	$249,6 \pm 36,2$	$148,3 \pm 22,4^*$	$156,1 \pm 18,3^*$	$86,5 \pm 8,5^{***}$

Гемоглобин, г/л	113,5±6,5	120,90±0,12	93,5±0,5	108,5±6,5
Эритроциты, 10 ¹² /л	2,09±0,19	2,03±0,12	1,67±0,01	1,96±0,13
Гематокрит, %	24,5±1,9	26,09±0,12	20,3±4,3	23,4±0,9
Тромбоциты, 10 ⁹ /л	26,0±1,0	23,0±1,0	23,5±0,5	23,0±2,0
Лейкоциты, 10 ⁹ /л	37,8±8,8	36,80±0,11	26,5±1,6	30±3,8
Гетерофилы, %	47,30±2,14	42,70±0,11*	40,8±1,7*	46,1±3,6
Лимфоциты, %	44,20±0,65	50,80±0,11**	51,1±3,1*	43,6±3,9
Моноциты, %	0,9±0,5	0,29±0,12	0,6±0,5	0,8±0,2
Эозинофилы, %	7,5±1,0	5,39±0,12	4,55±2,25	9,15±0,45
Базофилы, %	0,25±0,05	0,29±0,12	1,10±0,40	0,35±0,05
Н/Л-индекс	1,05±0,06	0,84±0,04*	0,80±0,09*	1,09±0,05

Примечание: * – $p \leq 0,05$; ** – $p \leq 0,01$; *** – $p \leq 0,001$. Данные представлены как «среднее ± ошибка среднего» при $n = 30$.

Note: * – $p \leq 0,05$; ** – $p \leq 0,01$; *** – $p \leq 0,001$. Data are presented as “mean ± standard error of the mean” with $n = 30$.

При анализе биохимических показателей, установлено, что уровень глюкозы оставался стабильным в диапазоне 8,41–9,06 ммоль/л, однако выявлена незначительная тенденция к снижению в I и II опытной группах. Креатинин был увеличен в I опытной группе на 30,5% ($p \leq 0,05$), во II – на 46,6% ($p \leq 0,01$) и в III – на 43,2% ($p \leq 0,05$) в сравнение с контрольными значениями. Напротив, уровень мочевой кислоты был снижен на 40,6% ($p \leq 0,05$) и 37,5% ($p \leq 0,05$) в I и II группах по отношению к контролю. В III опытной группе данный показатель был снижен на 65,3% ($p \leq 0,001$). Среди показателей липидного обмена, уровень холестерина оставался стабильным в опытных группах, при этом триглицериды были снижены в I группе на 25,67% ($p \leq 0,05$). При анализе печеночных трансаминаз активность АСТ оставалась стабильной, тогда как активность АЛТ в I группе снизилась на 34,3% ($p \leq 0,05$), а в III группе увеличилась на 53% ($p \leq 0,05$) по сравнению с контролем.

Сывороточные гормоны и маркеры обновления костной ткани. Установлено, что введение цитрата кальция в различной концентрации сопровождалось модуляцией гормональной регуляции кальциевого гомеостаза (рис. 1). Так, во II опытной группе наблюдалось снижение паратиреоидного гормона на 18,95% ($p \leq 0,01$) относительно контроля. В опытных группах отмечено также снижение концентрации кальцитонина – на 43,54% ($p \leq 0,05$) в I группе и на 48,04% ($p \leq 0,05$) во II группе по сравнению с контролем. При этом сывороточный уровень 25-гидроксивитамина D₃ [25(ОН)D₃] – ключевого предшественника активной формы витамина D – не менялся во всех исследуемых группах.

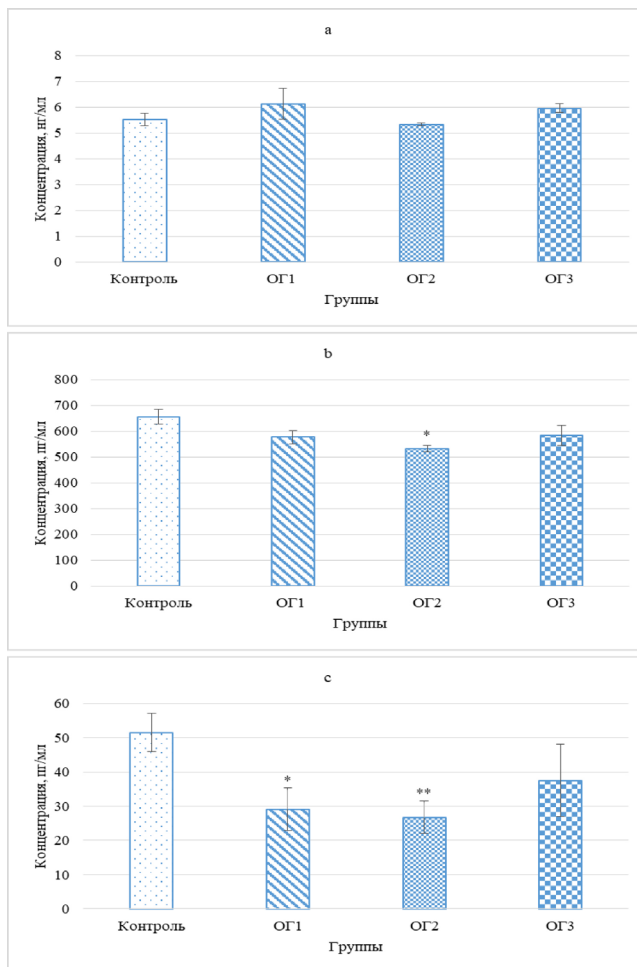


Рис. 1. Концентрация гормонов, связанных с метаболизмом кальция и фосфора в сыворотке крови кур-несушек (*Gallus gallus* L.)

Примечание: * – $p \leq 0,05$; ** – $p \leq 0,01$; а – витамин D₃ (25-OH-D₃), б – паратиреоидный гормон (PTH); в – кальцитонин (CT). Данные представлены как «среднее ± ошибка среднего» при $n = 30$.

Fig. 1. Concentrations of hormones associated with calcium and phosphorus metabolism in the blood serum of laying hens (*Gallus gallus* L.)

Note: * – $p \leq 0.05$; ** – $p \leq 0.01$; а – vitamin D₃ (25-OH-D₃); б – parathyroid hormone (PTH); в – calcitonin (CT). Data are presented as “mean ± standard error of the mean” with $n = 30$.

При оценке сывороточных маркеров обновления костной ткани (рис. 2) – поперечно-сшитого карбоксиконцевого телопептида I типа (CTX-I) и остеопротегерина (OPG) – установлено, что уровень CTX-I, отражающего интенсивность костной резорбции, не претерпел достоверных изменений в опытных группах по сравнению с контролем. В то же время выявлены значимые сдвиги в концентрации остеопротегерина – ключевого ингибитора остеокластогенеза. Во II опытной группе было отмечено увеличение OPG на 70,07% ($p \leq 0,05$), напротив, в III опытной группе концентрация OPG снизилась на 41,4% ($p \leq 0,05$).

