

Животноводство и кормопроизводство. 2025. Т. 108. № 4. С. 217-233.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2025. Vol. 108. No. 4. P. 217-233.

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА КОРМЛЕНИЯ

Обзорная статья
УДК 636.085:577.17
doi:10.33284/2658-3135-108-4-217

Использование различных форм железа в кормлении животных

Оксана Васильевна Баранова¹, Елена Викторовна Кияева², Светлана Викторовна Нотова³

^{1,2,3}Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

¹baranovaov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2780-6499>

²elena_sap@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6476-7839>

³snotova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6378-4522>

Аннотация. Железо является незаменимым микроэлементом, а железосодержащие белки выполняют множество жизненно важных функций в физиологических и биохимических процессах организма. Известно, что дефицит железа является одним из самых распространенных недостатков питательных веществ в мире и быстрорастущие животные наиболее уязвимы к его дефициту. Поэтому железо часто используют в рацион животных в виде добавок для обеспечения роста и продуктивности. Чаще всего в рацион животных включают неорганический сульфат железа. Однако из-за множества недостатков неорганических добавок с железом (низкая биодоступность, гигроскопичность и взаимодействие с другими элементами, а также высокая экскреция), в настоящее время все больше внимания уделяется разработке и использованию новых источников железа, например, органических форм или наночастиц, что позволяет обеспечить высокую биодоступность элемента, его меньшую токсичность и снизить дозировку при добавлении в корма. Данная тема является актуальной для науки и в отечественной и иностранной литературе можно встретить достаточное количество исследований по данной тематике. В обзоре представлены сведения об использовании железа в различных его формах в кормлении животных, показаны перспективы его включения в корма.

Ключевые слова: кормление, железо, минеральные формы железа, органические формы железа, наночастицы

Благодарности: работа выполнена в соответствии с программой Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по реализации крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технического развития ФГБОУ ВО ОГУ (№ 075-15-2024-550).

Для цитирования: Баранова О.В., Кияева Е.В., Нотова С.В. Использование различных форм железа в кормлении животных (обзор) // Животноводство и кормопроизводство. 2025. Т. 108. № 4. С. 217-233. [Baranova OV, Kiyaeva EV, Notova SV. Different forms of iron in feeding of animals (review). Animal Husbandry and Fodder Production. 2025;108(4):217-233. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-108-4-217>

THEORY AND PRACTICE OF FEEDING

Review article

Different forms of iron in feeding of animals

Oksana V Baranova¹, Elena V Kiyaeva², Svetlana V Notova³

^{1,2,3} Orenburg State University, Orenburg, Russia

¹baranovaov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2780-6499>

²elena_sap@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6476-7839>

³snotova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6378-4522>

Abstract. Iron is an essential micronutrient, and iron-containing proteins perform many vital functions in the physiological and biochemical processes of the body. Iron deficiency is known to be one of the most common nutrient deficiencies in the world, and rapidly growing animals are most vulnerable to iron

deficiency. Therefore, iron is often added to animal diets as supplements to ensure growth and productivity. Inorganic ferrous sulfate is most often included in animal diets. However, due to many disadvantages of inorganic iron supplements (low bioavailability, hygroscopicity and interaction with other elements, as well as high excretion), more and more attention is currently paid to the development and use of new iron sources, such as organic forms or nanoforms, which ensure high bioavailability of the element, its lower toxicity and reduce of dosage when added to feed. This topic is relevant to science and a sufficient number of studies on this topic can be found in scientific journals. This review presents the analysis on the use of iron in its various forms in animal feeding, shows the prospects for its use in feed.

Keywords: feeding, iron, mineral forms of iron, organic forms of iron, nanoparticles

Acknowledgments: study was carried out in accordance with the program of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the implementation of major scientific projects in priority areas of scientific and technical development of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education of Orenburg State University (No. 075-15-2024-550).

For citation: Baranova OV, Kiyaeva EV, Notova SV. Different forms of iron in feeding of animals (review). Animal Husbandry and Fodder Production. 2025;108(4):217-233. (In Russ.). <https://doi.org/10.33284/2658-3135-108-4-217>

Введение.

Железо (Fe) является вторым по распространенности металлом в земной коре и, как известно, относится к биологически важным элементом каждого живого организма (Vogt A et al., 2021; Srole DN and Ganz T, 2021). Несмотря на его распространенность в воде, почве и растениях, биодоступность железа очень низкая из-за того, что при контакте с кислородом Fe образует нерастворимые оксиды (Huang J et al., 2021). Железо необходимо для транспортировки кислорода к клеткам и участвует во многих ферментативных реакциях, требуется для роста и развития всех живых организмов. Элемент играет важную роль во многих биологических процессах, включая транспорт кислорода, окислительное фосфорилирование, регуляцию роста и дифференцировки клеток, детоксикацию, клеточное дыхание, активность многих ферментов и стимулирование апоптоза (Phipps O et al., 2021; Dutt S et al., 2022; Шошина ОВ и др., 2023). У эндотермных животных Fe необходимо для производства цитохрома *c* и является ядром таких молекул, как гемоглобин и миоглобин (Sil R and Chakraborti AS, 2025). Железо также содержится в железосвязывающих белках, таких как ферритин, гемосидерин, трансферрин, овотрансферрин и лактоферрин. Овотрансферрин обнаружен в белке яиц птиц, тогда как лактоферрин – в молозиве и молоке млекопитающих и в секретах железистых клеток и нейтрофилов (Zeng Q et al., 2023).

Дефицит или избыточное количество железа в организме сельскохозяйственных животных может вызвать симптомы различных заболеваний, проявиться снижением гемоглобина в крови, что приведет к анемии (Balakirev NA et al., 2021; Кван О.В., 2023).

Симптомы дефицита Fe часто связывают с низким уровнем усвояемых форм Fe в кормах или с проблемами его усвоения (Radwinska J and Zarczynska K, 2014; Maji C et al., 2023). В исследовании нормальный уровень Fe в печени крупного рогатого скота составлял от 45 до 300 мг/кг живой массы животного, а значение <30 мг/кг данного показателя указывает на возможный дефицит железа. У молодых свиней дефицит Fe выявлялся в случае, если рацион не был дополнен этим элементом. Концентрация Fe при печеночной недостаточности у взрослых свиней и отъемышей на 3-й день обычно составляли 30-40 и 10-15 мг/кг живой массы животного соответственно (Ehret W et al., 1975).

Одним из актуальных вопросов является форма, в которой железо добавляется в корма животным, а также его дозировка. Европейская комиссия по добавкам и продуктам или веществам, используемым в кормах для животных (FEEDAP) провела анализ ряда соединений железа. В ходе работы, изучавшей максимально допустимый безопасный уровень содержания железа в кормах для животных, было показано, что 450 мг общего содержания железа на 1 кг корма является безопасным для крупного рогатого скота и домашней птицы, а 600 мг общего содержания железа на 1 кг корма — для домашних животных. Эти значения ниже соответствующих максимально допустимых уровней. Из-за недостатка данных комиссия FEEDAP не смогла определить максимально до-

пустимую безопасную концентрацию железа в кормах для лошадей и-рыб. Использование соединений железа в пределах максимально допустимого уровня, утверждённого в ЕС, не представляет угрозы для безопасности потребителей. Рассматриваемые соединения железа, за исключением карбоната железа, считаются эффективными источниками железа для всех видов и категорий животных; карбонат железа может быть эффективным только для взрослых животных (EFSA Panel on Additives and Products or Substances used in Animal Feed (FEEDAP), 2016).

Исследователи обращают внимание на то, что форма химического элемента, в данном случае – железа, играет решающее значение. Помимо различий по типу, неорганические и органические соединения сильно отличаются по тому, насколько хорошо они усваиваются и используются организмом животного. Традиционно в рацион животных добавлялись неорганические источники минеральных элементов, но было обнаружено, что они усваиваются неэффективно (Zafar MH and Fatima M, 2018; Olowoyeye JC, 2022). Исследования также показали, что низкий уровень pH в верхней части желудочно-кишечного тракта снижает усвояемость неорганических солей, вызывая их диссоциацию, в результате чего минералы становятся восприимчивыми к различным антагонистическим взаимодействиям питательных веществ и ингредиентов, которые ухудшают усвоение (Mion B et al., 2022). По мере повышения pH в тонком кишечнике минералы могут дополнительно образовывать нерастворимые гидроксидные осадки, делая их недоступными для всасывания (Byrne L and Murphy RA, 2022). В последние годы органические источники минералов все чаще используются вместо неорганических из-за их очевидных преимуществ: органические аналоги лучше защищены от нежелательных взаимодействий в желудочно-кишечном тракте и обладают повышенной биодоступностью (Gayathri SL and Panda N, 2018). Железо в форме ферритина (Fe^{3+}) плохо всасывается в желудочно-кишечном тракте. Двухвалентная форма железа (Fe^{2+}) обычно связывается с хелатором во время пищеварения, таким как гистидин, муцин или фруктоза, которые усиливают всасывание железа, растворяя ионы железа (Conrad ME and Umbreit JN, 2002). Образование комплексов железа с аминокислотами может позволить железу перемещаться по кишечнику с помощью переносчиков аминокислот. Железо также может образовывать комплексы с желудочным секретом, что позволяет ему оставаться растворимым в более нейтральной среде кишечника с pH (Conrad ME and Umbreit JN, 2002).

