

Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106, № 4. С. 148-163.  
Animal Husbandry and Fodder Production. 2023. Vol. 106, no 4. P. 148-163.

Обзорная статья  
УДК 636.085:577.17  
doi:10.33284/2658-3135-106-4-148

**Эндогенные потери веществ: оптимизация микронутриентной  
обеспеченности рационов сельскохозяйственных животных**

**Ольга Вилориевна Кван<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия  
<sup>1</sup>kwan111@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0561-7002>

**Аннотация.** Минеральное питание является важным вопросом для специалистов по кормлению сельскохозяйственных животных. Сложные взаимодействия между различными источниками минералов и другими питательными компонентами кормов в сочетании с их относительно низкой стоимостью привели к нынешнему состоянию повышенного уровня минералов в рационах бройлеров. Новые взгляды на экологичность позволили переосмыслить то, как мы составляем практические рационы, здесь открываются значительные возможности для снижения макроэлементов, особенно в рационах «старой» птицы. Понимание достижения идеального баланса катионов и анионов в рационе затруднено отсутствием чёткости измерения баланса элементов в кормах. Использование источников минеральных веществ с более высокой доступностью и усвояемостью позволит снизить уровень микроэлементов, используемых в рационе бройлеров. Снижение уровня минералов приведёт к получению более экономичных рационов и уменьшению выделения химических элементов в окружающую среду.

**Ключевые слова:** цыплята-бройлеры, минеральное питание, минералы, продуктивность, усвояемость, эндогенные потери

**Благодарности:** работа выполнена в соответствии с планом НИР на 2021-2023 гг. ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН (№ 0761-2019-0005).

**Для цитирования:** Кван О.В. Эндогенные потери веществ: оптимизация микронутриентной обеспеченности рационов сельскохозяйственных животных (обзор) // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106. № 4. С. 148-163. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-4-148>

Review article

**Endogenous losses of substances: optimization of micronutrient supply of farm animal diets**

**Olga V Kvan<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Federal Research Centre for Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia  
<sup>1</sup>kwan111@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0561-7002>

**Abstract.** Mineral nutrition is an important issue for specialists in farm animal feeding. The complex interactions between various mineral sources and other nutritional components of feed, combined with their relatively low cost, has led to the current state of elevated mineral levels in broiler diets. New views on environmental friendliness have led to a rethinking of how we make practical diets, there are significant opportunities for reducing macronutrients, especially in the diets of "old" poultry. Our understanding of achieving an ideal balance of cations and anions in the diet is hampered by the lack of clarity

in measuring the balance of elements in feed. The use of mineral sources with higher availability and digestibility will reduce the level of trace elements used in the diet of broilers. Reducing mineral levels will result in more economical diets and reduced release of chemical elements into the environment.

**Keywords:** broiler chickens, mineral nutrition, minerals, productivity, digestibility, endogenous losses

**Acknowledgments:** the work was performed in accordance to the plan of research works for 2021-2023 FSBRI FRC BST RAS (No. 0761-2019-0005).

**For citation:** Kvan OV. Endogenous losses of substances: optimization of micronutrient supply of farm animal diets (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(4): 148-163. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-4-148>

### **Введение.**

Для поддержания здоровья и сохранения продуктивности сельскохозяйственной птицы важным фактором является обеспечение надлежащего минерального питания во всех его аспектах (Surai PF et al., 2019). По мере увеличения объёмов производства продукции и темпов роста птицы минеральное питание становится более важным. Микроэлементы важны в кормлении домашней птицы, поскольку они участвуют во многих биохимических процессах, необходимых для роста и развития, особенно для формирования костей (Walk CL et al., 2021). Они действуют преимущественно как катализаторы большинства ферментов и гормональных систем. Несмотря на то, что они необходимы в небольших количествах в организме (Aksu DS et al., 2012), дефицит минеральных веществ может повлиять на обмен веществ и продуктивность животных (Vieira SL, 2008; Тузиков Р.А. и др., 2022).

Большинство минералов откладывается в скелете, однако они играют роль во всех процессах метаболизма, выступая как ко-факторы ферментов, вступая во взаимодействия со свободными радикалами в организме (Goff JP, 2018). Растёт осведомлённость о том, как микроэлементы влияют на формирование иммунитета, здоровье кишечника и качество тушки. В сочетании с этим актуальным становится производство экологически безопасной продукции.

Специалисты по кормлению учитывают возросшие требования общества в высококачественной продукции вместе с высокими потребностями бройлеров в питательных веществах при минимизации остаточного количества минералов в навозе. Высокая концентрация минералов в отходах животноводства может привести к загрязнению почвы и достигать самых глубоких уровней, вплоть до уровня грунтовых вод. Потенциальное загрязнение минеральными веществами в сочетании с целью достижения наилучшей эффективности производства бройлеров стимулировало новые дискуссии и исследования, направленные на получение более биодоступных питательных веществ, которые позволяют лучше усваиваться организмом животного и, в то же время, минимизировать воздействие на окружающую среду (Nollet L et al., 2007).

Разработка рационов, ориентированных на сбалансированное питание, в конечном итоге потребует широкого применения альтернативных источников минеральных веществ, которые можно добавлять в корма для стимулирования специфических реакций (Vieira SL, 2008). При этом специалистам по кормлению потребуется пересмотреть уровни включения минералов, используемые в рационах бройлеров. К ним относятся: снижение затрат на корма при одновременном повышении производительности; повышение устойчивости производства бройлеров; снижение токсического взаимодействия с другими питательными веществами; возможность разработки рационов на основе «доступных веществ» и потенциал использования альтернативных источников минеральных веществ.

### **Цель исследования.**

Провести краткий литературный обзор текущего состояния микронутриентной обеспеченности рационов для сельскохозяйственной птицы и снижения потерь минералов из организма.

**Материалы и методы исследования.**

Поиск и анализ литературы проводился с использованием интернет-ресурсов: РИНЦ – <https://www.elibrary.ru>, ScienceDirect – <https://www.sciencedirect.com>, PubMed – <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/> за период 2005-2023 гг.

**Результаты исследования и обсуждение.**

**Минеральное питание.** В дополнение к N, C, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> и S, которые являются основными элементами, составляющими органические химические соединения организма, сельскохозяйственной птице требуются по меньшей мере 14 неорганических элементов для сбалансированного питания (Araujo CSS et al., 2019). Они часто делятся на две категории в зависимости от количества, которое требуется птице и то, что присутствует в рационе.

Макроэлементы, обычно указанные в процентах от рациона, являются важными составляющими тканей, играющими структурную и метаболическую роль. Микроэлементы присутствуют в небольших количествах в тканях животных и функционируют главным образом как ферментативные катализаторы и физиологические регуляторы (Korish MA and Attia YA, 2020; M'Sadeq SA et al., 2018).

Для домашней птицы необходимыми макроэлементами являются Ca, P, K, Na и Cl. Ca и P необходимы для формирования и поддержания скелета. 99 % кальция в рационе бройлеров используются для формирования костей, тогда как 80 % P содержатся в скелете, а оставшиеся 20 % требуются для использования энергии и в структурных компонентах клеток (NRC, 1994). P в форме фитиновой кислоты используется плохо, а фитиновая кислота также снижает биодоступность Ca (Li W et al., 2016; Khaksar V et al., 2017; Kim JH, 2017). Таким образом, рационы, которыми кормят бройлеров, всегда содержат дефицит Ca и P, если только они не дополнены неорганическими солями. При этом избыток Ca в рационе влияет на доступность P, Mg, Mn и Zn (Korver DR, 2020). Для бройлеров соотношение Ca:P рекомендуется 2:1 (NRC 1994). У растущих цыплят оптимальный рост тела и кальцификация костей происходят при содержании Ca в диапазоне от 0,6 до 1,2 %, при доступном уровне P 0,45-0,5 % (Hafeez A, 2015). Однако было также высказано предположение, что поддержание соотношения Ca:P на уровне 1:1 могло бы улучшить удержание P (Bradbury EJ et al., 2014).