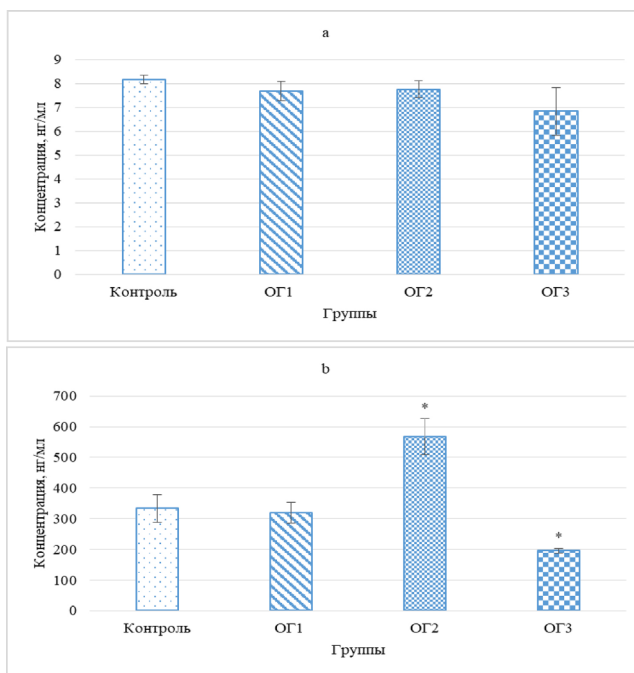


Рис. 2. Влияние различных доз цитрата кальция на сывороточные маркеры обновления костной ткани у кур-несушек (*Gallus gallus L.*)

Примечание: * – $p \leq 0,05$; ** – $p \leq 0,01$; а – поперечно-сшитый карбоксиконцевой телопептид I типа (CTX-I); б – остеопротегерин (OPG). Данные представлены как «среднее $\pm$ ошибка среднего» при $n = 30$.

Fig. 2. Effect of various doses of calcium citrate on serum markers of bone turnover in laying hens (*Gallus gallus L.*)

Note: * – $p \leq 0,05$; ** – $p \leq 0,01$; а – cross-linked carboxy-terminal telopeptide type I (CTX-I); б – osteoprotegerin (OPG). Data are presented as “mean $\pm$ standard error of the mean” with $n = 30$.

Элементный профиль сыворотки крови. При анализе элементного профиля сыворотки крови выявлен ряд изменений (табл. 3). Среди макроэлементов установлено снижение концентрации Са на 19,91%, 17,21% и 18,18% в I, II и III опытных группах, соответственно, в сравнении с контролем ($p \leq 0,01$). Аналогичные изменения наблюдались в отношении Р, так в I опытной группе доля этого элемента была снижена на 47,4% ($p \leq 0,01$), во II группе – на 26,3% ($p \leq 0,05$) и в III группе – на 36,9% ($p \leq 0,01$). Кроме этого, концентрация К была ниже в III опытной группе на 15,66% в сравнении с контрольными значениями ($p \leq 0,01$).

Среди эссенциальных и условно-эссенциальных элементов наблюдалось снижение доли Си во всех опытных группах. В частности в I опытной группе разница по Си составила 20,59% ($p \leq 0,05$), во II – 14,71% ($p \leq 0,05$) и в III группе – 17,65% ($p \leq 0,05$) в сравнении с контролем. Помимо этого, в I опытной группе наблюдалось снижение Sg на 17,65% ($p \leq 0,001$) и Zn на 22,07% ($p \leq 0,05$), с одновременным увеличением Вг на 56,97% ($p \leq 0,05$). В III опытной группе выявлено увеличение концентрации Mn на 51,85% ($p \leq 0,01$) и снижение Со на 33,3% ($p \leq 0,01$).

Анализ концентраций токсичных и потенциально токсичных элементов в сыворотке крови показал, что они находятся в пределах фоновых значений для птиц. При этом, статистически значимых изменений в распределении данных элементов между контрольной и опытными группами не выявлено.

Таблица 3.

Элементный профиль сыворотки крови кур-несушек на фоне скармливания цитрата кальция в различной концентрации, мг/кг

Table 3. Elemental profile of blood serum from laying hens fed calcium citrate at various concentrations, mg/kg

Элемент	Группы			
	Контроль	ОГ 1	ОГ 2	ОГ 3
Li	0,007±0,001	0,012±0,004	0,008±0,0004	0,008±0,002
Na	3219±33,4	3268±60,7	3089±75,3	3188±29,4
Mg	37,3±1,45	32,7±1,33	38,7±0,88	32,3±1,45
Al	1,64±0,51	0,89±0,09	1,79±0,46	1,43±0,26
P	655±38	344,5±26,5**	483±3*	413,3±10,3**
K	206,3±11,3	199±7,94	212,7±3,92	174±4,04**
Ca	289,3±4,05	231,7±2,6**	239,5±3,5**	236,7±4,63**
Mn	0,27±0,02	0,18±0,05	0,34±0,12	0,41±0,02**
Co	0,003±0,0001	0,002±0,0004	0,003±0,0004	0,002±0,0001**
Ni	0,014±0,004	0,006±0,002	0,013±0,004	0,005±0,001
Cu	0,34±0,01	0,27±0,03*	0,29±0,02*	0,28±0,01*
Se	0,22±0,01	0,22±0,02	0,2±0,008	0,22±0,02

Br	5,67±0,06	8,9±0,73*	6,17±0,39	5,43±0,32
Sr	0,17±0,005	0,14±0,01***	0,18±0,02	0,16±0,007
Mo	0,02±0,006	0,024±0,006	0,017±0,002	0,019±0,002
Sb	0,003±0,0001	0,002±0,0004	0,003±0,0002	0,002±0,0002
I	0,062±0,007	0,047±0,011	0,055±0,007	0,051±0,001
Ba	0,063±0,007	0,049±0,005	0,058±0,005	0,053±0,005
Hg	0,0008±0,0004	0,0004±0,0001	0,0003±0,0001	0,0004±0,0001
Pb	0,02±0,01	0,007±0,004	0,006±0,004	0,0009±0,0005
Bi	0,002±0,0003	0,001±0,0003	0,0009±0,0003	0,001±0,0005
Cr	0,09±0,03	0,05±0,008	0,1±0,03	0,06±0,013
Fe	8,34±0,96	7,26±0,33	7,27±0,62	6,74±0,24
Zn	4,35±0,26	3,39±0,37*	3,88±0,54	4,32±0,23

Примечание: * – $p \leq 0,05$; ** – $p \leq 0,01$; *** – $p \leq 0,001$. Данные представлены как «среднее ± ошибка среднего» при $n = 30$.

Note: * – $p \leq 0,05$; ** – $p \leq 0,01$; *** – $p \leq 0,001$. Data are presented as “mean ± standard error of the mean” with $n = 30$.

Элементный профиль костной ткани. Результаты исследования элементного профиля костной ткани продемонстрировали как общие закономерности, так и дозозависимые изменения в ответ на введение цитрата кальция (элементный профиль костной ткани кур-несушек контрольной группы представлен в табл. 4).

Таблица 4.

Элементный профиль костной ткани кур-несушек контрольной группы, мг/кг

Table 4. Elemental profile of bone tissue from laying hens in the control group, mg/kg

Элемент	Контроль
Li	0,112±0,029
Na	4402,0±38,3
Mg	2899,7±21,5
P	96309,0±336,5
K	2183,3±13,8
Ca	140421,33±97,02
Mn	6,025±0,023
Co	0,2263±0,0044
Ni	1,276±0,028
Cu	8,09±1,59
Se	0,631±0,022
Sr	79,22±0,54
Mo	0,1646±0,0067
Cd	0,0271±0,0066
Sb	0,1676±0,0062
I	1,12±0,09

Ba	59,06±0,56
Hg	0,0161±0,0005
Tl	0,0068±0,0015
Pb	2,85±0,11
Bi	0,0295±0,005
Cr	2,22±0,07
Fe	156,069±1,029
Zn	191,54±2,32
As	1,008±0,016

Примечание: Данные представлены как «среднее ± ошибка среднего» при $n = 30$.
 Note: The data are presented as “mean ± standard error of the mean” for $n = 30$.