Учитывая важную роль железа в организме животных, а также зарегистрированные случаи рисков для здоровья, связанных с дефицитом железа, представляется целесообразным вводить дополнительные источники железа в корма животным.

Цель исследования.

Сбор и анализ литературных данных о применении различных форм железа в кормлении животных.

Материалы и методы исследования.

Систематический обзор литературы был проведен для получения сведений об использовании различных форм железа в кормлении животных. Поиск и анализ литературы осуществлялся через специализированные базы данных в Интернете – Elibrary, PubMed, Академия Google, ScienceDirect, Nation Library of Medicine, SpringerLink, Wiley online Library. Поиск осуществлялся по ключевым словам: железо (iron, Fe), кормление, кормовые добавки, наночастицы железа, ультрадисперсные формы железа, органические формы железа, минеральные формы железа, животноводство.

Результаты исследования и их обсуждение.

Обеспечение животных достаточным количеством питательных веществ необходимо для достижения экономической рентабельности яйценоскости, а также для поддержания надлежащего роста цыплят. Это более актуально для производителей бройлеров, поскольку они получают строго дозированный объем корма. С другой стороны, учитывая высокую концентрацию многих микро-

элементов, особенно металлов, в коммерческих кормах, существуют опасения по поводу их воздействия на окружающую среду в качестве загрязняющих веществ. В настоящее время вводятся ограничения на максимальное содержание минералов в кормах. Группа по добавкам и продуктам или веществам, используемым в кормах для животных, при Европейской комиссии пришла к выводу, что содержание железа в кормах для домашней птицы не должно превышать 450 частей на миллион сухой массы корма (EFSA, 2016). Это решение было принято с учетом того факта, что оксиды железа повсеместно встречаются в окружающей среде, и, следовательно, любое дополнительное поступление железа с пищей считается незначительным (EFSA, 2016).

Taschetto D с коллегами было проведено исследование для изучения потребности в железе у кур-несушек. С 35-й по 46-ю неделю цыплята получали рацион с дефицитом железа (24,6 мг/кг Fe) для частичного истощения запасов железа в организме. С 47-й по 70-ю неделю цыплятам давали шесть рационов с увеличивающимся содержанием сульфата железа (от 24,6 до 148,2 мг/кг Fe). Положительное влияние пищевого Fe наблюдалось на общее количество яиц и инкубационных яиц. Таким образом, исследователями было показано, что для поддержания яйценоскости, а также показателей выводимости цыплят необходим достаточный уровень железа (Taschetto D et al., 2017).

В последние десятилетия генетическая селекция направлена на повышение яйценоскости кур-несушек и скорости роста цыплят-бройлеров, однако остается неясным, каким образом подобные генетические улучшения влияют на потребности птиц в железе. В этой связи исследователями было показано, что концентрация железа в рационе влияет на содержание железа в желтке, выводимость оплодотворенных яиц. Увеличение яйценоскости кур-несушек и высокие темпы роста цыплят в раннем возрасте могли привести к увеличению потребности в железе, особенно с учетом того, что несушек кормят ограниченно (Sarlak S et al., 2021).

Железо в качестве пищевой добавки в птицеводстве в основном присутствует в неорганической форме в виде сульфата железа, в форме органических кислот в виде фумарата и цитрата или в виде хелатов аминокислот с глицином и метионином (Jarosz Ł et al., 2021). При этом хелаты железа с аминокислотами обладают значительно более высокой биодоступностью и стабильностью, чем неорганические формы. Кроме того, органические формы безопасны для окружающей среды и менее токсичны, чем неорганические. В следующей работе были использованы хелаты железа с лизином и глутаминовой кислотой (Fe-LG), представляющие собой новую форму комплексных аминокислотных хелатов, которые считаются заменой других разрешенных добавок с железом и не увеличивают содержание железа в окружающей среде (Han M et al., 2022). Fe-LG выполняет несколько функций, связанных с питанием, благодаря железу, лизину и глутаминовой кислоте. Лизин важен для развития мышц и иммунитета у кур. Глутаминовая кислота необходима для биосинтеза глутамина, ключевого нейромедиатора (Konashi S et al., 2000).

В работе Han M с коллегами изучалось влияние высокого содержания железа в рационе в форме Fe-LG на биохимические показатели и экспрессию мРНК переносчиков железа у бройлеров Arbor Acres, а также была поставлена задача определить максимальную дополнительную дозу Fe-LG в рационах бройлеров в качестве пищевой добавки. Хотя железо является необходимым питательным веществом, играющим жизненно важную роль в процессах дыхания, избыток Fe в рационе может негативно сказаться на здоровье бройлеров. Бройлеров кормили базовым рационом из кукурузной и соевой муки или базовым рационом с добавлением 40, 80, 400 или 800 мг Fe/кг в виде Fe-LG в течение шести недель. Масса тела увеличилась в группе, получавшей 80 мг железа на кг массы тела, но уменьшилась в группе, получавшей 800 мг железа на кг массы тела, на 21-й день. В течение от 1 до 21 дней, по сравнению с контрольной группой, добавка 80 мг железа/кг увеличивала среднесуточный привес и среднесуточное потребление корма; однако добавка 800 мг железа/кг снижала среднесуточный привес и увеличивала потребление корма у бройлеров. У бройлеров из группы, получавшей 800 мг железа на кг массы тела, была значительно ниже общая активность супероксиддисмутазы в печени и общая антиоксидантная способность. Концентрация железа в сыворотке крови и печени была повышена в группах, получавших 400 и 800 мг железа/кг, но не изменилась в группах, получавших 40 и 80 мг железа/кг. В группах, получавших Fe-LG, снижалась

экспрессия переносчиков железа в двенадцатиперстной кишке. Авторы работы пришли к выводу, что пищевая добавка с высоким содержанием железа 800 мг/кг у бройлеров приводит к пагубным последствиям для здоровья, вызывая нарушение функции почек и окислительный стресс печени (Han M et al., 2022).

Хелатированные минералы, как было показано выше, все чаще используются в животноводстве (Byrne L et al., 2021; Piskin E et al., 2022). Их перспективность состоит в том, что растущие ограничения на использование антибиотиков создают возможности для более экологичных пищевых добавок, которые также могут повышать продуктивность, но другим способом. Кроме того, хелатированные минералы по-другому участвуют в метаболизме по сравнению с неорганическими источниками, способствуя, помимо прочего, лучшему усвоению минералов и усилению иммунного ответа (McMillen S and Lönnerdal B, 2021). Разработка рационов, ориентированных на детализированное питание, в конечном итоге потребует широкого использования минеральных хелатов, которые можно добавлять в корма для стимулирования определенных реакций у животных (Sarlak S et al., 2021; Лебедев СВ и др., 2023).

В работе Cao J с коллегами было изучено применение кормовой добавки на основе комплекса железа с аминокислотами (Fe-Lys-Glu). Результаты показали, что по сравнению с контрольной группой добавление в рацион от 30 до 75 мг Fe/кг в виде Fe-Lys-Glu значительно увеличило яйценоскость и среднюю массу яйца; у кур, получавших от 45 до 75 мг Fe/кг в виде Fe-Lys-Glu, одновременно наблюдалось значительное снижение коэффициента конверсии корма. Концентрация железа в яичном желтке и сыворотке крови повышалась при увеличении уровня Fe-Lys-Glu, и самое высокое содержание железа было обнаружено в группе, получавшей 75 мг Fe/кг. Кроме того, у кур, получавших 45 мг Fe/кг в виде Fe-Lys-Glu, содержание железа в желтке было выше, чем при той же дозировке FeSO₄. Добавка Fe-Lys-Glu также повышала активность супероксиддисмутазы меди/цинка и снижала содержание малонового диальдегида в сыворотке крови. Таким образом, исследователями было показано, что добавка Fe-Lys-Glu для кур-несушек может заменить FeSO₄, а оптимальный уровень добавки Fe-Lys-Glu составляет 45 мг Fe/кг в рационе кур-несушек (Cao J et al., 2023).