K, Na и Cl являются важными факторами, определяющими кислотно-щелочной баланс (NRC, 1994). Однако зачастую на промышленных предприятиях специалисты игнорируют содержание Na и Cl в кормах и питьевой воде, а также дополнительное включение данных минералов в рационы (Ledoux DR and Shannon MC, 2005). Минимальные требования к содержанию Na и Cl составляют 0,13 % в течение начального периода и 0,07 % – в течение периода до 6-недельного возраста. Требования к содержанию Na и Cl для оптимальной продуктивности молодых бройлеров составляли 0,28 и 0,25 % соответственно (Jiang SQ et al., 2019), на практике же был предложен уровень 0,2 % (Cao J et al., 2023).

К распространённым незаменимым микроэлементам относятся Mg, Mn, Zn, Fe, Cu, Mo, Se, I и Co. Было показано, что несколько элементов, включая F, Ni, Si, Sn, V и Cr, оказывают благотворное влияние на питание цыплят. Mg необходим цыплятам, этот элемент активирует более 100 ферментов (Kleyn R, 2013). Как правило, включение в рацион Mg в дозе 500 мг/кг достаточно для всех стадий роста, присутствие его в рационе кур более 1 % вызывает заметное снижение продуктивности. Содержание Mg в рационах домашней птицы всегда превышает потребности в данном элементе, следовательно, нет необходимости дополнительно включать данный минерал в рацион. Однако сообщалось, что после 3-недельного возраста добавление Mg приводит к увеличению массы тела цыплят (Gaal KK et al., 2004).

Mo необходим для образования и поддержания нормального уровня ксантинооксидаз в печени и кишечнике, однако установлено, что данный элемент содержится в соевом белке и мало доступен цыплятам. Содержащийся в корме Mo усваивается на 16 % хуже, чем очищенный (Novotny JA and Turnlund J, 2006), так уровень добавок Mo в рацион цыплят-бройлеров составляет 0,5 мг Mo/кг (Scott ML et al., 1982).

Se является неотъемлемым компонентом глутатионпероксидазы, выявлено, что Se и витамин E предотвращают экссудативный диатез. Селен является важным питательным веществом для антиоксидантной системы организма (Liao X et al., 2012). NRC рекомендовал включать Se в рационы бройлеров в концентрации 0,15 мг/кг рациона, при этом токсичные уровни Se в рационе составляют 10-20 мг/г.

Дефицит Cu не был установлен у домашней птицы, однако, как и Co, медь также добавляется в действующие премиксы для цыплят-бройлеров (Espinosa CD and Stein HH, 2021).

I необходим для синтеза гормонов щитовидной железы, которые контролируют скорость энергетического обмена или уровень окисления всех клеток, а также влияют на другие железы внутренней секреции. NRC рекомендовал включать I в рацион цыплят в дозировке 0,35 мг/кг корма. Cu, Fe, Mn и Zn функционируют главным образом как катализаторы в ферментативных системах внутри клеток или как составные части ферментов. В частности, Zn входит в состав тысяч белков, участвующих в промежуточном метаболизме, секреции гормонов и иммунной защите (Favero A et al., 2013).

**Роль химических элементов в организме птицы.** Микроэлементы присутствуют в тканях цыплят в небольших и постоянных количествах, но они играют важную роль в их росте и развитии. Такие элементы, как Cu, Fe, Mn и Zn функционируют главным образом как катализаторы в ферментативных системах внутри клеток или как составные части ферментов. Роли, которые они играют в ферментативных реакциях, варьируются от слабых эффектов ионной силы до высокоспецифичных ассоциаций, известных как металлоферменты, оказывающие влияние на обменные процессы в организме животных даже в незначительных количествах. В связи с этим трудно найти подходящий биомаркер для надлежащего изучения статуса этих микроэлементов и их роли. Однако относительно постоянное соотношение каждого минерала в общей концентрации в организме цыплят разного возраста означает, что при увеличении массы тела будет увеличиваться только общее содержание микроэлементов. Дефицит этих микроэлементов определенно повлияет на рост бройлеров, а избыток микроэлементов негативным образом повлияет на рост последних и будет выводиться из организма (Bao YM and Choct M, 2009).

Cu в основном соединяется с белком церулоплазмином, а также содержится в большом количестве в металлоферментах, таких как цитохромоксидаза, супероксиддисмутаза, лизилоксидаза, дофамин-гидроксилаза и тирозиназа (Kumar BAAS, 2023). Однако было показано, что дефицит Cu в рационе не влияет на уровень церулоплазмينا в печени. Этот металл участвует в клеточном дыхании, сердечной деятельности, формировании костей, развитии соединительной ткани, ороговении и пигментации тканей, а также миелинизации спинного мозга. Cu оказывает прямое воздействие на метаболизм Fe и, таким образом, косвенно влияет на биосинтез гемоглобина (Bao YM and Choct M, 2009).

Fe играет активную роль в реакциях окисления/восстановления и в переносе электронов, связанных с клеточным дыханием (Ebbing MA et al., 2019). Практически всё железо в организме животного имеет органическую природу, и только очень небольшой процент содержится в виде свободных неорганических ионов (Byrne L and Murphy RA, 2022). Две трети его в организме содержатся в составе гемоглобина, который участвует в транспортировке кислорода и контроле клеточного дыхания. Оставшаяся часть распределяется среди нескольких белков, действующих как запасы железа (Kumar BAAS, 2023). В общих чертах, Fe необходимо для выработки энергии клетками и всем организмом в целом, а также для белкового обмена и жизненно важно для поддержания здоровья и профилактики анемии. Было высказано предположение, что этот пул выполняет несколько продуктивных функций, включая поставку железа для синтеза ферментов, содержащих железо, функционирование в процессе клеточного транспорта и хранения железа и способствование экспрессии или подавлению ферментов, содержащих железо (Woodmansee AN and Imlay JA, 2002).

Mn, как и другие незаменимые микроэлементы, может функционировать как активатор ферментов, так и в качестве компонента металлоферментов, участвующих в гликолизе белков. Хо-

тя количество Mn-металлоферментов ограничено, он может активировать большое количество ферментов: гидролазы, киназы, декарбоксилазы и трансферазы. Mn является жизненно важным элементом для правильного роста костей у бройлеров, для углеводного и липидного обмена, функционирования иммунной и нервной систем и размножения (Lv G et al., 2023).

Zn является одним из наиболее важных микроэлементов и играет три основные биологические роли в организме: как катализатор, как структурный и регулирующий ион (De Grande A et al., 2020). Zn входит в состав более чем 300 ферментов, к ним относятся карбоангидраза, алкогольдегидрогеназа и щелочная фосфатаза. Взаимодействуя с ферментами, Zn играет активную каталитическую роль. Помимо этой каталитической роли в ферментативных системах Zn также является компонентом более 1000 транскрипционных белков, что позволяет предположить, что изменения минерального статуса определённо будут транслироваться в изменениях экспрессии генов (Zamany S et al., 2023). Несмотря на эту сильную взаимосвязь между микроэлементами и ферментами, корреляции между потерей активности ферментов и дефицитом Zn оказались низкими. Zn-содержащие ферменты обладают чрезвычайно высоким сродством к своему металлическому лиганду и, таким образом, могут удерживать Zn даже при низких концентрациях (Dong G et al., 2015).

**Эндогенные потери минералов из организма.** Моча является основным путём выведения некоторых минералов, таких как Mg, I и K, желудочно-кишечный тракт (ЖКТ) является основным путём выведения Cu, Fe, Mn и Zn. Существует мало информации о том, сколько этих микроэлементов выводится с калом бройлеров. В одном исследовании были рассчитаны концентрации Cu, Fe, Mn и Zn в организме цыплят-бройлеров для получения показателей отложения 6 %, 10 %, 0,2 % и 6 % соответственно в рационах, содержащих 20, 190, 85 и 180 мг/кг этих минералов (Levesque CL et al., 2010).