В частности среди макроэлементов в I группе (рис. 3) было отмечено повышение концентрации Ca на 3,48% ($p \leq 0,001$), Mg на 6,76% ($p \leq 0,05$), со снижением K на 9,44% ($p \leq 0,05$). Среди эссенциальных и условно-эссенциальных микроэлементов установлено увеличение концентраций Mn на 15,86% ($p \leq 0,05$) и Se на 15,24% ($p \leq 0,01$) в сравнении с контролем. При этом наблюдалось снижение доли Sr на 7,8% ($p \leq 0,01$) и Cu на 21,09% ($p \leq 0,05$). Среди токсичных и потенциально токсичных элементов в костной ткани I группы выявлено снижение концентрации Pb на 20,17% ($p \leq 0,01$).

Во II опытной группе установлены следующие изменения содержания элементов в берцовой кости относительно контроля. Среди макроэлементов наблюдалось повышение Mg на 5,79% ($p \leq 0,01$), Ca на 1,00% ($p \leq 0,05$) и Na на 2,11% ($p \leq 0,05$). Среди эссенциальных и условно-эссенциальных микроэлементов выявлено увеличение Cr на 40,15% ($p \leq 0,01$), Se на 35,08% ($p \leq 0,01$), Mn на 11,66% ($p \leq 0,01$), Mo на 7,98% ($p \leq 0,001$) в сравнении с контролем. При этом отмечено снижение Fe на 6,98% ($p \leq 0,05$), Zn на 6,81% ($p \leq 0,01$) и Sr на 7,71% ($p \leq 0,05$). Анализ распределения токсичных и потенциально-токсичных элементов показал отсутствие значимых изменений в данной группе.

В III опытной группе среди макроэлементов отмечено повышение концентраций Mg на 7,54% ($p \leq 0,01$) и P на 1,87% ($p \leq 0,01$) на фоне снижения K на 12,35% ($p \leq 0,001$). Среди эссенциальных и условно-эссенциальных микроэлементов выявлено увеличение Cr на 56,17% ($p \leq 0,01$), Mn на 32,91% ($p \leq 0,001$) и Ba на 4,64% ($p \leq 0,05$). При этом отмечено снижение доли Fe на 8,74% ($p \leq 0,05$), I на 23,42% ($p \leq 0,05$) и Cu на 24,2% ($p \leq 0,05$). Распределение токсичных и потенциально-токсичных элементов показало снижение As на 6,32% ($p \leq 0,01$).

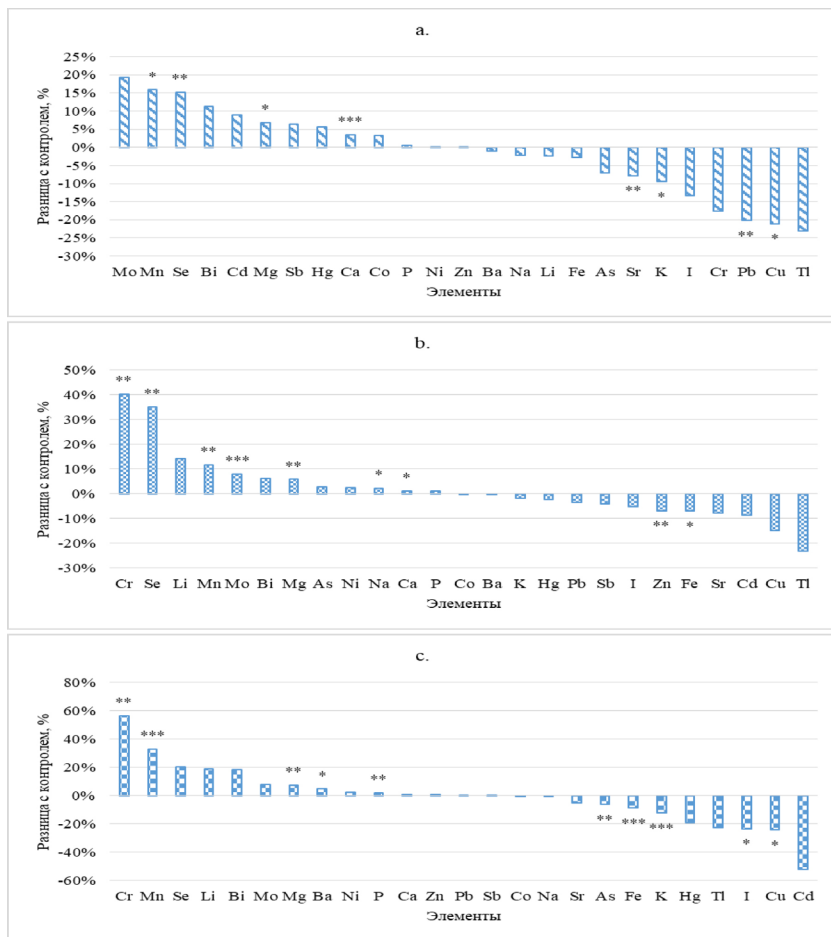


Рис. 3. Динамика элементного профиля костной ткани кур-несушек при скармливании цитрата кальция в различных дозировках, %
 Примечание: * – $p \leq 0,05$; ** – $p \leq 0,01$; *** – $p \leq 0,001$; а – ОГ1; б – ОГ2; с – ОГ3. Данные представлены как отклонение средних значений показателей опытных групп от среднего значения контроля при $n = 30$.

Fig. 3. Changes in the elemental profile of bone tissue in laying hens fed calcium citrate at various doses, %

Note: * – $p \leq 0.05$; ** – $p \leq 0.01$; *** – $p \leq 0.001$; a – Group 1; b – Group 2; c – Group 3. Data are presented as the deviation of the mean values of the experimental groups from the mean value of the control group, with $n = 30$.

Элементный профиль яичной скорлупы. В ходе исследования проведён анализ элементного состава скорлупы яиц. Изменения концентрации микро- и макроэлементов в скорлупе представлены в виде процентного отклонения от значений контрольной группы (табл. 5).

Таблица 5.

Элементный профиль яичной скорлупы от кур-несушек, рацион которых содержал различное количество цитрата кальция, мг/кг

Table 5. Elemental profile of eggshells from laying hens fed diets containing varying amounts of calcium citrate, mg/kg

Элемент	Группы			
	Контроль	ОГ1	ОГ2	ОГ3
Mg	3290,0±214,0	3483,0±192,0	3471,0±198,0	3038,0±185,0
P	747,0±56,0	760,0±46,0	1032,0±55,0**	595,0±43,0*
K	325,0±19,0	365,0±19,0	436,0±22,0	377,0±22,0
Ca	343034,0±22082,0	350651,0±21039,0*	356548,0±23532,0**	348210,0±19152,0*
Sr	178,4±12,0	145,8±10,1*	164,2±10,3	176,0±9,7
Ba	13,06±0,85	8,40±0,50*	9,75±0,68**	10,41±0,73*

Примечание: * – $p \leq 0,05$; ** – $p \leq 0,01$. Данные представлены как «среднее ± ошибка среднего» при $n = 30$.

Note: * – $p \leq 0,05$; ** – $p \leq 0,01$. Data are presented as “mean ± standard error of the mean” with $n = 30$.