В другой работе также сравнивалось влияние органического (глицина железа [FG]) и неорганического (сульфата железа [FS]) железа в рационе кур-несушек на продуктивность, качество яиц, содержание жиров в сыворотке и яичном желтке, антиоксидантный статус и обогащение яиц железом. На 39-42 неделе в качестве контрольной группы использовался базовый рацион (19 мг железа на кг корма), а в остальные шесть рационов добавляли FS или FG в количестве 30, 60 и 120 мг на кг корма. Добавление FG и FS в рацион улучшило яйценоскость, вес яиц и их качество по сравнению с контрольной группой, хотя прочность яичной скорлупы и содержание кальция в ней также снизились при самом высоком уровне FS. В группах, получавших железо, наблюдались более низкие уровни триглицеридов, общего холестерина и холестерина липопротеидов низкой плотности в сыворотке крови и яичном желтке, что сопровождалось более высокими уровнями холестерина липопротеидов высокой плотности и большей активностью супероксиддисмутазы и глутатионпероксидазы по сравнению с контролем. Содержание железа в сыворотке и яичных фракциях (желтке, белке и скорлупе) постепенно увеличивалось по мере роста уровня железа в рационе, при этом содержание железа при введении FG было выше, чем при FS во всем диапазоне концентраций. Таким образом, FS можно заменить на FG, что более благоприятно скажется на качестве яиц и обогащении их железом (Sarlak S et al., 2021).

Еще одним перспективным источником железа в рационе сельскохозяйственной птицы являются его нанодисперсные формы. Так, в работе Yausheva EV была изучена эффективности производства мяса птицы при использовании наночастиц железа в рационе бройлеров. Наблюдается максимальное увеличение прироста живой массы цыплят до 12 % по сравнению с контрольной группой в первую неделю после введения наночастиц. Отмечалось увеличение значений ряда показателей крови (гемоглобин, общий белок, лейкоциты). Анализ данных о минеральном обмене показал снижение уровня ряда токсичных (As, Pb, Al, Cd) и повышение уровня ряда незаменимых (Mg, Co, Fe, Cu, Na, F) элементов в тканях бройлеров после воздействия наночастиц железа. Данные

результаты показывают более эффективное влияние на метаболические процессы у цыплят наночастиц железа и требуют дальнейшего детального изучения процессов их преобразования в организме бройлеров. Полученный результат показывает возможность использования наночастиц в промышленном производстве кормов для животных (Yausheva EV, 2021).

Существенными проблемами при использовании существующих препаратов железа являются низкая усвояемость и отрицательное взаимодействие с другими компонентами кормов, а также высокая стоимость. Для использования в комбикормах актуальным стоит назвать поиск новых форм железа, характеризующихся высокой усвояемостью, низкой стоимостью и не взаимодействующих с другими компонентами корма, таких как наночастицы.

В настоящий момент внимание к наночастицам микроэлементов приковано по той причине, что реакционная способность наночастиц – значительная и зависит от их физико-химических характеристик, таких как размер, удельная поверхность, фазовое состояние и т. д. (Joudeh N and Linke D, 2022; Yusuf A et al., 2023). С этой точки зрения биологические свойства металлических наночастиц и их применение в кормлении перспективны, но изучены недостаточно. Известно, например, что наночастицы железа обладают биологически активными свойствами, и они менее токсичны, чем неорганические соли железа (Umair M et al., 2016; Baabu PRS et al., 2023). Если максимально переносимая доза (максимальная доза, введение которой группе животных не вызывает гибели) соли железа $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ составляет всего 20 мг/кг, то доза наночастиц железа составляет 1100 мг/кг. Кроме того, наночастицы железа выгодно отличаются от солей пролонгированным действием на биологические объекты. На основе наночастиц железа создано новое поколение биопрепаратов, которые успешно прошли испытания в растениеводстве и животноводстве (Nikonov I et al., 2011).

В работе Nikonov IN с коллегами были использованы наночастицы железа сложного химического состава, содержащие наряду с фазой αFe также оксиды Fe_3O_4 , $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$. Не менее 75 % частиц имели размеры от 7,5 до 20 нм. В ходе работы исследователями изучена возможность использования наночастиц железа в качестве микроэлементных компонентов кормов для птицы. Были изготовлены образцы кормовых добавок на основе измельченного подсолнечного шрота. В состав кормовых добавок входили наночастицы железа в концентрациях 0,3, 0,75, 1,5 и 3,0 г/кг. Испытания кормовых добавок проводились на цыплятах-бройлерах кросса Cobb Avian 48. Результаты испытаний показали, что железо в форме наночастиц не оказывало токсического действия на цыплят-бройлеров. Наночастицы железа не накапливаются в печени – основном депо этого нутриента. Однако процессы накопления наночастиц железа в других органах и тканях требуют дальнейшего изучения. Таким образом, наночастицы железа как действующее вещество кормовых добавок, премиксов и комбикормов благодаря высокой поверхностной активности и проникновению в клетки способны активно влиять на внутриклеточный обмен веществ, стимулируя различные процессы (Nikonov IN et al., 2011).

Известно, что биодоступность металлического железа во многом зависит от способа его извлечения и размера его частиц. Например, введение в рацион цыплят-бройлеров порошков железа (с размером частиц от 50 до 100 мкм) в дозе менее половины по сравнению с сульфатом полностью обеспечивает потребность птиц в микроэлементах. При этом оно оказывает ростостимулирующее действие. Размеры используемых частиц железа не превышали 100 нм. Можно предположить, что именно уменьшение размера частиц приводит к резкому снижению нормы ввода железа в рационы цыплят-бройлеров в 10-50 раз (Nikonov IN et al., 2011).

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют об актуальности использования кормовых добавок на основе наночастиц железа для комбикормовой промышленности и птицеводства.

Это было показано и в работе Киляковой Ю.В. с соавторами, в которой изучалось применение наноконцентра железа (Fe-C) в рационе цыплят-бройлеров. Исследователями было показано положительное влияние на гематологические показатели. В работе зафиксировано увеличение содержания и концентрации гемоглобина в эритроцитах, количества эозинофилов, нейтрофилов,

лимфоцитов, а также повышение количества тромбоцитов. Улучшение этих показателей говорит о позитивном влиянии добавления данного компонента в рацион птиц, что может привести к улучшению их роста, здоровья и продуктивности. Отсутствие патологических нарушений кровообращения также поддерживает вывод о том, что добавка безопасна для применения и может быть полезной для повышения продуктивности птицы. Исследования в этой области необходимо продолжать для получения дополнительных данных о механизмах действия и долгосрочных эффектах использования нанокмпозитов в птицеводстве (Килякова ЮВ и др., 2024).

В работе Almeldin YA с коллегами изучали биодоступность железа в нано-, органических и обычных неорганических формах у бройлеров кросса Ross 308. Экспериментальные диеты включали неорганический премикс, органический премикс и нано-премикс. В качестве органического премикса использовались аминокислотные минералы, включающие Fe (20 %). Размеры наночастиц Fe составили 97 нм. Высокая идеальная усвояемость железа была выше в нано- и органических формах по сравнению с неорганической. Более того, наноминералы показали схожую биодоступность как в органической форме. По сравнению с контролем группы, получавшие нано-Fe в дозировке 20 мг/кг и 40 мг/кг, увеличили массу тела. Кроме того, добавление нанокислота железа в рацион бройлеров улучшило коэффициент конверсии корма на протяжении всего периода эксперимента. Нанокислота железа положительно влиял на потери при варке, влагоудерживающую способность и содержание железа в различных тканях, способствовал повышению выхода мяса и снижению содержания жира в брюшной полости (Almeldin YA et al., 2024).

В то время, как в птицеводстве известно достаточное количество исследований по применению различных форм, в том числе и наночастиц железа, в животноводстве таких исследований проведено недостаточно.

Наряду с традиционными источниками железа, использующимися в качестве дополнительных источников железа, в животноводстве широко изучается применение других соединений железа.