В другом исследовании было показано, что количество Zn, выделяемого с калом, линейно увеличивалось при добавлении Zn с пищей (Ao T et al., 2007). Учитывая количество микроэлементов в экскрементах, включая эндогенные минералы, которые сильно влияют на фактическую экскрецию, необходимо рассчитать концентрацию Cu, Fe, Mn и Zn в организме более точным методом. Кроме того, неизвестно, изменяются ли эти показатели удержания в зависимости от темпов роста птицы и рациона питания. Имеются противоречивые сообщения о влиянии уровня минеральных веществ в рационе на их выведение из организма (Nasir Z and Peebles ED, 2018; Plumstead PW et al., 2007; Quiniou N and Narcy A, 2019; Arriaza K et al., 2023).

Согласно одной из моделей истощения химических элементов в организме: если бы дефицит микроэлементов в рационе был умеренным, птица снизила бы скорость роста и выделения для поддержания нормальной концентрации в тканях. Если бы дефицит был более серьёзным, птица сначала мобилизовала бы микроэлементы из запасов, пригодных для обмена, таких как кости. Однако до сих пор неясно, может ли Zn в костях служить запасом и улучшать рост птиц на диете с дефицитом Zn (Molenda M and Kolmas J, 2023). Необходимо понимать влияние дефицита Zn на рост костей и тела цыплят-бройлеров. Помимо неперевариваемых микроэлементов, экскременты также содержат эндогенные выделения в результате избытка минералов, которые не могут быть усвоены.

Самые низкие уровни экскреции микроэлементов были описаны Nollet L с коллегами (2007), которые оценивали бройлеров в возрасте 0-39 дней. Уровни концентрации органических минералов, используемые в рационе, были в 7, 4, 4,5 и 5 раз ниже для Mn, Fe, Zn и Cu соответственно по сравнению с уровнем этих минералов в их неорганической форме. Хотя эти уровни намного ниже, чем те, которые использовались в данном исследовании, авторы не подтвердили каких-либо эндогенных потерь.

Высокий уровень экскреции минералов животными, получавшими добавки из неорганических источников, является следствием увеличения концентрации этих минералов в составе основного рациона. Другими словами, животные получали больше минеральных веществ, чем требовалось им в питании. Можно сделать вывод, что органические минералы меньше взаимодействуют с другими соединениями и образуют менее недоступные комплексы в просвете кишечника, способ-

ствуя лучшему всасыванию этих минералов в кишечнике (Nollet L et al., 2007). Таким образом, эти минералы могут быть предоставлены в меньших количествах, поскольку они являются органическими, не вызывая каких-либо потерь в росте и производительности, помимо образования выделений с более низкой концентрацией минералов.

Чтобы свести к минимуму воздействие животноводства на окружающую среду, необходимо максимально использовать потенциал кормов, увеличивая удержание поступающих в организм питательных веществ и снижая потери при выведении с мочой. Важно сочетать повышение производительности и экономичности с сохранением окружающей среды (Мусабаева Л.Л. и др., 2022).

Природоохранные ведомства проявляют всё большую озабоченность в связи с внедрением методов, снижающих загрязнение окружающей среды в рамках производственных систем. Следовательно, когда уменьшается потеря минералов с экскрементами, уменьшается и загрязнение окружающей среды. В среднем добавки органических минералов способствуют снижению выведения минералов из организма (Swiatkiewicz S et al., 2014).

В нескольких исследованиях была подчеркнута эффективность органических минералов для поддержания продуктивности цыплят-бройлеров при добавлении их в меньших количествах, чем обычно практикуется (Mion B et al., 2022; Zhao J et al., 2010). Lesson S и Caston L (2008) обнаружили снижение экскреции минеральных веществ при использовании органических минералов в 14 раз меньших, чем при добавлении неорганических минеральных веществ, однако без влияния на массу тела, потребление и конверсию корма.

Наибольшая доступность органических микроэлементов обусловлена экранированием положительного заряда минералов во время хелатирования, что обеспечивает более высокую стабильность при колебаниях pH в пищеварительном тракте, что приводит к меньшей конкуренции между минералами с одинаковым зарядом, облегчая всасывание минералов кишечником и уменьшая потери с выделениями.

Как упоминалось ранее, минералы добавляются в рацион в их неорганической форме. Для обеспечения более высокой биодоступности этих питательных веществ были использованы комплексные минералы. Однако преимущества, по-видимому, скрыты, когда добавление минерала происходит в более высоких концентрациях. Bao YM и Choct M (2009) сообщили, что, когда уровни включения минералов высоки даже в их органической форме, экскреция минералов, как правило, превышает или равна уровням, выделяемым птицами, которых кормят неорганическими формами минералов.

Таким образом, с экономической, производственной и экологической точек зрения меньшее количество минералов полезно для поддержания или даже улучшения продуктивности птиц при меньших потерях их из организма.

#### ***Доступность и усвояемость минеральных веществ в организме цыплят-бройлеров.***

Большая часть исследований о потребности цыплят в минеральных веществах ограничена или устарела (Kleyn RJ, 2013; Kleyn RJ and Ciacchiariello M, 2021). Пересмотр требований к рационам в контексте изменений в генотипах и системах производства требует тщательного анализа включения минеральных компонентов в корма для сельскохозяйственной птицы. Любое исследование минерального питания и обмена веществ осложняются взаимодействием между различными химическими элементами, а также с другими компонентами корма (Cobb-Vantress.com.). Понимание потребности бройлеров в минеральных веществах далеко от полного. Несколько факторов, активно влияющих на усвояемость минералов, следует учитывать при разработке рационов, удовлетворяющих потребности птицы (Lim HS et al., 2018; Moss AF, 2019; Goff JP, 2018).

Птица полагается на гомеостатические механизмы для контроля усвоения и выведения незаменимых минеральных веществ как на клеточном, так и на системном уровнях. Эффективность усвоения минералов увеличивается за счёт повышения регуляции переноса минералов, когда минерал обладает низкой биодоступностью в рационе (Hu Y et al., 2018; M'Sadeq SA et al., 2018).

Всасывание происходит в основном в проксимальном отделе тонкой кишки. Механизм поступления и усвоения минеральных веществ является комплексным, происходит как параклеточ-

ное, так и межклеточное поглощение. Параклеточное поглощение происходит, когда концентрация минерала в пищеварительном тракте превышает концентрацию во внеклеточной жидкости. Кроме того, минералы в комплексе с различными веществами в рационе (вода, аминокислоты (АК), пептиды, фитонциды, жирные кислоты) могут перемещаться через более прочные соединения, используя сопротивление растворителя, что приводит к повышению усвояемости значительной части минералов животным (Goff JP, 2018).

Когда концентрация минеральных веществ в рационе – низкая, организм полагается на внутриклеточное усвоение. Фосфолипидный слой, составляющий клеточную мембрану энтероцитов кишечника, непроницаем как для воды, так и для минералов, следовательно, процесс усвоения происходит поэтапно (Goff JP, 2018). На первом этапе специализированные транспортные белки в клеточной мембране облегчают диффузию минеральных ионов с определённой валентностью или зарядом. Данный путь строго регулируется, и птица может использовать ионы металлов только после того, как они попадут в организм. Таким образом, минералы могут конкурировать за пути поглощения, и избыток одного минерала может препятствовать усвоению других, и могут ограничить продуктивность птицы.

В некоторых случаях транспортные белки могут регулировать поступление минералов в энтероциты только в том случае, если в организме есть потребность в этом веществе. Попав в клетку, минералу необходимо переместиться с апикальной мембраны на базолатеральную, что может быть осуществлено путём простой диффузии, но для большинства минералов требуются специализированные транспортные белки для выполнения этого процесса (Kleyn RJ and Ciacciariello M, 2021).

Доступность минералов различается в зависимости от формы (органическая, неорганическая, ультрадисперсная), что делает невозможным установить единую скорость их усвоения (Chrystal PV, 2020). Органические микроэлементы, как правило, более доступны, чем неорганические источники, но это зависит от их лиганда и минерального статуса животного (Suttle NF, 2010). В отношении неорганических форм минералов требуется их солубилизация, и зависит этот процесс напрямую от уровня рН, следовательно, кислая среда в мышечном желудке птицы улучшает их солубилизацию. Напротив, нейтральный или щелочной рН в кишечнике птицы снижает растворимость минералов.