Наиболее выраженные изменения наблюдались в содержании К, Р и Ва. В группе ОГ2 отмечено наиболее значительное повышение концентрации К – на 34,15% ($p \leq 0,01$). В группе ОГ3 наблюдалось увеличение концентрации К на 16,00% ($p \leq 0,05$) в сравнении с контролем.

Доля Р в скорлупе в группе ОГ2 возросла на 38,15% ($p \leq 0,01$), при этом в группе ОГ3, напротив, отмечено снижение Р на 20,35% ($p \leq 0,05$). Mg в скорлупе яиц от птицы опытных групп не отличался от контроля. Са, как основной компонент скорлупы, демонстрировал увеличение на 2,22% в ОГ1 ($p \leq 0,05$), в ОГ2 – на 3,94% ($p \leq 0,01$) и в ОГ3 на 1,51% ($p \leq 0,05$). Во всех опытных группах отмечено выраженное снижение концентраций Ва в скорлупе яиц: на 35,69% ($p \leq 0,01$) в ОГ1, 25,32 % ($p \leq 0,01$) в ОГ2 и 20,23% ($p \leq 0,05$) в ОГ3.

В целом, полученные результаты свидетельствуют о том, что введение цитрата кальция в рацион кур-несушек в различных дозировках оказывает дифференцированное влияние на минеральный обмен у птиц.

Поскольку цитрат кальция обладает высокой биодоступностью, введение в его в рацион птицы, как следует ожидать, должно сопровождаться

рядом биологических эффектов: с одной стороны, это обеспечение поступления ионов кальция (Ca^{2+}) в организм, необходимых для минерализации костной ткани и формирования скорлупы, с другой стороны, активизация метаболизма за счет участия цитрат-аниона ($\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7^{3-}$) в таких процессах как цикл трикарбоновых кислот, и, наконец, конкурентно или синергетически обусловленное изменение усвояемости других минералов, что в купе согласуется с полученными экспериментальными данными.

Так в проведенном эксперименте, уровень глюкозы в крови у птиц опытных групп оставался стабильным на протяжении всего эксперимента, что, вероятно, обусловлено высокой устойчивостью гликемического гомеостаза, строго регулируемого эндокринно-метаболическими механизмами. У птиц базовая концентрация глюкозы в плазме физиологически выше по сравнению с млекопитающими [18]. Цитрат-анион является основным субстратом центрального энергетического цикла каждой клетки – цикла Кребса. Кроме этого, данный метаболит участвует не только в производстве энергии посредством цикла трикарбоновых кислот, но и в других метаболических путях, поскольку может быть источником цитозольных восстановительных эквивалентов для биосинтеза, а также источником углерода для цитозольных биосинтетических процессов (например, при синтезе стеролов и жирных кислот) и, наконец, регулятором других метаболических реакций, в частности, – отрицательной модуляции фосфофруктокиназы и положительной модуляции ацетил-КоА-карбоксилазы. Этот механизм позволяет клетке перераспределять потоки метаболитов в зависимости от энергетических потребностей [33]. Соответственно, возможно, снижение уровня триглицеридов в крови опытной птицы связано с перестройкой липидного обмена в сторону более эффективного использования жиров как источника энергии, а не их аккумуляции. Подобный эффект согласуется с данными о нормализации АЛТ и указывает на снижение нагрузки на печень, что особенно важно при интенсивной яйценоскости, сопряжённой с высокой метаболической нагрузкой. Таким образом, цитрат кальция, через участие цитрат-аниона в регуляции метаболических путей, может способствовать оптимизации энергетического баланса и профилактике метаболических нарушений.

Кроме этого, в исследовании выявлено увеличение уровня креатинина на фоне снижении концентрации мочевой кислоты. У птиц мочевая кислота является основным конечным продуктом катаболизма пуринов, и её экскреция напрямую связана с уровнем белкового обмена [46]. Снижение концентрации мочевой кислоты может указывать на более эффективное

использование аминокислот для синтеза белка, а не для энергетических нужд, что характерно для состояния анаболического доминирования. Увеличение креатинина, в свою очередь, связано с распадом креатинфосфата в мышечной ткани – процессом, сопряжённым с высокой энергетической активностью [2]. Учитывая высокий уровень продуктивности несушек, этот сдвиг, скорее всего, отражает физиологическую адаптацию к повышенной метаболической нагрузке, а не нарушение клубочковой фильтрации. Отсутствие изменений в других показателях (например, мочевины) дополнительно подтверждает, что данные сдвиги не носят патологического характера.

Кальций, помимо своих основных биологических функций, является важнейшим регулятором метаболизма. Он стимулирует распад гликогена, запускает мышечное сокращение и опосредует множество гормональных сигналов в качестве вторичного посредника [26]. Кальций также играет важную роль в регуляции цикла лимонной кислоты, активируя пируватдегидрогеназу, НАД⁺-зависимую изоцитратдегидрогеназу и 2-оксoglутаратдегидрогеназу [42].

Уровень АЛТ в I опытной группе снижался, а в III группе повышался. Так как АЛТ является ферментом преимущественно локализованным в цитоплазме гепатоцитов, соответственно данный показатель выступает маркером состояния печени [24]. Выявленные изменения носят адаптивный дозозависимый эффект. Соответственно замена 10% карбоната кальция на цитрат (ОГ1) приводила к снижению концентрации АЛТ, что вероятно также подтверждает усиление энергетического обмена и нормализацию липидного [33]. При этом увеличение дозы до 30% (ОГ3), вероятно превышает адаптационные возможности организма.

Анализ морфологических показателей крови продемонстрировал снижение гетерофилов на фоне умеренного увеличения лимфоцитов в I и II опытных группах. В данном случае целесообразнее рассматривать отношение данных показателей (Н/Л-индекс). Гетерофилы выполняют ключевую роль в первой линии защиты организма, обеспечивая фагоцитарную активность и формирование воспалительного ответа при инфекционных поражениях, вызванных бактериальными агентами. В свою очередь, лимфоциты являются основными эффекторами адаптивного иммунитета: В-лимфоциты опосредуют гуморальный иммунный ответ, а Т-лимфоциты – клеточный [27]. Поскольку Н/Л-индекс традиционно рассматривается как маркер стрессовой нагрузки и активности врождённого иммунитета, его выраженное снижение в группе II указывает на ослабление системного

воспалительного ответа и относительное усиление позиций приобретённого звена иммунной защиты, опосредованного лимфоцитами [27; 40]. Так, к примеру, ранее было показано, что птицы с низким H/L-индексом демонстрируют повышенную устойчивость к *Salmonella enterica* и другим патогенам [40]. Таким образом, зарегистрированный эффект может отражать не только снижение стресса, но и формирование более устойчивого иммунологического профиля, способствующего повышению общей резистентности организма. Подобная динамика может быть связана как с прямым влиянием ионов кальция на сигнальные пути иммунных клеток (Ca^{2+} как вторичный мессенджер в активации кальмодулинзависимых киназ) [41; 44], так и с метаболической ролью цитрат-аниона, участвующего в энергетическом обмене [33] и модуляции окислительно-восстановительных процессов [49].