Существует мнение, что добавление солей и хелатов железа в рацион животных (например, поросят), по-видимому, относительно неэффективно (Svoboda M and Pištková K, 2018), за исключением случаев, когда используется значительная доза железа (Maes D et al., 2011). Биодоступность железа, содержащегося в добавках, является основным фактором, определяющим их эффективность в борьбе с анемией. У новорожденных поросят низкая биодоступность неорганического (ионного) железа обусловлена отсутствием переносчиков железа в двенадцатиперстной кишке в первые дни жизни (Lipiński P et al., 2010). По этой причине Mazgaj R с коллегами использовали наночастицы железа (IONP) и соединение Sucrosomial® Iron (SI), которые, как считается, обходят классические пути поглощения железа, и могут быть эффективным средством для лечения дефицита железа у новорожденных поросят. Известно, что IONP могут выступать в качестве потенциальных лекарственных препаратов и/или носителей генов, а также контрастных веществ или гипертермических медиаторов в противораковой терапии (Montiel Schneider MG et al., 2022). Однако о пользе IONP при лечении анемии у животных известно немного. С другой стороны, было показано, что IONP обладают высокой биодоступностью и нетоксичны (Singh K et al., 2022). Сукрозосомальное железо (SI), использованное Mazgaj R с коллегами (2020), представляет собой инновационный пероральный носитель железа, в котором пирофосфат железа защищен бислойной мембраной из фосфолипидов, в основном из подсолнечного лецитина и матрикса суккрестера. Суккрестер – это поверхностно-активное вещество, получаемое в результате этерификации жирных кислот сахарозой, которое, как недавно было доказано, улучшает всасывание благодаря своей способности снижать сопротивление кишечного барьера. Эта формула обеспечивает высокую биодоступность и переносимость не только у грызунов и людей, но и у свиней. Эффективность Si в коррекции дефицита железа подтверждается восстановлением физиологического уровня гемоглобина и была доказана в исследованиях на людях и животных (Parisi F et al., 2017). Mazgaj R с коллегами обнаружили, что пероральное введение наночастиц оксида железа поросятам-сосунам в течение 23 дней подряд приводит к незначительному терапевтическому эффекту по сравнению с введением Sucrosomial® или FeDex, что коррелирует со снижением показателя

телей роста поросят. Хотя введение наночастиц оксида железа, по-видимому, является малотоксичной процедурой как для поросят, так и для их микробиоты, ежедневная доза 6 мг железа, использованная в исследовании, не позволяет применять это соединение в качестве добавки. В свиноводстве даже незначительное снижение суточного привеса в послеродовой период может привести к ощутимым финансовым потерям для заводчиков во время откорма (Mazgaj R et al., 2021).

Наночастицы железа, как уже было показано нами ранее, в питании животных изучаются с точки зрения эффективности роста, использования корма и состояния здоровья (El-Shenawy AM et al., 2019). Наночастицы микро- и макроэлементов чаще всего увеличивают массу тела, среднесуточный привес и улучшают коэффициент конверсии корма (Dumlu B, 2024; Hassan S et al., 2020). Наночастицы металлов используются для удовлетворения потребности животных в элементах, повышения их продуктивности, улучшения микробиологического профиля и иммунного статуса, а также снижения риска заболеваний. Наночастицы железа известны своими антибактериальными свойствами и, таким образом, могут представлять собой альтернативные антибиотикам добавки, способствующие укреплению здоровья и росту. Ряд авторов предложили несколько бактериостатических механизмов, среди которых образование активных форм кислорода, электростатическое взаимодействие, разрушение клеточной мембраны и фрагментация молекул ДНК и белков путем образования свободных радикалов (Saqib S et al., 2019; Zakariya N et al., 2022). Одним из основных механизмов токсичности IONP является образование активных форм кислорода (АФК), в том числе при фотокатализе, реакциях Фентона или аналогичных реакциях. АФК, в свою очередь, оказывают генотоксическое действие, повреждая молекулы ДНК. Повышение концентрации АФК может быть вызвано снижением активности ферментов антиоксидантной системы (СОД, каталазы и глутатионредуктазы). Кроме того, наночастицы IONP нарушают целостность клеточной стенки бактерий, как показано в работе (Gudkov S et al., 2021). Прямое связывание наночастиц IONP с клеточной стенкой золотистого стафилококка было показано с помощью сканирующей электронной микроскопии (Mishra A et al., 2022). IONP могут вызывать снижение экспрессии генов устойчивости к антибиотикам (ARG) у устойчивых к антибиотикам бактерий, обнаруженных в операционных (AlMatar M et al., 2018).

Однако следует помнить, что малый размер наночастиц может влиять на их токсичность, увеличивая клеточное поглощение и перемещение в организме животного. На клеточном уровне наночастицы могут вызывать воспаление или даже гибель клеток. Добавление наночастиц в рацион животных может вызвать патологические изменения в тканях, таких как печень, поджелудочная железа, почки, тонкий кишечник, надпочечники и мозг (Chamorro S et al., 2015). Поэтому для подтверждения безопасности применения наночастиц металлов в питании животных необходимы подробные исследования, чтобы избежать любого вреда для скота, окружающей среды и людей (Michalak I et al., 2022).

Так, в работе Hansen SL с коллегами телята голштинской породы получали 750 мг дополнительного железа на кг сухого вещества (в виде FeSO_4). У телят, получавших с пищей большое количество железа, наблюдалось снижение трансепителиального сопротивления и увеличение потока радиоактивного маннитола от апикальной к базолатеральной поверхности, что говорит о том, что высокое содержание железа повышает проницаемость кишечника. Кормление телят рационом с высоким содержанием железа снизило среднесуточный привес, потребление сухого вещества и эффективность корма. Концентрация гемоглобина и железа в сыворотке крови не изменилась в зависимости от рациона. Высокое содержание элемента в рационе повысило концентрацию железа в печени, но не повлияло на его концентрацию в сердце или двенадцатиперстной кишке. Как показало ПЦР в реальном времени с обратной транскрипцией, относительная экспрессия гена, кодирующего регуляторный гормон железа гепсидин, в печени телят, получавших с пищей большое количество элемента, была в 5 раз выше. Гепсидин высвобождается в ответ на повышение уровня железа и связывается с белком, его экспортирующим, ферропортином, вызывая его разрушение и тем самым снижая усвоение из пищи. Таким образом, кормление телят пищей с высоким содержанием железа вызывало сигнальный каскад (гепсидин), предназначенный для снижения всасывания

микроэлемента (посредством снижения экспрессии белков ферропортина и DMT1) таким же образом, как и у грызунов (Hansen SL et al., 2010).

В работе Шейда Е.В. с соавторами изучалось применение ультрадисперсных частиц (УДЧ) железа как модуляторов метаболической активности при использовании растительных жиров в рационе казахских белоголовых телят в возрасте 8 месяцев. Данные исследования показывают, что добавление УДЧ Fe в рацион с высоким содержанием жиров способствовало значительному повышению усвояемости сырого жира, органических веществ и азотсодержащих экстрактивных веществ, в то время как усвояемость сырой клетчатки и сырого протеина снизилась. Обогащение рациона УДЧ Fe и жирами стимулировало секрецию поджелудочной железы, что привело к увеличению количества сока поджелудочной железы. УДЧ Fe в сочетании с подсолнечным и соевым маслами снижали ферментативную активность поджелудочной железы по сравнению с контрольной группой. Морфологический анализ выявил статистически значимое повышение содержания гемоглобина у телят опытных групп. Биохимический анализ крови подтвердил, что все исследуемые показатели находились в пределах физиологической нормы, однако авторы работы отмечали, что УДЧ Fe оказывал стимулирующее действие на белковый, жировой и углеводный обмен у телят (Шейда Е.В. и др., 2022).

Железо – незаменимый для организмов элемент, который играет важнейшую роль в фундаментальных метаболических процессах, включая кроветворение, перенос кислорода, синтез ДНК, энергетический обмен, перенос электронов в митохондриях, иммунную защиту и когнитивные функции. Железо должно содержаться в организме на соответствующем уровне, необходимом для удовлетворения метаболических потребностей и выполнения специализированных функций, в то время как дефицит железа вызывает анемию, аномальное развитие, а сильный дефицит может привести к смерти. Стратегией по устранению дефицита железа в птицеводстве и животноводстве является добавление железа в корм. Традиционно в рацион добавляют неорганические соли железа, такие, как сульфаты железа. Однако у неорганических источников железа есть несколько недостатков, таких как низкая биодоступность, высокая степень окисления и выведение из организма, что может загрязнять окружающую среду. В результате в качестве замены неорганическому железу используются хелатные соединения или комплексы железа с аминокислотами или белками, органические соединения железа, так как органические микроэлементы обладают более высокой биодоступностью по сравнению с неорганическими микроэлементами. В настоящее время разрабатываются кормовые добавки на основе наночастиц железа, которые, ввиду своих уникальных физико-химических свойств, имеют высокую биодоступность и низкую токсичность. Одним из направлений развития данной отрасли является применение в кормлении наночастиц железа, полученных методом «зеленого синтеза», что позволит их сделать более биодоступными и обеспечить их биодegradацию и меньшую токсичность.