Ещё одна сложность в доступности минералов заключается в различной усвояемости минеральных веществ в зависимости от размеров частиц, например, усвояемость Са выше, когда размер частиц больше (Zaefarian F et al., 2021, Li W et al., 2021). Усвоение и выведение минералов не линейны, и, как правило, низкие уровни их в рационе используются с большей эффективностью (Suttle NF, 2010; Leeson S, 2018).

**Всасывание минеральных веществ.** Избыток микроэлементов всегда приводит к недооценке потенциальной биодоступности микроэлементов. Всасывание Си происходит главным образом в двенадцатиперстной кишке, хотя и остальная часть тонкого кишечника (и, возможно, даже толстая кишка) способна к всасыванию (Gao S et al., 2014). В исследованиях на крысах сообщалось о фактической скорости всасывания 30-50 % (в сутки) при приёме в пределах нормы. Эффективность усвоения резко падает до 10 % при чрезмерном потреблении.

Практически всё Fe, содержащееся в организме животного, является органическим, и существуют два вида органического железа, гемальное и негемальное. Гемальное и негемальное Fe поглощаются различными механизмами. Негемальное Fe содержится в основном в растительном корме, и на его всасывание сильно влияет его растворимость в верхней части тонкого кишечника (Perera D et al., 2023). Диетические ингибиторы всасывания негемального железа – Са, Р и фитиновая кислота. Однако добавление в рацион относительно небольших количеств витамина С увеличивает абсорбцию Fe без гемоглобина.

Всасывание Мп происходит по всей длине тонкого кишечника, и уровень марганца в рационе не оказывает выраженного влияния на всасывание других микроэлементов (Бао YM and Choct M, 2009). Процесс поглощения Zn физиологически можно разделить на два отдельных про-

цесса: поглощение Zn клетками и транспорт Zn из клеток в кровеносную систему. В целом механизмы поглощения Zn чётко не определены, хотя небольшая часть поглощения и переноса Zn может происходить путём простой диффузии. Предполагается, что Zn, высокозаряженный гидрофильный ион, не проникает через биологические мембраны путём простой диффузии, и считается, что его клеточное поглощение и высвобождение контролируются специальными механизмами. Однако потребление Zn с пищей не влияет на поглощение Zn базолатеральной мембраной, что позволяет предположить, что поглощение Zn не регулируется базолатеральной мембраной (Manzi P et al., 2021). Zn всегда связан с другим клеточным лигандом и переносится не в виде свободного иона Zn, а в форме комплекса с любым одним или несколькими агентами, такими как металлотионеин и цитраты и т. д., которые вместе образуют систему распределения (Mosna K et al., 2023). Существует неопределённость относительно места поглощения Zn. В основном считается, что Zn всасывается тонким кишечником, в первую очередь двенадцатиперстной кишкой и тощей кишкой, но также и подвздошной кишкой. Основываясь на модели на крысах, было высказано предположение, что поглощение Zn значительно выше в подвздошной кишке (~60 %), чем в двенадцатиперстной кишке (19 %) и тощей кишке (20 %). Однако у цыплят наблюдалось поглощение Zn перед тонким кишечником (желудком) (Gao S et al., 2014). Низкое потребление Zn повышает эффективность всасывания, что помогает последнему усваиваться в соответствии с потребностями животного (Bao YM and Choct M, 2009).

Cu, Fe, Mn и Zn подвержены гидроксиполимеризации и растворимы в кислоте. В нейтральной среде кишечника они легко образуют нерастворимые осадки гидроксида. Таким образом, вполне вероятно, что всасывание этих микроэлементов регулируется в желудке выработкой желудочного сока. Заметное снижение выработки соляной кислоты может привести к снижению концентрации растворимого и потенциально доступного металла в просвете желудка (Renna M et al., 2022).

### **Заключение.**

Таким образом, лежащее в основе физиологических механизмов усвоение минералов будет меняться по мере эволюции генотипов бройлеров, однако по мере увеличения потенциала роста птицы будет повышаться количество полученной мясной продукции при меньших затратах корма. При этом быстрорастущие бройлеры могут требовать пересмотра стандартных рационов и уровня включения в них минеральных препаратов. Единственный способ добиться постоянного содержания минеральных веществ в организме – это осуществление нутриентной обеспеченности на клеточном уровне за счёт увеличения суточной концентрации элементов или использование форм с высокой биодоступностью (нано- и металл-лигандные формы).

### **Список источников**

1. Изучение влияния пробиотиков на продуктивные и гематологические показатели крови цыплят-бройлеров / Р.А. Тузиков, С.В. Лебедев, А.Е. Аринжанов, М.С. Аринжанова // Животноводство и кормопроизводство. 2022. Т. 105. № 4. С. 195-207. [Tuzikov RA, Lebedev SV, Arinzhyanov AE, Arinzhyanova MS. Study of the effect of probiotics on productive and hematological parameters of broiler blood. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2022;105(4):195-207. (In Russ.)] <https://doi.org/10.33284/2658-3135-105-4-195>
2. Морфобиохимические 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. [Musabayeva LL, Sizova EA, Lutkovskaya YaV, Ivanishcheva 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>

3. Aksu DS, Aksu T, Onel SE. Does inclusion at low levels of organically complexed minerals versus inorganic forms create a weakness in performance or antioxidant defense system in broiler diets? *Int J Poult Sci.* 2012;11(10):666-672. doi: 10.3923/ijps.2012.666.672
4. Ao T, Pierce JL, Pescatore AJ, Cantor AH, Dawson KA, Ford MJ, Shafer BL. Effects of organic zinc and phytase supplementation in a maize-soybean meal diet on the performance and tissue zinc content of broiler chicks. *Br Poult Sci.* 2007;48(6):690-695. doi: 10.1080/00071660701694072
5. Araújo CSS, Hermes RG, Bittencourt LC, Silva CC, Araújo LF, Granghelli CA, Pelissari PH, Roque FA, Leite BGS. Different dietary trace mineral sources for broiler breeders and their progenies. *Poult Sci.* 2019;98(10):4716-4721. doi: 10.3382/ps/pez182
6. Arriaza K, Brito J, Siques P, Flores K, Ordenes S, Aguayo D, López MDR, Arribas SM. Effects of zinc on the right cardiovascular circuit in long-term hypobaric hypoxia in wistar rats. *Int J Mol Sci.* 2023;24(11):9567. doi: 10.3390/ijms24119567
7. Bao YM, Choct M. Trace mineral nutrition for broiler chickens and prospects of application of organically complexed trace minerals: a review. *Anim Prod Sci.* 2009;49:269-82. doi: 10.1071/EA08204
8. Bradbury EJ, Wilkinson SJ, Cronin GM, Thomson PC, Bedford MR, Cowieson AJ. Nutritional geometry of calcium and phosphorus nutrition in broiler chicks. Growth performance, skeletal health and intake arrays. *Animal.* 2014;8(7):1071-1079. doi: 10.1017/S1751731114001037
9. Byrne L, Murphy RA. Relative bioavailability of trace minerals in production animal nutrition: a review. *Animals.* 2022;12(15):1981. doi: 10.3390/ani12151981
10. Cao J, Guo Y, Luo X, Ge C, Hu Z, Wu L, Lv Y, Lin G, Yu D, Liu B. Interactions between enzyme preparations and trace element sources on growth performance and intestinal health of broiler chicks. *Poultry Science.* 2023;102(12):103124. doi: 10.1016/j.psj.2023.103124
11. Chrystal PV, Moss AF, AKhoddami A, Naranjo VD, Selle PH, Liu SY. Effects of reduced crude protein levels, dietary electrolyte balance, and energy density on the performance of broiler chickens offered maize-based diets with evaluations of starch, protein, and amino acid metabolism. *Poult Sci.* 2020;99(3):1421-1431. doi: 10.1016/j.psj.2019.10.060
12. Cobb-Vantress.com. [Internet]. Cobb 500: Broiler performance and nutrition supplement. Available from: <https://www.cobb-vantress.com/assets/5a88f2e793/Broiler-Performance-Nutrition-Supplement.pdf> (accessed 14.11.2022).
13. De Grande A, Leleu S, Delezie E, Rapp C, De Smet S, Goossens E, Haesebrouck F, Immerseel F, Ducatelle R. Dietary zinc source impacts intestinal morphology and oxidative stress in young broilers. *Poultry Science.* 2020;99(1):441-453. doi: 10.3382/ps/pez525
14. Dong G, Chen H, Qi M, Dou Y, Wang Q. Balance between metallothionein and metal response element binding transcription factor 1 is mediated by zinc ions (review). *Mol Med Rep.* 2015;11(3):1582-1586. doi: 10.3892/mmr.2014.2969
15. Ebbing MA, Vieira SL, Stefanello C, Berwanger E, Mayer A, Maria DD, Firman AK. An investigation on iron sources fed to broiler breeder hens and the corresponding color of laid eggshells on the performance of the resulting progeny. *J Appl Poult Res.* 2019;28(1):184-193. doi: 10.3382/japr/pfy064
16. Espinosa CD, Stein HH. Digestibility and metabolism of copper in diets for pigs and influence of dietary copper on growth performance, intestinal health, and overall immune status: a review. *Journal of Animal Science and Biotechnology.* 2021;12:13. doi: 10.1186/s40104-020-00533-3
17. Favero A, Vieira SL, Angel CR, Bess F, Cemin HS, Ward TL. Reproductive performance of Cobb 500 breeder hens fed diets supplemented with zinc, manganese, and copper from inorganic and amino acid-complexed sources. *J Appl Poult Res.* 2013;22(1):80-91. doi: 10.3382/japr.2012-00607
18. Gaál KK, Sáfár O, Gulyás L, Stadler P. Magnesium in animal nutrition. *J Am Coll Nutr.* 2004;23(6):754S-757S. doi: 10.1080/07315724.2004.10719423
19. Gao S, Yin T, Xu B, Ma Y, Hu M. Amino acid facilitates absorption of copper in the Ca-co-2 cell culture model. *Life Sci.* 2014;109(1):50-56. doi: 10.1016/j.lfs.2014.05.021