На фоне выявленных изменений показателей крови, особый интерес представляет анализ гормонального фона птиц, поскольку эндокринная регуляция играет ключевую роль в поддержании гомеостаза, продуктивности и адаптационных возможностей организма. Так, в проведенном эксперименте выявлено снижение концентрации паратиреоидного гормона во II опытной группе, что соответствует классическому механизму отрицательной обратной связи. Однако здесь возникает парадокс: сывороточный уровень общего кальция также снизился. Это противоречие можно объяснить тем, что цитрат образует комплексы с ионизированным кальцием, снижая его свободную фракцию и, соответственно, доступность для CaSR-рецепторов паразитовидных желез [14; 45]. Кроме того, метаболизм цитрата сопряжён с образованием бикарбоната, что может вызывать лёгкий метаболический алкалоз, также подавляющий секрецию данного гормона [6]. При этом уровень $25(\text{OH})\text{D}_3$ оставался стабильным во всех группах, что исключает влияние витамин-D-зависимых механизмов. Снижение кальцитонина вероятно также может являться следствием алкалоза [6] или общего улучшения метаболического фона [33]. Однако согласно исследованиям de Matos R. [8] кальцитонин играет второстепенную и неопределённую роль в регуляции обмена кальция. Для выявления более точных механизмов необходимы дополнительные исследования.

Анализ элементного состава сыворотки крови, берцовой кости и яичной скорлупы позволил получить комплексное представление о влиянии цитрата кальция на минеральный обмен. Учитывая высокую суточную потребность в кальции, связанную с формированием яичной скорлупы, любые изменения в распределении макро- и микроэлементов отражают

не только эффективность добавки, но и возможные риски для системного гомеостаза [13]. Парадоксальным наблюдением стало достоверное снижение концентрации общего кальция в сыворотке во всех опытных группах, несмотря на поступление легкоусвояемой формы Са. Это может быть объяснено несколькими взаимосвязанными механизмами. Во-первых, цитрат образует растворимые комплексы с ионизированным кальцием, что приводит к снижению его свободной (биологически активной) фракции и, как следствие, к перерасчёту общего Са в сторону понижения [29]. Во-вторых, поступающий Са, благодаря высокой биодоступности цитратной формы, может напрямую направляться в минеральные депо – медуллярную кость и матку [51], минуя сывороточный пул, что делает сывороточный Са недостаточно чувствительным маркером обеспеченности организма.

Снижение Р может быть связано с усиленным включением данного макроэлемента в минерализующиеся ткани – как в костную матрицу, так и в яичную скорлупу, где он участвует в формировании первичного ядра гидроксиапатита [32; 37]. Однако значительное снижение концентрации калия в III группе указывает на возможное нарушение электролитного баланса, особенно при высокой дозе добавки, что может повлиять на функцию Na^+/K^+ -АТФазы и, как следствие, на транспорт ионов в эпителии матки [12].

Костная ткань служит долговременным депо макро- и микроэлементов, и её химический состав является более чувствительным и объективным показателем обеспеченности организма минералами, особенно при длительном применении функциональных добавок [50]. Берцовая кость несущек содержит медуллярную ткань, как временное депо кальция, формируемое под действием эстрогенов [47]. В I и II группах отмечено увеличение содержания Са, что свидетельствует о пополнении минеральных запасов и благоприятном влиянии цитрата на минерализацию. Кроме этого, наблюдался положительный рост Mg, необходимого для активации ферментов, участвующих в энергетическом обмене и формировании костного матрикса [10]. Среди микроэлементов: установлено достоверное увеличение Mn, Se и Cr – кофакторов ключевых антиоксидантных ферментов [48], таких как Mn-супероксиддисмутаза и глутатионпероксидаза, что может указывать на улучшение окислительного статуса и защиту костной ткани от повреждения активными формами кислорода. В то же время во всех группах выявлено снижение Cu, Zn, Fe и Co, что представляет собой потенциальный риск. Эти элементы являются незаменимыми кофакторами ферментов [21], участвующих в синтезе коллагена (Cu) [25], ремоделировании кости (Zn) [36] и энергетическом обмене (Fe в составе

цитохромов [43]). Дефицит этих микроэлементов, даже при достаточной минерализации, может привести к снижению прочности костной ткани и повышенному риску переломов [5].

В контексте репродуктивной функции особое значение имеет элементный состав яичной скорлупы – основного пути минерализации у несушек [19]. Наиболее выраженные положительные сдвиги выявлены в ОГ2: увеличение концентраций кальция, фосфора и калия. Эти элементы играют ключевую роль в формировании прочной скорлупы [31]: фосфаты участвуют в нуклеации кристаллов апатита [37], калий регулирует работу Na^+/K^+ -АТФазы [34], создавая электрохимический градиент для транспорта кальция в матке. Интересно, что в ОГ3, несмотря на рост концентрации кальция, уровень фосфора снизился, что может указывать на нарушение структурной организации минеральной решётки и потенциальное снижение механической прочности скорлупы [9]. Снижение Sr и Ba во всех группах может быть связано с конкурентным вытеснением этих элементов цитратом кальция, что представляет дополнительный защитный эффект [22].

Особый интерес представляют изменения в содержании потенциально токсичных элементов. Во всех опытных группах наблюдалось достоверное снижение Sr и Ba в костной ткани и скорлупе. Sr, являясь химическим аналогом кальция, может замещать его в гидрок시아патите, нарушая кристаллическую структуру [4] и снижая прочность кости и скорлупы. Ba обладает нейротоксичностью и блокирует калиевые каналы [3]. Их снижение может быть связано с конкурентным вытеснением цитратом кальция за счёт более высокой аффинности транспортных систем к Ca^{2+} или с усилением селективной абсорбции в кишечнике. Таким образом, цитрат кальция, помимо своей основной функции, может выполнять роль природного модулятора минеральной селективности, снижая аккумуляцию чужеродных катионов [28]. Полученные данные свидетельствуют о том, что введение цитрата кальция в исследуемых дозах не способствует кумуляции токсичных элементов в системном кровотоке и не нарушает функцию барьерных систем, что подтверждает его безопасность в применении.

Было показано, что введение цитрата кальция в различных концентрациях вызывает системные изменения в гормональной регуляции, иммунном статусе, энергетическом обмене и элементном составе тканей у кур-несушек, при этом эффекты носят выраженный дозозависимый характер и отражают сложную интеграцию минерального, репродуктивного и адаптивного гомеостаза.

Заключение

1. В настоящем исследовании показано, что замещение известняка цитратом кальция в рационе кур-несушек оказывает дозозависимое влияние на минеральный обмен, эндокринную регуляцию, иммунный статус и качество яичной скорлупы.

2. Наиболее позитивные результаты были получены при замещении 20% карбоната кальция на цитрат: в этой группе улучшались параметры минерализации, качества скорлупы и метаболической устойчивости у несушек.

3. Увеличение дозировки цитрата до 30%, судя по всему, сопровождалось превышением адаптационных возможностей организма.

Полученные данные обосновывают перспективность использования органических форм кальция в птицеводстве и требуют дальнейших исследований долгосрочных эффектов, а также разработки сбалансированных комбинированных добавок для профилактики возможного вторичного дефицита микроэлементов.

Заключение комитета по этике. Исследование было проведено в соответствии с принципами положения Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации (Declaration of Helsinki, and approved by the Institutional Review Board) и одобрено комитетом по биоэтике ФГБНУ ФНИЦ БСТ РАН (протокол № 1 от 17.01.2024).

Информация о конфликте интересов. Все авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (Грант № 23-16-00165 «Поиск, аттестация и внедрение новых форм источников кальция для промышленного птицеводства»).