Заключение.

Таким образом, применение новых перспективных источников железа (на основе наночастиц) является многообещающим направлением в кормлении животных, позволяющим избежать дефицита железа в кормах и сформировать полноценный рацион.

Список источников

1. Адаптационные процессы в пищеварительной системе при введении ультрадисперсных частиц железа в жировые рационы крупного рогатого скота / Е.В. Шейда, С.В. Лебедев, С.А. Мирошников, В.В. Гречкина, О.В. Шошина // *Сельскохозяйственная биология*. 2022. Т. 57. № 2. С. 328-342. [Sheida EV, Lebedev SV, Miroshnikov SA, Grechkina VV, Shoshina OV. Adaptive responses of cattle digestive system as influenced by dietary ultrafine iron particles combined with fat diets. *Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]*. 2022;57(2):328-342. (In Russ.)]. doi: 10.15389/agrobiology.2022.2.328rus doi: 10.15389/agrobiology.2022.2.328eng

2. Влияние нанокompозита FE-C на рост и морфологические показатели крови цыплят-бройлеров / Ю.В. Килякова, Е.П. Мирошникова, А.Е. Аринжанов, М.С. Мингазова // Международный вестник ветеринарии. 2024. № 4. С. 231-238. [Kilyakova YV, Miroshnikova EP, Arinzhanov AE, Mingazova MS. Effect of FE-C nanocomposite on growth and morphological blood parameters of broiler chickens. International Journal of Veterinary Medicine. 2024;4:231-238. (In Russ.)]. doi: 10.52419/issn2072-2419.2024.4.231
3. Кван О.В. Эндогенные потери веществ: оптимизация микронутриентной обеспеченности рационов сельскохозяйственных животных (обзор) // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106. № 4. С. 148-163. [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>
4. Сравнительный анализ влияния различных форм железа на течение метаболических процессов в рубце методом «*in vitro*» / С.В. Лебедев, Е.В. Шейда, О.В. Шошина, В.И. Корнейченко // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106, № 1. С. 192-202. [Lebedev SV, Sheyda EV, Shoshina OV, Korneychenko VI. Comparative analysis of the effect of various forms of iron on the course of metabolic processes in rumen using "in vitro" method. Animal Husbandry and Fodder Production. 2023;106(1):192-202. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-1-192>
5. Шошина О.В., Лебедев С.В., Шейда Е.В. Роль железа в пищеварении у полигастрических животных (обзор) // Животноводство и кормопроизводство. 2021. Т. 104. № 4. С. 170-181. [Shoshina OV, Lebedev SV, Sheyda EV. The role of iron in digestion in polygastric animals (review). Animal Husbandry and Fodder Production. 2021;104(4):170-181. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-104-4-170>
6. AlMatar M, Makky EA, Var I, Koksai F. The role of nanoparticles in the inhibition of multidrug-resistant bacteria and biofilms. Current drug delivery. 2018;15(4):470-484. doi: 10.2174/1567201815666171207163504
7. Almeldin YA, Eldlebs hany AE, Elkhalek EA, Lohakare J, Abdel-Wareth AA. Assessment of dietary supplementation of green iron oxide nanoparticles: impact on growth performance, ammonia emissions, carcass criteria, tissue iron content, and meat quality in broiler chickens under hot climate conditions. Frontiers in Veterinary Science. 2024;11:1393335. doi: 10.3389/fvets.2024.1393335
8. Baabu PRS, Kumar HK, Gumpu MB, Babu K J, Kulandaisamy AJ, Rayappan JBB. Iron oxide nanoparticles: a review on the province of its compounds, properties and biological applications. Materials. 2023;16(1):59. doi: 10.3390/ma16010059
9. Balakirev NA, Maksimov VI, Deltsov AA. Development and application of iron supplements, and principles of iron deficiency anemia therapy in fur farming. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021;848(1):012215. doi: 10.1088/1755-1315/848/1/012215
10. Byrne L, Hynes MJ, Connolly CD, Murphy RA. Influence of the chelation process on the stability of organic trace mineral supplements used in animal nutrition. Animals. 2021;11(6):1730. doi: 10.3390/ani11061730
11. Byrne L, Murphy RA. Relative bioavailability of trace minerals in production animal nutrition: a review. Animals. 2022;12(15):1981. doi: 10.3390/ani12151981
12. Cao J, Zhu J, Zhou Q, Zhao L, Zou C, Guo Y, Curtin B, Ji F, Liu B, Yu D. Efficacy evaluation of novel organic iron complexes in laying hens: effects on laying performance, egg quality, egg iron content, and blood biochemical parameters. Animal Bioscience. 2023;36(3):498-505. doi: 10.5713/ab.22.0086
13. Chamorro S, Gutiérrez L, Vaquero MP, Verdoy D, Salas G, Luengo Y, Teran FJ. Safety assessment of chronic oral exposure to iron oxide nanoparticles. Nanotechnology. 2015;26(20):205101. doi: 10.1088/0957-4484/26/20/205101
14. Conrad ME, Umbreit JN. Pathways of iron absorption. Blood Cells, Molecules, and Diseases. 2002;29(3):336-355. doi: 10.1006/bcmd.2002.0564

15. Dumlu B. Importance of nano-sized feed additives in animal nutrition. *Journal of Agricultural Production*. 2024;5(1):55-72. doi: 10.56430/japro.1433614
16. Dutt S, Hamza I, Bartnikas TB. Molecular mechanisms of iron and heme metabolism. *Annual Review of Nutrition*. 2022;42(1):311-335. doi: 10.1146/annurev-nutr-062320-112625
17. EFSA Panel on Additives and Products or Substances used in Animal Feed (FEEDAP). Safety and efficacy of iron compounds (E1) as feed additives for all animal species: ferrous carbonate; ferric chloride, hexahydrate; ferrous fumarate; ferrous sulphate, heptahydrate; ferrous sulphate, monohydrate; ferrous chelate of amino acids, hydrate; ferrous chelate of glycine, hydrate, based on a dossier submitted by FEFANA asbl. *EFSA Journal*. 2016;14(2):4396. doi: 10.2903/j.efsa.2016.4396
18. Ehret WJ, Sandrock KC, Boyazoglu PA. Causes of variation of copper, iron, manganese, zinc and magnesium levels in bovine livers. 3. The effects of locality. *Journal of the South African Veterinary Association*. 1975;46(3):249-255.
19. El-Shenawy AM, Gad DM, Yassin SA. Effect of iron nanoparticles on the development of fish farm feeds. *Alexandria Journal of Veterinary Sciences*. 2019;60(1):102-115. doi: 10.5455/ajvs.281234
20. Gayathri SL, Panda N. Chelated minerals and its effect on animal production: A review. *Agricultural Reviews*. 2018;39(4):314-320.
21. Gudkov SV, Burmistrov DE, Serov DA, Rebezov MB, Semenova AA, Lisitsyn AB. Do iron oxide nanoparticles have significant antibacterial properties? *Antibiotics*. 2021;10(7):884. doi: 10.3390/antibiotics10070884
22. Han M, Fu X, Xin X, Dong Y, Miao Z, Li J. High dietary organic iron supplementation decreases growth performance and induces oxidative stress in broilers. *Animals*. 2022;12(13):1604. doi: 10.3390/ani12131604
23. Hansen SL, Ashwell MS, Moeser AJ, Fry RS, Knutson MD, Spears JW. High dietary iron reduces transporters involved in iron and manganese metabolism and increases intestinal permeability in calves. *Journal of Dairy Science*. 2010;93(2):656-665. doi:10.3168/jds.2009-2341
24. Hassan S, Hassan F, Rehman MS. Nano-particles of trace minerals in poultry nutrition: potential applications and future prospects. *Biological Trace Element Research*. 2020;195:591-612. doi: 10.1007/s12011-019-01862-9
25. Huang J, Jones A, Waite TD, Chen Y, Huang X, Rosso KM, Kappler A, Mansor M, Tratnyek PG, Zhang H. Fe (II) redox chemistry in the environment. *Chemical Reviews*. 2021;121(13):8161-8233. doi: 10.1021/acs.chemrev.0c01286
26. Jarosz Ł, Marek A, Grądzki Z, Kwiecień M. Effects of dietary supplementation of iron as sulphates or glycine chelates on the productive performance and concentrations of acute-phase proteins and iron in the serum and liver tissues of broiler chickens. *Annals of Animal Science*. 2021;21(1):267-290. doi: 10.2478/aoas-2020-0069
27. Joudeh N, Linke D. Nanoparticle classification, physicochemical properties, characterization, and applications: a comprehensive review for biologists. *Journal of Nanobiotechnology*. 2022;20(1):262. doi: 10.1186/s12951-022-01477-8
28. Konashi S, Takahashi K, Akiba Y. Effects of dietary essential amino acid deficiencies on immunological variables in broiler chickens. *British Journal of Nutrition*. 2000;83(4):449-456.
29. Lipiński P, Starzyński RR, Canonne-Hergaux F, Tudek B, Oliński R, Kowalczyk P, Zabielski R. Benefits and risks of iron supplementation in anemic neonatal pigs. *The American Journal of Pathology*. 2010;177(3):1233-1243. doi: 10.2353/ajpath.2010.091020
30. Maes D, Steyaert M, Vanderhaeghe C, López Rodríguez A, de Jong E, del Pozo Sacristán R, Vangroenweghe F, Dewulf J. Comparison of oral versus parenteral iron supplementation on the health and productivity of piglets. *Veterinary Record*. 2011;168(7):188. doi: 10.1136/vr.c7033
31. Maji C, Biswas S, Kaur J. Nutritional deficiency diseases in goats. In: Tanmoy Rana, editor. *Principles of Goat Disease and Prevention*. 2023;17:221-236. doi: 10.1002/9781119896142.ch17