20. Goff JP. Invited review: mineral absorption mechanisms, mineral interactions that affect acid-base and antioxidant status, and diet considerations to improve mineral status. *J Dairy Sci.* 2018;101(4):2763-2813. doi: 10.3168/jds.2017-13112
21. Hafeez A. Effect of different feed treatment strategies on apparent mineral digestibility and retention in broilers and layers and egg quality in laying hens. [dissertation] Berlin; 2015:101 p.
22. Hu Y, Liao X, Wen Q, Lu L, Zhang L, Luo X. Phosphorus absorption and gene expression levels of related transporters in the small intestine of broilers. *Br J Nutr.* 2018;119(12):1346-1354. doi: 10.1017/S0007114518000934
23. Jiang SQ, Azzam MM, Yu H, Fan QL, Li L, Gou ZY, Lin XJ, Liu M, Jiang ZY. Sodium and chloride requirements of yellow-feathered chickens between 22 and 42 days of age. *Animal.* 2019;13(10):2183-2189. doi: 10.1017/S1751731119000594
24. Khaksar V, Meda B, Narcy A. Updating the available P requirements of broilers. In: Francesch M, Torrallardona D, Brufau J, eds. Proceedings of the 21<sup>st</sup> European Symposium on Poultry Nutrition. The Netherlands, Wageningen: Wageningen Academic Publishers; 2017:124-129.
25. Kim JH, Jung H, Pitargue FM, Han GP, Choi HS, Kil DY. Effect of dietary calcium concentrations in low non-phytate phosphorus diets containing phytase on growth performance, bone mineralization, litter quality, and footpad dermatitis incidence in growing broiler chickens. *Asian-Australas J Anim Sci.* 2017;30(7):979-983. doi: 10.5713/ajas.17.0112
26. Kleyн R. Chicken Nutrition: A guide for nutritionists and poultry professionals. Context Publications; 2013:347 p.
27. Kleyн RJ, Ciacciariello M. Mineral nutrition in broilers: Where are we at? Proceedings of the Arkansas Nutrition Conference, Rogers, AR, 2021, 31st Aug. to 2nd Sept. USA, Arkansas, 2021;2021:1. <https://scholarworks.uark.edu/panc/vol2021/iss1/1>
28. Korish MA, Attia YA. Evaluation of heavy metal content in feed, litter, meat, meat products, liver, and table eggs of chickens. *Animals.* 2020;10(4): 727. doi: 10.3390/ani10040727
29. Korver DR. Calcium nutrition, bone metabolism, and eggshell quality in longer-persisting layer flocks. In: Proceedings of the 31st Aust. Poult. Science Symp. Sydney, Australia, 16-19 February 2020. 2020;31:1-7.
30. Kumar BAAS. Hormonal regulation of metabolism, water, and minerals. In: Das PK, Sejian V, Mukherjee J, Banerjee D, editors. Textbook of veterinary physiology. Singapore: Springer; 2023:391-415. doi: 10.1007/978-981-19-9410-4\_16
31. Ledoux DR, Shannon MC. Bioavailability and antagonists of trace minerals in ruminant metabolism. In: Proceedings of the Florida Ruminant Symposium, Gainesville, FL, USA, 1-2 February 2005. FL, Gainesville; 2005:23-37.
32. Leeson S. Limiting the nutrient supply to gut pathogens. Elanco Master Class, Kuala Lumpur, Malaysia. 2018.
33. Lesson S, Caston L. Using minimal supplements of trace minerals as a method of reducing trace mineral content of poultry manure. *Anim Feed Sci Technol.* 2008;142(3-4):339-347. doi:10.1016/j.anifeedsci.2007.08.004
34. Levesque CL, Moehn S, Pencharz PB, Ball RO. Review of advances in metabolic bioavailability of amino acids. *Livestock Science.* 2010;133(1-3):4-9. doi:10.1016/j.livsci.2010.06.013
35. Li W, Angel R, Kim SW, Brady K, Yu S, Plumstead PW. Impacts of dietary calcium, phytate, and nonphytate phosphorus concentrations in the presence or absence of phytase on inositol hexakisphosphate (IP6) degradation in different segments of broilers digestive tract. *Poult Sci.* 2016;95(3):581-589. doi: 10.3382/ps/pev354
36. Li W, Angel R, Plumstead PW, Enting H. Effects of limestone particle size, calcium source and phytase on standardized ileal calcium and phosphorus digestibility in broilers. *Poult Sci.* 2021;100(2):900-909. doi: 10.1016/j.psj.2020.10.075