Список литературы / References

1. Фисинин, В. И., & Егоров, И. А. (2019). *Руководство по кормлению сельскохозяйственной птицы: метод. пособие*. Москва: ЛИКА, 215 с. (Fisinin, V. I., & Egorov, I. A. (2019). *Guidelines on feeding agricultural poultry: Methodological guide*. Moscow: LIKA, 215 p.)
2. Arzour-Lakehal, N., & Boudebza, A. (2021). Biochemical reference intervals in broiler chickens according to age and strain. *Agricultural Science and Technology*, 13(4), 357–364. <https://doi.org/10.15547/ast.2021.04.058> EDN: <https://elibrary.ru/WAELGP>
3. Bhoelan, B. S., Stevering, C. H., van der Boog, A. T., & van der Heyden, M. A. (2014). Barium toxicity and the role of the potassium inward rectifier current. *Clin-*

- ical Toxicology (Philadelphia)*, 52(6), 584–593. <https://doi.org/10.3109/15563650.2014.923903>
4. Bigi, A., & Boanini, E. (2025). Strontium-substituted calcium orthophosphates: Structure, stability, morphology, and biomedical applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(12), 5886. <https://doi.org/10.3390/ijms26125886> EDN: <https://elibrary.ru/ZSBLAK>
 5. Ciosek, Ż., Kot, K., & Rotter, I. (2023). Iron, zinc, copper, cadmium, mercury, and bone tissue. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(3), 2197. <https://doi.org/10.3390/ijerph20032197> EDN: <https://elibrary.ru/UHX-ORR>
 6. Costello, L. C., & Franklin, R. B. (2016). Plasma citrate homeostasis: How it is regulated; and its physiological and clinical implications. An important, but neglected, relationship in medicine. *HSSOA Journal of Human Endocrinology*, 1(1), 005.
 7. De Cloet, C. A., Maina, A. N., Schulze, H., Bédécarrats, G. Y., & Kiarie, E. G. (2023). Egg production, egg quality, organ weight, bone ash, and plasma metabolites in 30-week-old Lohmann LSL lite hens fed corn and soybean meal-based diets supplemented with enzymatically treated yeast. *Poultry Science*, 102(4), 102527. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.102527> EDN: <https://elibrary.ru/NYJZDD>
 8. de Matos, R. (2008). Calcium metabolism in birds. *Veterinary Clinics of North America: Exotic Animal Practice*, 11(1), 59–82. <https://doi.org/10.1016/j.cvex.2007.09.005>
 9. Du, Y., Hao, D., Liu, W., Liu, W., Li, D., Lei, Q., & Li, F. (2024). Plasma biochemistry, intestinal health, and transcriptome analysis reveal why laying hens produce translucent eggs. *Animals (Basel)*, 14(17), 2593. <https://doi.org/10.3390/ani14172593> EDN: <https://elibrary.ru/NBIBEQ>
 10. Elnesr, S. S., Mahmoud, B. Y., da Silva Pires, P. G., Moraes, P., Elwan, H. A. M., El-Shall, N. A., & Alagawany, M. (2024). Trace minerals in laying hen diets and their effects on egg quality. *Biological Trace Element Research*, 202(12), 5664–5679. <https://doi.org/10.1007/s12011-024-04121-8> EDN: <https://elibrary.ru/FXACUF>
 11. Eusebio-Balcasar, P. E., Purdum, S., Hanford, K., & Beck, M. M. (2018). Limestone particle size fed to pullets influences subsequent bone integrity of hens. *Poultry Science*, 97(5), 1471–1483. <https://doi.org/10.3382/ps/pex412>
 12. Fu, K. B., Dai, D., Zhou, J. M., Wang, J., Zhang, H. J., Wu, S. G., & Wang, J. (2025). Dietary sodium sulfate supplementation improves eggshell quality, uterine ion transportation and glycosaminoglycan synthesis in laying hens. *Animal Bioscience*, 38(5), 1029–1040. <https://doi.org/10.5713/ab.24.0456> EDN: <https://elibrary.ru/VCIZVB>
 13. Garcia-Mejia, R. A., Sinclair-Black, M., Blair, L. R., Angel, R., Jaramillo, B., Regmi, P., & Ellestad, L. E. (2024). Physiological changes in the regulation of calcium and phosphorus utilization that occur after the onset of egg production in com-

- mercial laying hens. *Frontiers in Physiology*, 15, 1465817. <https://doi.org/10.3389/fphys.2024.1465817> EDN: <https://elibrary.ru/XPDSQW>
14. Geng, Y., Mosyak, L., Kurinov, I., Zuo, H., Sturchler, E., Cheng, T. C., & Fan, Q. R. (2016). Structural mechanism of ligand activation in human calcium-sensing receptor. *eLife*, 5, e13662. <https://doi.org/10.7554/eLife.13662>
 15. Gloux, A., Le Roy, N., Mème, N., Piketty, M. L., Prié, D., Benzoni, G., & Duclos, M. J. (2020). Increased expression of fibroblast growth factor 23 is the signature of a deteriorated Ca/P balance in ageing laying hens. *Scientific Reports*, 10(1), 21124. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78106-7> EDN: <https://elibrary.ru/UHUHSW>
 16. Habig, C., Weigend, A., Baulain, U., Petow, S., & Weigend, S. (2021). Influence of age and phylogenetic background on blood parameters associated with bone metabolism in laying hens. *Frontiers in Physiology*, 12, 678054. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.678054> EDN: <https://elibrary.ru/XZMXRI>
 17. Hanlon, C., Takeshima, K., Kiarie, E. G., & Bédécarrats, G. Y. (2022). Bone and egg-shell quality throughout an extended laying cycle in three strains of layers spanning 50 years of selection. *Poultry Science*, 101(3), 101672. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101672> EDN: <https://elibrary.ru/VXWCDJ>
 18. Hawkes, L. A. (2025). Why the superb physiological capacity of birds matters. *Journal of Experimental Biology*, 228(Suppl_1), JEB247986. <https://doi.org/10.1242/jeb.247986> EDN: <https://elibrary.ru/AQUGEH>
 19. Hincke, M. T., Nys, Y., Gautron, J., Mann, K., Rodriguez-Navarro, A. B., & McKee, M. D. (2012). The eggshell: Structure, composition and mineralization. *Frontiers in Bioscience (Landmark Edition)*, 17(4), 1266–1280. <https://doi.org/10.2741/3985> EDN: <https://elibrary.ru/PNYESZ>
 20. Jansen, S., Baulain, U., Habig, C., Weigend, A., Halle, I., Scholz, A. M., & Weigend, S. (2020). Relationship between bone stability and egg production in genetically divergent chicken layer lines. *Animals (Basel)*, 10(5), 850. <https://doi.org/10.3390/ani10050850> EDN: <https://elibrary.ru/WGCFPE>
 21. Jomova, K., Makova, M., Alomar, S. Y., Alwasel, S. H., Nepovimova, E., Kuca, K., & Valko, M. (2022). Essential metals in health and disease. *Chemico-Biological Interactions*, 367, 110173. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2022.110173> EDN: <https://elibrary.ru/QJKSNG>
 22. Krishnan, K. (2023). Calcium, strontium, barium, and radium. In *Patty's Toxicology* (pp. 1–16). <https://doi.org/10.1002/0471125474.tox028.pub3>
 23. Li, X., Cai, X., Wang, X., Zhu, L., Yan, H., Yao, J., & Yang, C. (2024). Understanding the causes of keel bone damage and its effects on the welfare of laying hens. *Animals (Basel)*, 14(24), 3655. <https://doi.org/10.3390/ani14243655> EDN: <https://elibrary.ru/XQUPYY>