32. Mazgaj R, Lipiński P, Szudzik M, Jończy A, Kopeć Z, Stankiewicz AM, Kamyczek M, Swinkels D, Żelazowska B, Starzyński RR. Comparative evaluation of sucrosomial iron and iron oxide nanoparticles as oral supplements in iron deficiency anemia in piglets. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(18):9930. doi: 10.3390/ijms22189930
33. Mazgaj R, Szudzik M, Lipiński P, Jończy A, Smuda E, Kamyczek M, Cieślak B, Swinkels D, Lenartowicz M, Starzyński RR. Effect of oral supplementation of healthy pregnant sows with sucrosomial ferric pyrophosphate on maternal iron status and hepatic iron stores in newborn piglets. *Animals*. 2020;10(7):1113. doi: 10.3390/ani10071113
34. McMillen S, Lönnerdal B. Postnatal iron supplementation with ferrous sulfate vs. ferrous bis-glycinate chelate: Effects on iron metabolism, growth, and central nervous system development in sprague dawley rat pups. *Nutrients*. 2021;13(5):1406. doi: 10.3390/nu13051406
35. Michalak I, Dziergowska K, Alagawany M, Farag MR, El-Shall NA, Tuli HS, Dhama K. The effect of metal-containing nanoparticles on the health, performance and production of livestock animals and poultry. *Veterinary Quarterly*. 2022;42(1):68-94. doi: 10.1080/01652176.2022.2073399
36. 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. *Journal of Dairy Science*. 2022;105(8):6693-6709. doi: 10.3168/jds.2022-21908
37. Mishra A, Pradhan D, Halder J, Biswasroy P, Rai VK, Dubey D, Rath G. Metal nanoparticles against multi-drug-resistance bacteria. *Journal of Inorganic Biochemistry*. 2022;237:111938. doi: 10.1016/j.jinorgbio.2022.111938
38. Montiel Schneider MG, Martín MJ, Otarola J, Vakarelska E, Simeonov V, Lassalle V, Nedyalkova M. Biomedical applications of iron oxide nanoparticles: Current insights progress and perspectives. *Pharmaceutics*. 2022;14(1):204. doi: 10.3390/pharmaceutics14010204
39. Nikonov IN, Folmanis YuG, Folmanis GE, Kovalenko LV, Laptev Gyu, Egorov IA, Fisinin VI, Tananaev IG. NIron nanoparticles as a food additive for poultry. *Doklady Biological Sciences*. 2011;440(1):328-331. doi: 10.1134/S0012496611050188
40. Olowoyeye JC. Requirement, dietary sources, and efficiency of absorption of major minerals by farm animals: From an educational perspective. *Indonesian Journal of Teaching in Science*. 2022;2(1):93-98.
41. Parisi F, Berti C, Mandò, C, Martinelli A, Mazzali C, Cetin I. Effects of different regimens of iron prophylaxis on maternal iron status and pregnancy outcome: A randomized control trial. *The Journal of Maternal-Fetal & Neonatal Medicine*. 2017;30(15):1787-1792. doi: 10.1080/14767058.2016.1224841
42. Phipps O, Brookes MJ, Al-Hassi HO. Iron deficiency, immunology, and colorectal cancer. *Nutrition Reviews*. 2021;79(1):88-97. doi: 10.1093/nutrit/nuaa040
43. Piskin E, Cianciosi D, Gulec S, Tomas M, Capanoglu E. Iron absorption: factors, limitations, and improvement methods. *ACS omega*. 2022;7(24):20441-20456. doi: 10.1021/acsomega.2c01833
44. Radwinska J, Zarczynska K. Effects of mineral deficiency on the health of young ruminants. *Journal of Elementology*. 2014;19(3):915-928. doi: 10.5601/jelem.2014.19.2.620
45. Saqib S, Munis MFH, Zaman W, Ullah F, Shah SN, Ayaz A, Bahadur S. Synthesis, characterization and use of iron oxide nano particles for antibacterial activity. *Microscopy Research and Technique*. 2019;82(4):415-420. doi: 10.1002/jemt.23182
46. Sarlak S, Tabeidian SA, Toghyani M, Shahraki ADF, Goli M, Habibian M. Effects of replacing inorganic with organic iron on performance, egg quality, serum and egg yolk lipids, antioxidant status, and iron accumulation in eggs of laying hens. *Biological Trace Element Research*. 2021;199(5):1986-1999. doi: 10.1007/s12011-020-02284-8
47. Sil R, Chakraborti AS. Major heme proteins hemoglobin and myoglobin with respect to their roles in oxidative stress—a brief review. *Frontiers in Chemistry*. 2025;13:1543455. doi: 10.3389/fchem.2025.1543455

48. Singh K, Chopra DS, Singh D, Singh N. Nano-formulations in treatment of iron deficiency anaemia: an overview. *Clinical Nutrition ESPEN*. 2022;52:12-19. doi: 10.1016/j.clnesp.2022.08.032
49. Srole DN, Ganz T. Erythroferrone structure, function, and physiology: Iron homeostasis and beyond. *Journal of Cellular Physiology*. 2021;236(7): 4888-4901. doi: 10.1002/jcp.30247
50. Svoboda M, Pišťková K. Oral iron administration in suckling piglets—a review. *Acta Veterinaria Brno*. 2018;87(1):77-83. doi: 10.2754/avb201887010077
51. Taschetto D, Vieira SL, Angel CR, Stefanello C, Kindlein L, Ebbing MA, Simões CT. Iron requirements of broiler breeder hens. *Poultry Science*. 2017;96(11):3920-3927. doi: 10.3382/ps/pex208
52. Umair M, Javed I, Rehman M, Madni A, Javeed A, Ghafoor A, Ashraf M. Nanotoxicity of inert materials: the case of gold, silver and iron. *Journal of Pharmacy & Pharmaceutical Sciences*. 2016;19(2):161-180. doi: 10.18433/J31021
53. Vogt A, Arsiwala T, Mohsen M, Vogel M, Manolova V, Bachmann MF. On iron metabolism and its regulation. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(9):4591. doi: 10.3390/ijms22094591
54. Yausheva EV. Increasing efficiency in the poultry meat production when using iron and copper nanoparticles in nutrition. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;624(1):012046. doi: 10.1088/1755-1315/624/1/012046
55. Yusuf A, Almotairy ARZ, Henidi H, Alshehri OY, Aldughaim MS. Nanoparticles as drug delivery systems: a review of the implication of nanoparticles' physicochemical properties on responses in biological systems. *Polymers*. 2023;15(7):1596. doi: 10.3390/polym15071596
56. Zafar MH, Fatima M. Efficiency comparison of organic and inorganic minerals in poultry nutrition: a review. *PSM Veterinary Research*. 2018;3(2):53-59.
57. Zakariya NA, Majeed S, Jusof WHW. Investigation of antioxidant and antibacterial activity of iron oxide nanoparticles (IONPS) synthesized from the aqueous extract of *Penicillium* spp. *Sensors International*. 2022;3:100164. doi: 10.1016/j.sintl.2022.100164
58. Zeng Q, Liu Y, Sun J, Jin Y. Providing new insights on the molecular properties and thermal stability of ovotransferrin and lactoferrin. *Foods*. 2023;12(3):532. doi: 10.3390/foods12030532