37. Liao X, Lu L, Li S, Liu S, Zhang L, Wang G, Li A, Luo X. Effects of selenium source and level on growth performance, tissue selenium concentrations, antioxidation, and immune functions of heat-stressed broilers. *Biol Trace Elem Res.* 2012;150(1-3):158-165. doi: 10.1007/s12011-012-9517-3
38. Lim HS, Ji SI, Hwang H, Kang J, Park YH, Lee HH, Kim TH. Relationship between bone density, eating habit, and nutritional intake in college students. *J Bone Metab.* 2018;25(3):181-186. doi: 10.11005/jbm.2018.25.3.181
39. Lv G, Yang C, Wang X, Yang Z, Yang W, Zhou J, Mo W, Liu F, Liu M, Jiang S. Effects of different trace elements and levels on nutrients and energy utilization, antioxidant capacity, and mineral deposition of broiler chickens. *Agriculture.* 2023;13(7):1369. doi: 10.3390/agriculture13071369
40. Manzi P, Di Costanzo MG, Ritota M. Content and nutritional evaluation of zinc in pdo and traditional italian cheeses. *Molecules.* 2021;26(20):6300. doi: 10.3390/molecules26206300
41. Mion B, Van Winters B, King K, Spricigo JFW, Ogilvie L, Guan L, DeVries TJ, McBride BW, LeBlanc SJ, Steele MA, Ribeiro ES. Effects of replacing inorganic salts of trace minerals with organic trace minerals in pre- and postpartum diets on feeding behavior, rumen fermentation, and performance of dairy cows. *J Dairy Sci.* 2022;105(8):6693-6709. doi: 10.3168/jds.2022-21908
42. Molenda M, Kolmas J. The role of zinc in bone tissue health and regeneration-a review. *Biol Trace Elem Res.* 2023;201(12):5640-5651. doi: 10.1007/s12011-023-03631-1
43. Mosna K, Jurczak K, Krężel A. Differentiated Zn(II) binding affinities in animal, plant, and bacterial metallothioneins define their zinc buffering capacity at physiological pZn. *Metallomics.* 2023;15(10):mfad061. doi: 10.1093/mtomcs/mfad061
44. Moss AF, Chrystal PV, Dersjant-Li Y, Liu SY, Selle PH. The ranked importance of dietary factors influencing the performance of broiler chickens offered phytase-supplemented diets by the Plackett-Burman screening design. *Br Poult Sci.* 2019;60(4):439-448. doi: 10.1080/00071668.2019.1605154
45. M'Sadeq SA, Wu SB, Choct M, Swick RA. Influence of trace mineral sources on broiler performance, lymphoid organ weights, apparent digestibility, and bone mineralization. *Poult Sci.* 2018;97(9):3176-3182. doi: 10.3382/ps/pey197
46. Nasir Z, Peebles ED. Symposium: avian embryo nutrition and incubation. *Poult Sci.* 2018;97(8):2994-2995. doi: 10.3382/ps/pey137
47. National Research Council. *Nutrient Requirements of Poultry.* 9th Rev. Ed. Washington, DC: The National Academies Press; 1994:157 p.
48. Nollet L, Van Der Klis JD, Lensing M, Spring P. The effect of replacing inorganic with organic trace minerals in broiler diets on productive performance and mineral excretion. *J Appl Poult Res.* 2007;16(4):592-597. doi: 10.3382/japr.2006-00115
49. Novotry JA, Turnlund J. Molybdenum disposition in humans during molybdenum depletion and repletion. *The Journal of Nutrition.* 2006;136(4):953-957. doi: 10.1093/jn/136.4.953
50. Perera D, Palliyaguruge C, Eapasinghe D, Liyanage D, Seneviratne R, Demini D, Jayasinghe M, Faizan M, Rajagopalan U, Galhena B, Hays H, Senathilake K, Tennekoon K, Samarakoon S. Factors affecting iron absorption and the role of fortification in enhancing iron levels. *Nutrition Bulletin.* 2023;48(4):442-457. doi: 10.1111/nbu.12643
51. Plumstead PW, Romero-Sanchez H, Maguire RO, Gernat AG, Brake J. Effects of phosphorus level and phytase in broiler breeder rearing and laying diets on live performance and phosphorus excretion. *Poult Sci.* 2007;86(2):225-231. doi: 10.1093/ps/86.2.225
52. Quiniou N, Narcy A. Pourquoi et comment intégrer la balance électrolytique dans les critères de formulation des aliments pour monogastriques. Treizièmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras, Tours, 20 et 21 mars 2019. *JRA-JRFG;*2019:145-156.
53. Renna M, D'Imperio M, Maggi S, Serio F. Soilless biofortification, bioaccessibility, and bioavailability: Signposts on the path to personalized nutrition. *Front Nutr.* 2022;9:966018. doi: 10.3389/fnut.2022.966018

54. Scott ML, Nesheim MC, Young RJ. Nutrition of chicken. NY, Ithaca: ML Scott and Associates publishers; 1982:562 p.
55. Surai PF, Kochish II, Romanov MN, Griffin DK. Nutritional modulation of the antioxidant capacities in poultry: the case of vitamin E. *Poult Sci.* 2019;98(9):4030-4041. doi: 10.3382/ps/pez072
56. Suttle NF. Mineral Nutrition of Livestock, 4th ed. UK, London: CABI; 2010:587 p.
57. Swiatkiewicz S, Arczewska-Wlosek A, Józefiak D. The efficacy of organic minerals in poultry nutrition: review and implications of recent studies. *World's Poult Sci J.* 2014;70(3):475-486. doi: 10.1017/S0043933914000531
58. Vieira SL. Chelated minerals for poultry. *Rev Bras Ciênc Avic.* 2008;10(2):73-79. doi: 10.1590/S1516-635X2008000200001
59. Walk CL, Romero LF, Cowieson AJ. Towards a digestible calcium system for broiler chicken nutrition: A review and recommendations for the future. *Anim Feed Sci and Tech.* 2021;276:114930. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2021.114930
60. Woodmansee AN, Imlay JA. Quantitation of intracellular free iron by electron paramagnetic resonance spectroscopy. *Methods Enzymol.* 2002;349:3-9. doi: 10.1016/s0076-6879(02)49316-0
61. Zaefarian F, Cowieson A, Pontoppidan K, Abdollahi M, Ravindran V. Trends in feed evaluation for poultry with emphasis on in vitro techniques. *Animal Nutrition.* 2021;7(2):268-281. doi: 10.1016/j.aninu.2020.08.006
62. Zamany S, Sedghi M, Hafizi M, Nazaran MH, KimiaeiTalab MV. Organic acid-based chelate trace mineral supplement improves broiler performance, bone composition, immune responses, and blood parameters. *Biol Trace Elem Res.* 2023;201(10):4882-4899. doi: 10.1007/s12011-023-03555-w
63. Zhao J, Shirley RB, Vazquez-Anon M, Dibner JJ, Richards JD, Fisher P, Hampton T, Christensen KD, Allard JD, Giesen AF. Effects of chelated trace minerals on growth performance, breast meat yield, and footpad health in commercial meat broiler. *Appl Poult Res.* 2010;19(4):365-372. doi: 10.3382/japr.2009-00020

## References

1. Tuzikov RA, Lebedev SV, Arinzhanov AE, Arinzhanova MS. Study of the effect of probiotics on productive and hematological parameters of broiler blood. *Animal Husbandry and Fodder Production.* 2022;105(4):195-207. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-105-4-195>
2. Musabayeva LL, Sizova EA, Lutkovskaya YaV, Ivanishcheva AP. Morphobiochemical parameters of blood of broilers using a silicon-containing feed additive. *Animal Husbandry and Fodder Production.* 2022;105(2):95-106. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-105-2-95>
3. Aksu DS, Aksu T, Onel SE. Does inclusion at low levels of organically complexed minerals versus inorganic forms create a weakness in performance or antioxidant defense system in broiler diets? *Int J Poult Sci.* 2012;11(10):666-672. doi: 10.3923/ijps.2012.666.672
4. Ao T, Pierce JL, Pescatore AJ, Cantor AH, Dawson KA, Ford MJ, Shafer BL. Effects of organic zinc and phytase supplementation in a maize-soybean meal diet on the performance and tissue zinc content of broiler chicks. *Br Poult Sci.* 2007;48(6):690-695. doi: 10.1080/00071660701694072
5. Araújo CSS, Hermes RG, Bittencourt LC, Silva CC, Araújo LF, Granghelli CA, Pelissari PH, Roque FA, Leite BGS. Different dietary trace mineral sources for broiler breeders and their progenies. *Poult Sci.* 2019;98(10):4716-4721. doi: 10.3382/ps/pez182
6. Arriaza K, Brito J, Siques P, Flores K, Ordenes S, Aguayo D, López MDR, Arribas SM. Effects of zinc on the right cardiovascular circuit in long-term hypobaric hypoxia in wistar rats. *Int J Mol Sci.* 2023;24(11):9567. doi: 10.3390/ijms24119567
7. Bao YM, Choct M. Trace mineral nutrition for broiler chickens and prospects of application of organically complexed trace minerals: a review. *Anim Prod Sci.* 2009;49:269-82. doi: 10.1071/EA08204