24. Liu, Z., Que, S., Xu, J., & Peng, T. (2014). Alanine aminotransferase—old biomarker and new concept: A review. *International Journal of Medical Sciences*, 11(9), 925–935. <https://doi.org/10.7150/ijms.8951>
25. Ma, R., Feng, L., Wu, P., Liu, Y., Ren, H. M., Li, S. W., & Jiang, W. D. (2023). A new insight on copper: Promotion of collagen synthesis and myofiber growth and development in juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idella*). *Animal Nutrition*, 15, 22–33. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2023.06.009> EDN: <https://elibrary.ru/BIDULD>
26. Matikainen, N., Pekkarinen, T., Ryhänen, E. M., & Schalin-Jäntti, C. (2021). Physiology of calcium homeostasis: An overview. *Endocrinology and Metabolism Clinics*, 50(4), 575–590. <https://doi.org/10.1016/j.ecl.2021.07.005> EDN: <https://elibrary.ru/HQNYPR>
27. Minias, P. (2019). Evolution of heterophil/lymphocyte ratios in response to ecological and life-history traits: A comparative analysis across the avian tree of life. *Journal of Animal Ecology*, 88(4), 554–565. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12941> EDN: <https://elibrary.ru/HZLSPR>
28. Molnár, Z., Hegedűs, M., Németh, P., & Pósai, M. (2025). Competitive incorporation of Ca, Sr, and Ba ions into amorphous carbonates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 393, 18–30. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2025.02.002> EDN: <https://elibrary.ru/GWLRNY>
29. Monchi, M. (2017). Citrate pathophysiology and metabolism. *Transfusion and Apheresis Science*, 56(1), 28–30. <https://doi.org/10.1016/j.transci.2016.12.013>
30. Muir, W. I., Akter, Y., Bruerton, K., & Groves, P. J. (2023). The role of hen body weight and diet nutrient density in an extended laying cycle. *Poultry Science*, 102(2), 102338. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.102338> EDN: <https://elibrary.ru/MOOVQC>
31. Muszyński, S., Kasperek, K., Świątkiewicz, S., Arczewska-Włosek, A., Wiącek, D., Donaldson, J., & Schwarz, T. (2022). Assessing bone health status and eggshell quality of laying hens at the end of a production cycle in response to inclusion of a hybrid rye to a wheat-corn diet. *Veterinary Sciences*, 9(12), 683. <https://doi.org/10.3390/vetsci9120683> EDN: <https://elibrary.ru/KCALKR>
32. Pagnussatt, H., de Oliveira, C. H., Valentim, J. K., Tavernari, F. C., Nunes, R. V., Castro, L. P., & Calderano, A. A. (2025). Effects of dietary non-phytate phosphorus on performance, egg quality, and bone traits in laying hens of different ages. *Poultry Science*, 104(11), 105806. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2025.105806> EDN: <https://elibrary.ru/ABSBIP>
33. Palermo, A., Naciu, A. M., Tabacco, G., Manfrini, S., Trimboli, P., Vescini, F., & Falchetti, A. (2019). Calcium citrate: From biochemistry and physiology to clinical applications. *Reviews in Endocrine and Metabolic Disorders*, 20(3), 353–364. <https://doi.org/10.1007/s11154-019-09520-0> EDN: <https://elibrary.ru/PQPPHV>

34. Pivovarov, A. S., Calahorro, F., & Walker, R. J. (2018). Na^+/K^+ -pump and neurotransmitter membrane receptors. *Invertebrate Neuroscience*, 19(1), 1. <https://doi.org/10.1007/s10158-018-0221-7> EDN: <https://elibrary.ru/YUWAAK>
35. Qiu, K., Chang, X., Wang, J., Zhang, H., & Wu, S. (2024). Effects of dietary calcium lactate supplementation on laying performance, blood index, shinbone quality, jejunal immunity, and egg quality of aged laying hens. *Agriculture*, 14(2), 256. <https://doi.org/10.3390/agriculture14020256> EDN: <https://elibrary.ru/BRHSBV>
36. Seo, H. J., Cho, Y. E., Kim, T., Shin, H. I., & Kwun, I. S. (2010). Zinc may increase bone formation through stimulating cell proliferation, alkaline phosphatase activity and collagen synthesis in osteoblastic MC3T3-E1 cells. *Nutrition Research and Practice*, 4(5), 356–361. <https://doi.org/10.4162/nrp.2010.4.5.356>
37. Sinclair-Black, M., Garcia, R. A., & Ellestad, L. E. (2023). Physiological regulation of calcium and phosphorus utilization in laying hens. *Frontiers in Physiology*, 14, 1112499. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1112499> EDN: <https://elibrary.ru/BXEBFB>
38. Song, M., Jiao, H., Zhao, J., Wang, X., Li, H., Wang, P., & Lin, H. (2022). Dietary supplementation of calcium propionate and calcium butyrate improves eggshell quality of laying hens in the late phase of production. *Journal of Poultry Science*, 59(1), 64–74. <https://doi.org/10.2141/jpsa.0200127> EDN: <https://elibrary.ru/VPWZDT>
39. Sonntag, W. I., Spiller, A., & von Meyer-Höfer, M. (2019). Discussing modern poultry farming systems — insights into citizen's lay theories. *Poultry Science*, 98(1), 209–216. <https://doi.org/10.3382/ps/pey292>
40. Thiam, M., Wang, Q., Barreto Sánchez, A. L., Zhang, J., Ding, J., Wang, H., & Zhao, G. (2022). Heterophil/lymphocyte ratio level modulates Salmonella resistance, cecal microbiota composition and functional capacity in infected chicken. *Frontiers in Immunology*, 13, 816689. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.816689> EDN: <https://elibrary.ru/LRZMQR>
41. Tokumitsu, H., & Sakagami, H. (2022). Molecular mechanisms underlying Ca^{2+} /calmodulin-dependent protein kinase kinase signal transduction. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(19), 11025. <https://doi.org/10.3390/ijms231911025> EDN: <https://elibrary.ru/BLSYAH>
42. Traaseth, N., Elfering, S., Solien, J., Haynes, V., & Giulivi, C. (2004). Role of calcium signaling in the activation of mitochondrial nitric oxide synthase and citric acid cycle. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1658(1–2), 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.bbabo.2004.04.015>
43. Tsiftoglou, A. S., Tsamadou, A. I., & Papadopoulou, L. C. (2006). Heme as key regulator of major mammalian cellular functions: Molecular, cellular, and pharmacological aspects. *Pharmacology & Therapeutics*, 111(2), 327–345. <https://doi.org/10.1016/j.pharmthera.2005.10.017>