References

1. Sheida EV, Lebedev SV, Miroshnikov SA, Grechkina VV, Shoshina OV. Adaptive responses of cattle digestive system as influenced by dietary ultrafine iron particles combined with fat diets. *Agricultural Biology*. 2022;57(2):328-342. doi: 10.15389/agrobiol.2022.2.328eng
2. Kilyakova YV, Miroshnikova EP, Arinzhanov AE, Mingazova MS. Effect of FE-C nanocomposite on growth and morphological blood parameters of broiler chickens. *International Journal of Veterinary Medicine*. 2024;4:231-238. doi: 10.52419/issn2072-2419.2024.4.231
3. 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. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-4-148>
4. Lebedev SV, Sheyda EV, Shoshina OV, Korneychenko VI. Comparative analysis of the effect of various forms of iron on the course of metabolic processes in rumen using "in vitro" method. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023;106(1):192-202. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-106-1-192>
5. Shoshina OV, Lebedev SV, Sheyda EV. The role of iron in digestion in polygastric animals (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2021;104(4):170-181. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-104-4-170>
6. AlMatar M, Makky EA, Var I, Koksai F. The role of nanoparticles in the inhibition of multidrug-resistant bacteria and biofilms. *Current drug delivery*. 2018;15(4):470-484. doi: 10.2174/1567201815666171207163504

7. Almeldin YA, Eldlebs hany AE, Elkhalek EA, Lohakare J, Abdel-Wareth AA. Assessment of dietary supplementation of green iron oxide nanoparticles: impact on growth performance, ammonia emissions, carcass criteria, tissue iron content, and meat quality in broiler chickens under hot climate conditions. *Frontiers in Veterinary Science*. 2024;11:1393335. doi: 10.3389/fvets.2024.1393335
8. Baabu PRS, Kumar HK, Gumpu MB, Babu K J, Kulandaisamy AJ, Rayappan JBB. Iron oxide nanoparticles: a review on the province of its compounds, properties and biological applications. *Materials*. 2023;16(1):59. doi: 10.3390/ma16010059
9. Balakirev NA, Maksimov VI, Deltsov AA. Development and application of iron supplements, and principles of iron deficiency anemia therapy in fur farming. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;848(1):012215. doi: 10.1088/1755-1315/848/1/012215
10. Byrne L, Hynes MJ, Connolly CD, Murphy RA. Influence of the chelation process on the stability of organic trace mineral supplements used in animal nutrition. *Animals*. 2021;11(6):1730. doi: 10.3390/ani11061730
11. Byrne L, Murphy RA. Relative bioavailability of trace minerals in production animal nutrition: a review. *Animals*. 2022;12(15):1981. doi: 10.3390/ani12151981
12. Cao J, Zhu J, Zhou Q, Zhao L, Zou C, Guo Y, Curtin B, Ji F, Liu B, Yu D. Efficacy evaluation of novel organic iron complexes in laying hens: effects on laying performance, egg quality, egg iron content, and blood biochemical parameters. *Animal Bioscience*. 2023;36(3):498-505. doi: 10.5713/ab.22.0086
13. Chamorro S, Gutiérrez L, Vaquero MP, Verdoy D, Salas G, Luengo Y, Teran FJ. Safety assessment of chronic oral exposure to iron oxide nanoparticles. *Nanotechnology*. 2015;26(20):205101. doi: 10.1088/0957-4484/26/20/205101
14. Conrad ME, Umbreit JN. Pathways of iron absorption. *Blood Cells, Molecules, and Diseases*. 2002;29(3):336-355. doi: 10.1006/bcmd.2002.0564
15. Dumlu B. Importance of nano-sized feed additives in animal nutrition. *Journal of Agricultural Production*. 2024;5(1):55-72. doi: 10.56430/japro.1433614
16. Dutt S, Hamza I, Bartnikas TB. Molecular mechanisms of iron and heme metabolism. *Annual Review of Nutrition*. 2022;42(1):311-335. doi: 10.1146/annurev-nutr-062320-112625
17. EFSA Panel on Additives and Products or Substances used in Animal Feed (FEEDAP). Safety and efficacy of iron compounds (E1) as feed additives for all animal species: ferrous carbonate; ferric chloride, hexahydrate; ferrous fumarate; ferrous sulphate, heptahydrate; ferrous sulphate, monohydrate; ferrous chelate of amino acids, hydrate; ferrous chelate of glycine, hydrate, based on a dossier submitted by FEFANA asbl. *EFSA Journal*. 2016;14(2):4396. doi: 10.2903/j.efsa.2016.4396
18. Ehret WJ, Sandrock KC, Boyazoglu PA. Causes of variation of copper, iron, manganese, zinc and magnesium levels in bovine livers. 3. The effects of locality. *Journal of the South African Veterinary Association*. 1975;46(3):249-255.
19. El-Shenawy AM, Gad DM, Yassin SA. Effect of iron nanoparticles on the development of fish farm feeds. *Alexandria Journal of Veterinary Sciences*. 2019;60(1):102-115. doi: 10.5455/ajvs.281234
20. Gayathri SL, Panda N. Chelated minerals and its effect on animal production: A review. *Agricultural Reviews*. 2018;39(4):314-320.
21. Gudkov SV, Burmistrov DE, Serov DA, Rebezov MB, Semenova AA, Lisitsyn AB. Do iron oxide nanoparticles have significant antibacterial properties? *Antibiotics*. 2021;10(7):884. doi: 10.3390/antibiotics10070884
22. Han M, Fu X, Xin X, Dong Y, Miao Z, Li J. High dietary organic iron supplementation decreases growth performance and induces oxidative stress in broilers. *Animals*. 2022;12(13):1604. doi: 10.3390/ani12131604
23. Hansen SL, Ashwell MS, Moeser AJ, Fry RS, Knutson MD, Spears JW. High dietary iron reduces transporters involved in iron and manganese metabolism and increases intestinal permeability in calves. *Journal of Dairy Science*. 2010;93(2):656-665. doi:10.3168/jds.2009-2341