8. Bradbury EJ, Wilkinson SJ, Cronin GM, Thomson PC, Bedford MR, Cowieson AJ. Nutritional geometry of calcium and phosphorus nutrition in broiler chicks. Growth performance, skeletal health and intake arrays. *Animal*. 2014;8(7):1071-1079. doi: 10.1017/S1751731114001037
9. Byrne L, Murphy RA. Relative bioavailability of trace minerals in production animal nutrition: a review. *Animals*. 2022;12(15):1981. doi: 10.3390/ani12151981
10. Cao J, Guo Y, Luo X, Ge C, Hu Z, Wu L, Lv Y, Lin G, Yu D, Liu B. Interactions between enzyme preparations and trace element sources on growth performance and intestinal health of broiler chicks. *Poultry Science*. 2023;102(12):103124. doi: 10.1016/j.psj.2023.103124
11. Chrystal PV, Moss AF, AKhoddami A, Naranjo VD, Selle PH, Liu SY. Effects of reduced crude protein levels, dietary electrolyte balance, and energy density on the performance of broiler chickens offered maize-based diets with evaluations of starch, protein, and amino acid metabolism. *Poult Sci*. 2020;99(3):1421-1431. doi: 10.1016/j.psj.2019.10.060
12. Cobb-Vantress.com. [Internet]. Cobb 500: Broiler performance and nutrition supplement. Available from: <https://www.cobb-vantress.com/assets/5a88f2e793/Broiler-Performance-Nutrition-Supplement.pdf> (accessed 14.11.2022).
13. De Grande A, Leleu S, Delezie E, Rapp C, De Smet S, Goossens E, Haesebrouck F, Immerseel F, Ducatelle R. Dietary zinc source impacts intestinal morphology and oxidative stress in young broilers. *Poultry Science*. 2020;99(1):441-453. doi: 10.3382/ps/pez525
14. Dong G, Chen H, Qi M, Dou Y, Wang Q. Balance between metallothionein and metal response element binding transcription factor 1 is mediated by zinc ions (review). *Mol Med Rep*. 2015;11(3):1582-1586. doi: 10.3892/mmr.2014.2969
15. Ebbing MA, Vieira SL, Stefanello C, Berwanger E, Mayer A, Maria DD, Firman AK. An investigation on iron sources fed to broiler breeder hens and the corresponding color of laid eggshells on the performance of the resulting progeny. *J Appl Poult Res*. 2019;28(1):184-193. doi: 10.3382/japr/pfy064
16. Espinosa CD, Stein HH. Digestibility and metabolism of copper in diets for pigs and influence of dietary copper on growth performance, intestinal health, and overall immune status: a review. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2021;12:13. doi: 10.1186/s40104-020-00533-3
17. Favero A, Vieira SL, Angel CR, Bess F, Cemin HS, Ward TL. Reproductive performance of Cobb 500 breeder hens fed diets supplemented with zinc, manganese, and copper from inorganic and amino acid-complexed sources. *J Appl Poult Res*. 2013;22(1):80-91. doi: 10.3382/japr.2012-00607
18. Gaál KK, Sáfár O, Gulyás L, Stadler P. Magnesium in animal nutrition. *J Am Coll Nutr*. 2004;23(6):754S-757S. doi: 10.1080/07315724.2004.10719423
19. Gao S, Yin T, Xu B, Ma Y, Hu M. Amino acid facilitates absorption of copper in the Ca-co-2 cell culture model. *Life Sci*. 2014;109(1):50-56. doi: 10.1016/j.lfs.2014.05.021
20. Goff JP. Invited review: mineral absorption mechanisms, mineral interactions that affect acid-base and antioxidant status, and diet considerations to improve mineral status. *J Dairy Sci*. 2018;101(4):2763-2813. doi: 10.3168/jds.2017-13112
21. Hafeez A. Effect of different feed treatment strategies on apparent mineral digestibility and retention in broilers and layers and egg quality in laying hens. [dissertation] Berlin; 2015:101 p.
22. Hu Y, Liao X, Wen Q, Lu L, Zhang L, Luo X. Phosphorus absorption and gene expression levels of related transporters in the small intestine of broilers. *Br J Nutr*. 2018;119(12):1346-1354. doi: 10.1017/S0007114518000934
23. Jiang SQ, Azzam MM, Yu H, Fan QL, Li L, Gou ZY, Lin XJ, Liu M, Jiang ZY. Sodium and chloride requirements of yellow-feathered chickens between 22 and 42 days of age. *Animal*. 2019;13(10):2183-2189. doi: 10.1017/S1751731119000594
24. Khaksar V, Meda B, Narcy A. Updating the available P requirements of broilers. In: Francesch M, Torrallardona D, Brufau J, eds. *Proceedings of the 21<sup>st</sup> European Symposium on Poultry Nutrition*. The Netherlands, Wageningen: Wageningen Academic Publishers; 2017:124-129.
25. Kim JH, Jung H, Pitargue FM, Han GP, Choi HS, Kil DY. Effect of dietary calcium concentrations in low non-phytate phosphorus diets containing phytase on growth performance, bone mineral-

ization, litter quality, and footpad dermatitis incidence in growing broiler chickens. *Asian-Australas J Anim Sci.* 2017;30(7):979-983. doi: 10.5713/ajas.17.0112

26. Kleyн R. *Chicken Nutrition: A guide for nutritionists and poultry professionals.* Context Publications; 2013:347 p.

27. Kleyн RJ, Ciacciariello M. Mineral nutrition in broilers: Where are we at? Proceedings of the Arkansas Nutrition Conference, Rogers, AR, 2021, 31st Aug. to 2nd Sept. USA, Arkansas, 2021;2021:1. <https://scholarworks.uark.edu/panc/vol2021/iss1/1>

28. Korish MA, Attia YA. Evaluation of heavy metal content in feed, litter, meat, meat products, liver, and table eggs of chickens. *Animals.* 2020;10(4): 727. doi: 10.3390/ani10040727

29. Korver DR. Calcium nutrition, bone metabolism, and eggshell quality in longer-persisting layer flocks. In: Proceedings of the 31st Aust. Poult. Science Symp. Sydney, Australia, 16-19 February 2020. 2020;31:1-7.

30. Kumar BAAS. Hormonal regulation of metabolism, water, and minerals. In: Das PK, Sejian V, Mukherjee J, Banerjee D, editors. *Textbook of veterinary physiology.* Singapore: Springer; 2023:391-415. doi: 10.1007/978-981-19-9410-4\_16

31. Ledoux DR, Shannon MC. Bioavailability and antagonists of trace minerals in ruminant metabolism. In: Proceedings of the Florida Ruminant Symposium, Gainesville, FL, USA, 1-2 February 2005. FL, Gainesville; 2005:23-37.