44. Vig, M., & Kinet, J. P. (2009). Calcium signaling in immune cells. *Nature Immunology*, 10(1), 21–27. <https://doi.org/10.1038/ni.f.220>
45. Walker, R. W., Zhang, S., Coleman-Barnett, J. A., Hamm, L. L., & Hering-Smith, K. S. (2018). Calcium receptor signaling and citrate transport. *Urolithiasis*, 46(5), 409–418. <https://doi.org/10.1007/s00240-018-1035-0> EDN: <https://elibrary.ru/HLZVLP>
46. Wang, L., Li, J., Wang, B., Yin, X., Wei, J., & Qiu, H. (2024). Progress in modeling avian hyperuricemia and gout (Review). *Biomedical Reports*, 22(1), 1. <https://doi.org/10.3892/br.2024.1879> EDN: <https://elibrary.ru/ODCCHD>
47. Whitehead, C. C. (2004). Overview of bone biology in the egg-laying hen. *Poultry Science*, 83(2), 193–199. <https://doi.org/10.1093/ps/83.2.193>
48. Wróblewski, M., Wróblewska, W., & Sobiesiak, M. (2024). The role of selected elements in oxidative stress protection: Key to healthy fertility and reproduction. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(17), 9409. <https://doi.org/10.3390/ijms25179409> EDN: <https://elibrary.ru/FTECDM>
49. Wu, X., Dai, H., Liu, L., Xu, C., Yin, Y., Yi, J., & Li, S. (2019). Citrate reduced oxidative damage in stem cells by regulating cellular redox signaling pathways and represents a potential treatment for oxidative stress-induced diseases. *Redox Biology*, 21, 101057. <https://doi.org/10.1016/j.redox.2018.11.015>
50. Xiang, R., Zhao, X., Sha, L., Tang, M., Wu, X., Zhang, L., & Jiang, X. (2025). Mapping the role of macro and micronutrients in bone mineral density: A comprehensive Mendelian randomization study. *European Journal of Nutrition*, 64(4), 156. <https://doi.org/10.1007/s00394-025-03665-2> EDN: <https://elibrary.ru/QSQPWX>
51. Yenice, E., Mızrak, C., Gültekin, M., Atik, Z., & Tunca, M. (2015). Effects of organic and inorganic forms of manganese, zinc, copper, and chromium on bioavailability of these minerals and calcium in late-phase laying hens. *Biological Trace Element Research*, 167(2), 300–307. <https://doi.org/10.1007/s12011-015-0313-8> EDN: <https://elibrary.ru/JYXEJT>
52. Zhang, H., Wang, Y., Wang, Y., Wei, B., Wang, L., Nguyen, M. T., & Chen, W. (2024). Fermented calcium butyrate supplementation in post-peak laying hens improved ovarian function and tibia quality through the “gut-bone” axis. *Animal Nutrition*, 16, 350–362. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2023.10.008> EDN: <https://elibrary.ru/ZOQLOV>
53. Zhao, S. C., Teng, X. Q., Xu, D. L., Chi, X., Ge, M., & Xu, S. W. (2020). Influences of low level of dietary calcium on bone characters in laying hens. *Poultry Science*, 99(12), 7084–7091. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.08.057> EDN: <https://elibrary.ru/YIKTAV>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Нечитайло Ксения Сергеевна, канд. биол. наук, старший научный сотрудник отдела физиологии, биохимии и морфологии животных; старший преподаватель научно-образовательного центра «Биологические системы и нанотехнологии»

*Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук; Оренбургский государственный университет
ул. 9 Января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация; просп. Победы, 13, г. Оренбург, 460018, Российская Федерация
k.nechit@mail.ru*

Холодилина Татьяна Николаевна, канд. с.-х. наук, ведущий научный сотрудник испытательного центра; доцент кафедры экологии и природопользования

*Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук; Оренбургский государственный университет
ул. 9 Января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация; просп. Победы, 13, г. Оренбург, 460018, Российская Федерация
xolodilina@rambler.ru*

Сизова Елена Анатольевна, д-р. биол. наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории молекулярно-генетических исследований и металломики в животноводстве; профессор научно-образовательного центра «Биологические системы и нанотехнологии»

*Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук; Оренбургский государственный университет
ул. 9 Января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация; просп. Победы, 13, г. Оренбург, 460018, Российская Федерация
sizova.178@yandex.ru*

Шошин Даниил Евгеньевич, младший научный сотрудник отдела физиологии, биохимии и морфологии животных; ассистент научно-образовательного центра «Биологические системы и нанотехнологии»

*Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук; Оренбургский государственный университет
ул. 9 Января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация; просп. Победы, 13, г. Оренбург, 460018, Российская Федерация
daniilshoshin@mail.ru*

Рязанцева Кристина Владимировна, канд. биол. наук, научный сотрудник отдела физиологии, биохимии и морфологии животных; научный сотрудник научно-образовательного центра «Биологические системы и нанотехнологии» *Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук; Оренбургский государственный университет*
ул. 9 Января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация; просп. Победы, 13, г. Оренбург, 460018, Российская Федерация
reger94@bk.ru

Яушева Елена Владимировна, канд. биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории молекулярно-генетических исследований и металломики в животноводстве; старший научный сотрудник научно-образовательного центра «Биологические системы и нанотехнологии» *Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук; Оренбургский государственный университет*
ул. 9 Января, 29, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация; просп. Победы, 13, г. Оренбург, 460018, Российская Федерация
vasilena56@mail.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Ksenia S. Nechitailo, PhD in Biology, Senior Researcher at the Department of Physiology, Biochemistry and Morphology of Animals; Senior Lecturer at the Scientific and Educational Center “Biological Systems and Nanotechnology”
Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences; Orenburg State University
29, 9 Yanvarya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation; 13, Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation
k.nechit@mail.ru
SPIN-code: 1866-8918
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8755-414X>
Scopus Author ID: 57285761300

Tatiana N. Kholodilina, PhD in Agricultural Sciences, Leading Researcher at the Testing Center; Associate Professor of Ecology and Nature Management
Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences; Orenburg State University
29, 9 Yanvarya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation; 13, Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation
xolodilina@rambler.ru

SPIN-code: 2977-6059

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3946-8247>

Elena A. Sizova, PhD in Biology, Chief Researcher at the Laboratory of Molecular Genetic Research and Metallomics in Animal Husbandry; Professor at the Scientific and Educational Center “Biological Systems and Nanotechnology”

Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences; Orenburg State University

29, 9 Yanvarya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation; 13, Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation

sizova.178@yandex.ru

SPIN-code: 9819-1051

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5125-5981>

Scopus Author ID: 55786730900

Daniil E. Shoshin, Junior Researcher at the Department of Physiology, Biochemistry and Morphology of Animals; Assistant at the Scientific and Educational Center “Biological Systems and Nanotechnology”

Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences; Orenburg State University

29, 9 Yanvarya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation; 13, Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation

daniilshoshin@mail.ru

SPIN-code: 7444-9999

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3086-681X>

Scopus Author ID: 58827557300

Kristina V. Ryazantseva, PhD in Biology, Researcher at the Department of Physiology, Biochemistry and Morphology of Animals; Researcher at the Scientific and Educational Center “Biological Systems and Nanotechnology”

Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences; Orenburg State University

29, 9 Yanvarya Str., Orenburg, 460000, Russian Federation; 13, Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation

reger94@bk.ru

SPIN-code: 3867-7768

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5134-0396>

Scopus Author ID: 57928050900

Elena V. Yausheva, PhD in Biology, Senior Researcher at the Laboratory of Molecular Genetic Research and Metallomics in Animal Husbandry; Senior Researcher at the Scientific and Educational Center “Biological Systems and Nanotechnology” *Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences; Orenburg State University*
29, 9 Yanvaryia Str., Orenburg, 460000, Russian Federation; 13, Pobedy Ave., Orenburg, 460018, Russian Federation
vasilena56@mail.ru
SPIN-code: 3613-7524
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1589-2211>
Scopus Author ID: 56541548600

Поступила 07.12.2025

После рецензирования 14.01.2026

Принята 22.01.2026

Received 07.12.2025

Revised 14.01.2026

Accepted 22.01.2026