24. Hassan S, Hassan F, Rehman MS. Nano-particles of trace minerals in poultry nutrition: potential applications and future prospects. *Biological Trace Element Research*. 2020;195:591-612. doi: 10.1007/s12011-019-01862-9
25. Huang J, Jones A, Waite TD, Chen Y, Huang X, Rosso KM, Kappler A, Mansor M, Tratnyek PG, Zhang H. Fe (II) redox chemistry in the environment. *Chemical Reviews*. 2021;121(13):8161-8233. doi: 10.1021/acs.chemrev.0c01286
26. Jarosz Ł, Marek A, Grądzki Z, Kwiecień M. Effects of dietary supplementation of iron as sulphates or glycine chelates on the productive performance and concentrations of acute-phase proteins and iron in the serum and liver tissues of broiler chickens. *Annals of Animal Science*. 2021;21(1):267-290. doi: 10.2478/aoas-2020-0069
27. Joudeh N, Linke D. Nanoparticle classification, physicochemical properties, characterization, and applications: a comprehensive review for biologists. *Journal of Nanobiotechnology*. 2022;20(1):262. doi: 10.1186/s12951-022-01477-8
28. Konashi S, Takahashi K, Akiba Y. Effects of dietary essential amino acid deficiencies on immunological variables in broiler chickens. *British Journal of Nutrition*. 2000;83(4):449-456.
29. Lipiński P, Starzyński RR, Canonne-Hergaux F, Tudek B, Oliński R, Kowalczyk P, Zabielski R. Benefits and risks of iron supplementation in anemic neonatal pigs. *The American Journal of Pathology*. 2010;177(3):1233-1243. doi: 10.2353/ajpath.2010.091020
30. Maes D, Steyaert M, Vanderhaeghe C, López Rodríguez A, de Jong E, del Pozo Sacristán R, Vangroenweghe F, Dewulf J. Comparison of oral versus parenteral iron supplementation on the health and productivity of piglets. *Veterinary Record*. 2011;168(7):188. doi: 10.1136/vr.c7033
31. Maji C, Biswas S, Kaur J. Nutritional deficiency diseases in goats. In: Tanmoy Rana, editor. *Principles of Goat Disease and Prevention*. 2023;17:221-236. doi: 10.1002/9781119896142.ch17
32. Mazgaj R, Lipiński P, Szudzik M, Jończy A, Kopeć Z, Stankiewicz AM, Kamyczek M, Swinkels D, Żelazowska B, Starzyński RR. Comparative evaluation of sucrosomial iron and iron oxide nanoparticles as oral supplements in iron deficiency anemia in piglets. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(18):9930. doi: 10.3390/ijms22189930
33. Mazgaj R, Szudzik M, Lipiński P, Jończy A, Smuda E, Kamyczek M, Cieślak B, Swinkels D, Lenartowicz M, Starzyński RR. Effect of oral supplementation of healthy pregnant sows with sucrosomial ferric pyrophosphate on maternal iron status and hepatic iron stores in newborn piglets. *Animals*. 2020;10(7):1113. doi: 10.3390/ani10071113
34. McMillen S, Lönnerdal B. Postnatal iron supplementation with ferrous sulfate vs. ferrous bis-glycinate chelate: Effects on iron metabolism, growth, and central nervous system development in sprague dawley rat pups. *Nutrients*. 2021;13(5):1406. doi: 10.3390/nu13051406
35. Michalak I, Dziergowska K, Alagawany M, Farag MR, El-Shall NA, Tuli HS, Dhama K. The effect of metal-containing nanoparticles on the health, performance and production of livestock animals and poultry. *Veterinary Quarterly*. 2022;42(1):68-94. doi: 10.1080/01652176.2022.2073399
36. 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. *Journal of Dairy Science*. 2022;105(8):6693-6709. doi: 10.3168/jds.2022-21908
37. Mishra A, Pradhan D, Halder J, Biswasroy P, Rai VK, Dubey D, Rath G. Metal nanoparticles against multi-drug-resistance bacteria. *Journal of Inorganic Biochemistry*. 2022;237:111938. doi: 10.1016/j.jinorgbio.2022.111938
38. Montiel Schneider MG, Martín MJ, Otarola J, Vakarelska E, Simeonov V, Lassalle V, Nedyalkova M. Biomedical applications of iron oxide nanoparticles: Current insights progress and perspectives. *Pharmaceutics*. 2022;14(1):204. doi: 10.3390/pharmaceutics14010204
39. Nikonov IN, Folmanis YuG, Folmanis GE, Kovalenko LV, Laptev Gyu, Egorov IA, Fisinin VI, Tananaev IG. Iron nanoparticles as a food additive for poultry. *Doklady Biological Sciences*. 2011;440(1):328-331. doi: 10.1134/S0012496611050188

40. Olowoyeye JC. Requirement, dietary sources, and efficiency of absorption of major minerals by farm animals: From an educational perspective. *Indonesian Journal of Teaching in Science*. 2022;2(1):93-98.
41. Parisi F, Berti C, Mandò, C, Martinelli A, Mazzali C, Cetin I. Effects of different regimens of iron prophylaxis on maternal iron status and pregnancy outcome: A randomized control trial. *The Journal of Maternal-Fetal & Neonatal Medicine*. 2017;30(15):1787-1792. doi: 10.1080/14767058.2016.1224841
42. Phipps O, Brookes MJ, Al-Hassi HO. Iron deficiency, immunology, and colorectal cancer. *Nutrition Reviews*. 2021;79(1):88-97. doi: 10.1093/nutrit/nuaa040
43. Piskin E, Cianciosi D, Gulec S, Tomas M, Capanoglu E. Iron absorption: factors, limitations, and improvement methods. *ACS omega*. 2022;7(24):20441-20456. doi: 10.1021/acsomega.2c01833
44. Radwinska J, Zarczynska K. Effects of mineral deficiency on the health of young ruminants. *Journal of Elementology*. 2014;19(3):915-928. doi: 10.5601/jelem.2014.19.2.620
45. Saqib S, Munis MFH, Zaman W, Ullah F, Shah SN, Ayaz A, Bahadur S. Synthesis, characterization and use of iron oxide nano particles for antibacterial activity. *Microscopy Research and Technique*. 2019;82(4):415-420. doi: 10.1002/jemt.23182
46. Sarlak S, Tabeidian SA, Toghyani M, Shahraki ADF, Goli M, Habibian M. Effects of replacing inorganic with organic iron on performance, egg quality, serum and egg yolk lipids, antioxidant status, and iron accumulation in eggs of laying hens. *Biological Trace Element Research*. 2021;199(5):1986-1999. doi: 10.1007/s12011-020-02284-8
47. Sil R, Chakraborti AS. Major heme proteins hemoglobin and myoglobin with respect to their roles in oxidative stress—a brief review. *Frontiers in Chemistry*. 2025;13:1543455. doi: 10.3389/fchem.2025.1543455
48. Singh K, Chopra DS, Singh D, Singh N. Nano-formulations in treatment of iron deficiency anaemia: an overview. *Clinical Nutrition ESPEN*. 2022;52:12-19. doi: 10.1016/j.clnesp.2022.08.032
49. Srole DN, Ganz T. Erythroferrone structure, function, and physiology: Iron homeostasis and beyond. *Journal of Cellular Physiology*. 2021;236(7): 4888-4901. doi: 10.1002/jcp.30247
50. Svoboda M, Pišťková K. Oral iron administration in suckling piglets—a review. *Acta Veterinaria Brno*. 2018;87(1):77-83. doi: 10.2754/avb201887010077
51. Taschetto D, Vieira SL, Angel CR, Stefanello C, Kindlein L, Ebbing MA, Simões CT. Iron requirements of broiler breeder hens. *Poultry Science*. 2017;96(11):3920-3927. doi: 10.3382/ps/pex208
52. Umair M, Javed I, Rehman M, Madni A, Javeed A, Ghafoor A, Ashraf M. Nanotoxicity of inert materials: the case of gold, silver and iron. *Journal of Pharmacy & Pharmaceutical Sciences*. 2016;19(2):161-180. doi:10.18433/J31021
53. Vogt A, Arsiwala T, Mohsen M, Vogel M, Manolova V, Bachmann MF. On iron metabolism and its regulation. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(9):4591. doi: 10.3390/ijms22094591
54. Yausheva EV. Increasing efficiency in the poultry meat production when using iron and copper nanoparticles in nutrition. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;624(1):012046. doi: 10.1088/1755-1315/624/1/012046
55. Yusuf A, Almotairy ARZ, Henidi H, Alshehri OY, Aldughaim MS. Nanoparticles as drug delivery systems: a review of the implication of nanoparticles' physicochemical properties on responses in biological systems. *Polymers*. 2023;15(7):1596. doi: 10.3390/polym15071596
56. Zafar MH, Fatima M. Efficiency comparison of organic and inorganic minerals in poultry nutrition: a review. *PSM Veterinary Research*. 2018;3(2):53-59.
57. Zakariya NA, Majeed S, Jusof WHW. Investigation of antioxidant and antibacterial activity of iron oxide nanoparticles (IONPS) synthesized from the aqueous extract of *Penicillium* spp. *Sensors International*. 2022;3:100164. doi: 10.1016/j.sintl.2022.100164

58. Zeng Q, Liu Y, Sun J, Jin Y. Providing new insights on the molecular properties and thermal stability of ovotransferrin and lactoferrin. *Foods*. 2023;12(3):532. doi: 10.3390/foods12030532

Информация об авторах:

Оксана Васильевна Баранова, кандидат биологических наук, доцент, директор Института биоэлементологии, Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13, сот.: 8-950-189-89-01.

Елена Викторовна Кияева, кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник Института биоэлементологии, Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13, сот.: 8-903-362-61-82.

Светлана Викторовна Нотова, доктор медицинских наук, профессор кафедры биохимии и микробиологии, Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13, сот.: 8-903-367-03-70.

Information about the authors:

Oksana V Baranova, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Director of Institute of Bioelementology, Orenburg State University, 13 Pobedy Ave, Orenburg, 460018, tel.: 8-950-189-89-01.

Elena V Kiyaeva, Cand. Sci. (Medicine), Senior Researcher, Institute of Bioelementology, Orenburg State University, 13 Pobedy Ave, Orenburg, 460018, tel.: 8-903-362-61-82.

Svetlana V Notova, Dr. Sci. (Medicine), Professor of the Department of Biochemistry and Microbiology, Orenburg State University, 13 Pobedy Ave, Orenburg, 460018, tel.: 8-903-367-03-70.

Статья поступила в редакцию 15.05.2025; одобрена после рецензирования 19.06.2025; принята к публикации 15.12.2025.

The article was submitted 15.05.2025; approved after reviewing 19.06.2025; accepted for publication 15.12.2025.