32. Leeson S. Limiting the nutrient supply to gut pathogens. *Elanco Master Class, Kuala Lumpur, Malaysia.* 2018.

33. Lesson S, Caston L. Using minimal supplements of trace minerals as a method of reducing trace mineral content of poultry manure. *Anim Feed Sci Technol.* 2008;142(3-4):339-347. doi:10.1016/j.anifeedsci.2007.08.004

34. Levesque CL, Moehn S, Pencharz PB, Ball RO. Review of advances in metabolic bioavailability of amino acids. *Livestock Science.* 2010;133(1-3):4-9. doi:10.1016/j.livsci.2010.06.013

35. Li W, Angel R, Kim SW, Brady K, Yu S, Plumstead PW. Impacts of dietary calcium, phytate, and nonphytate phosphorus concentrations in the presence or absence of phytase on inositol hexakisphosphate (IP6) degradation in different segments of broilers digestive tract. *Poult Sci.* 2016;95(3):581-589. doi: 10.3382/ps/pev354

36. Li W, Angel R, Plumstead PW, Enting H. Effects of limestone particle size, calcium source and phytase on standardized ileal calcium and phosphorus digestibility in broilers. *Poult Sci.* 2021;100(2):900-909. doi: 10.1016/j.psj.2020.10.075

37. Liao X, Lu L, Li S, Liu S, Zhang L, Wang G, Li A, Luo X. Effects of selenium source and level on growth performance, tissue selenium concentrations, antioxidation, and immune functions of heat-stressed broilers. *Biol Trace Elem Res.* 2012;150(1-3):158-165. doi: 10.1007/s12011-012-9517-3

38. Lim HS, Ji SI, Hwang H, Kang J, Park YH, Lee HH, Kim TH. Relationship between bone density, eating habit, and nutritional intake in college students. *J Bone Metab.* 2018;25(3):181-186. doi: 10.11005/jbm.2018.25.3.181

39. Lv G, Yang C, Wang X, Yang Z, Yang W, Zhou J, Mo W, Liu F, Liu M, Jiang S. Effects of different trace elements and levels on nutrients and energy utilization, antioxidant capacity, and mineral deposition of broiler chickens. *Agriculture.* 2023;13(7):1369. doi: 10.3390/agriculture13071369

40. Manzi P, Di Costanzo MG, Ritota M. Content and nutritional evaluation of zinc in pdo and traditional italian cheeses. *Molecules.* 2021;26(20):6300. doi: 10.3390/molecules26206300

41. Mion B, Van Winters B, King K, Spricigo JFW, Ogilvie L, Guan L, DeVries TJ, McBride BW, LeBlanc SJ, Steele MA, Ribeiro ES. Effects of replacing inorganic salts of trace minerals with organic trace minerals in pre- and postpartum diets on feeding behavior, rumen fermentation, and performance of dairy cows. *J Dairy Sci.* 2022;105(8):6693-6709. doi: 10.3168/jds.2022-21908

42. Molenda M, Kolmas J. The role of zinc in bone tissue health and regeneration-a review. *Biol Trace Elem Res.* 2023;201(12):5640-5651. doi: 10.1007/s12011-023-03631-1

43. Mosna K, Jurczak K, Krężel A. Differentiated Zn(II) binding affinities in animal, plant, and bacterial metallothioneins define their zinc buffering capacity at physiological pZn. *Metallomics*. 2023;15(10):mfad061. doi: 10.1093/mtomcs/mfad061
44. Moss AF, Chrystal PV, Dersjant-Li Y, Liu SY, Selle PH. The ranked importance of dietary factors influencing the performance of broiler chickens offered phytase-supplemented diets by the Plackett-Burman screening design. *Br Poult Sci*. 2019;60(4):439-448. doi: 10.1080/00071668.2019.1605154
45. M'Sadeq SA, Wu SB, Choct M, Swick RA. Influence of trace mineral sources on broiler performance, lymphoid organ weights, apparent digestibility, and bone mineralization. *Poult Sci*. 2018;97(9):3176-3182. doi: 10.3382/ps/pey197
46. Nasir Z, Peebles ED. Symposium: avian embryo nutrition and incubation. *Poult Sci*. 2018;97(8):2994-2995. doi: 10.3382/ps/pey137
47. National Research Council. *Nutrient Requirements of Poultry*. 9th Rev. Ed. Washington, DC: The National Academies Press; 1994:157 p.
48. Nollet L, Van Der Klis JD, Lensing M, Spring P. The effect of replacing inorganic with organic trace minerals in broiler diets on productive performance and mineral excretion. *J Appl Poult Res*. 2007;16(4):592-597. doi: 10.3382/japr.2006-00115
49. Novotry JA, Turnlund J. Molybdenum disposition in humans during molybdenum depletion and repletion. *The Journal of Nutrition*. 2006;136(4):953-957. doi: 10.1093/jn/136.4.953
50. Perera D, Palliyaguruge C, Eapasinghe D, Liyanage D, Seneviratne R, Demini D, Jayasinghe M, Faizan M, Rajagopalan U, Galhena B, Hays H, Senathilake K, Tennekoon K, Samarakoon S. Factors affecting iron absorption and the role of fortification in enhancing iron levels. *Nutrition Bulletin*. 2023;48(4):442-457. doi: 10.1111/nbu.12643
51. Plumstead PW, Romero-Sanchez H, Maguire RO, Gernat AG, Brake J. Effects of phosphorus level and phytase in broiler breeder rearing and laying diets on live performance and phosphorus excretion. *Poult Sci*. 2007;86(2):225-231. doi: 10.1093/ps/86.2.225
52. Quiniou N, Narcy A. Pourquoi et comment intégrer la balance électrolytique dans les critères de formulation des aliments pour monogastriques. Treizièmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras, Tours, 20 et 21 mars 2019. *JRA-JRFG*;2019:145-156.
53. Renna M, D'Imperio M, Maggi S, Serio F. Soilless biofortification, bioaccessibility, and bioavailability: Signposts on the path to personalized nutrition. *Front Nutr*. 2022;9:966018. doi: 10.3389/fnut.2022.966018
54. Scott ML, Nesheim MC, Young RJ. *Nutrition of chicken*. NY, Ithaca: ML Scott and Associates publishers; 1982:562 p.
55. Surai PF, Kochish II, Romanov MN, Griffin DK. Nutritional modulation of the antioxidant capacities in poultry: the case of vitamin E. *Poult Sci*. 2019;98(9):4030-4041. doi: 10.3382/ps/pez072
56. Suttle NF. *Mineral Nutrition of Livestock*, 4th ed. UK, London: CABI; 2010:587 p.
57. Swiatkiewicz S, Arczewska-Wlosek A, Józefiak D. The efficacy of organic minerals in poultry nutrition: review and implications of recent studies. *World's Poult Sci J*. 2014;70(3):475-486. doi: 10.1017/S0043933914000531
58. Vieira SL. Chelated minerals for poultry. *Rev Bras Ciênc Avic*. 2008;10(2):73-79. doi: 10.1590/S1516-635X2008000200001
59. Walk CL, Romero LF, Cowieson AJ. Towards a digestible calcium system for broiler chicken nutrition: A review and recommendations for the future. *Anim Feed Sci and Tech*. 2021;276:114930. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2021.114930
60. Woodmansee AN, Imlay JA. Quantitation of intracellular free iron by electron paramagnetic resonance spectroscopy. *Methods Enzymol*. 2002;349:3-9. doi: 10.1016/s0076-6879(02)49316-0
61. Zaefarian F, Cowieson A, Pontoppidan K, Abdollahi M, Ravindran V. Trends in feed evaluation for poultry with emphasis on in vitro techniques. *Animal Nutrition*. 2021;7(2):268-281. doi: 10.1016/j.aninu.2020.08.006

62. Zamany S, Sedghi M, Hafizi M, Nazaran MH, KimiaeiTalab MV. Organic acid-based chelate trace mineral supplement improves broiler performance, bone composition, immune responses, and blood parameters. *Biol Trace Elem Res.* 2023;201(10):4882-4899. doi: 10.1007/s12011-023-03555-w
63. Zhao J, Shirley RB, Vazquez-Anon M, Dibner JJ, Richards JD, Fisher P, Hampton T, Christensen KD, Allard JD, Giesen AF. Effects of chelated trace minerals on growth performance, breast meat yield, and footpad health in commercial meat broiler. *Appl Poult Res.* 2010;19(4):365-372. doi: 10.3382/japr.2009-00020

**Информация об авторах:**

**Ольга Вилориевна Кван**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, и.о. заведующего отделом кормления сельскохозяйственных животных и технологии кормов им. С.Г. Леушина, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 89225485657.

**Information about the authors:**

**Olga V Kvan**, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Acting Head of the Department of Feeding Farm Animals and Feed Technology named after S.G. Leushin, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 460000, Orenburg, January 9, 29, cell.: 89225485657.

Статья поступила в редакцию 21.11.2023; одобрена после рецензирования 24.11.2023; принята к публикации 11.12.2023.

The article was submitted 21.11.2023; approved after reviewing 24.11.2023; accepted for publication 11.12.2023.