

ПРОБЛЕМНАЯ СТАТЬЯ

**УЛЬТРАДИСПЕРСНЫЕ ЧАСТИЦЫ ЖЕЛЕЗА
В ЖИВОТНОВОДСТВЕ (ОБЗОР)****Н.В. Гарипова*, В.А. Рязанов**ФГБНУ ФНЦ Биологических систем и агротехнологий РАН,
Российская Федерация, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29

РЕЗЮМЕ. Нанотехнологии привлекают большой интерес исследователей. Бурное развитие нанотехнологий в последние десятилетия обусловлены тем, что ультрадисперсные частицы, в том числе металлов, обладают совершенно иными свойствами, чем традиционные формы химических элементов. В настоящее время особенно перспективным выглядит применение ультрадисперсных частиц металлов в области сельского хозяйства. Достоинство новых форм микроэлементов состоит в том, что с их помощью возможно преодолеть негативные эффекты, присущие традиционным формам. Так, традиционным формам элементов присущи невысокая усвояемость в организме и вероятность развития окислительного стресса у животных, поэтому при составлении рационов животных и птицы необходимо тщательно подбирать дозы элементов во избежание их токсического действия. Всё это послужило толчком для изучения применения ультрадисперсных частиц как источников микроэлементов в рационе сельскохозяйственных животных. Данный обзор посвящен применению ультрадисперсных частиц железа в качестве кормовой добавки в рационах сельскохозяйственных животных и птицы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ультрадисперсные частицы, микроэлементы, железо, продуктивность, сельскохозяйственные животные, цыплята-бройлеры.

ВВЕДЕНИЕ

В течение длительного времени единственным источником минеральных веществ, необходимых для животных, оставались минеральные формы химических элементов. Такие вещества имеют ряд негативных свойств: малый процент усвояемости, проявление токсичности при превышении норм, способность приводить к образованию активных форм кислорода (Богословская, 2009; Сизова, Мирошников 2018; Евстропов и др., 2020; Лебедева и др., 2021; Красочко и др., 2021). Поэтому ученые всё чаще обращают свое внимание на новые, наноразмерные (ультрадисперсные) формы металлов (Короткова и др., 2017; Полищук и др., 2019; Medina-Reyes et al., 2020).

В настоящее время с каждым годом увеличивается число научных источников, посвященных применению ультрадисперсных частиц (УДЧ) в сельском хозяйстве, а именно в кормлении животных и птицы. В тоже время наличие противоречий в наблюдаемых эффектах УДЧ, различных по своим физико-химическим свойствам, требует более пристального отношения к проведению практических исследований и выяв-

лению всего спектра и условий проявления биологических свойств новых источников химических элементов (Яушева и др., 2015; Singh et al., 2021). Поэтому исследования проводятся на различных биологических тест-системах.

В исследовании О.А. Богословской с соавторами (2009) продемонстрировано, что УДЧ железа, которые отличны друг от друга по физико-химическим параметрам, могут проявлять разные биологические свойства. Ультрадисперсные частицы железа использовались для изучения динамики тушения бактериальной биолюминесценции, а также для внесения в рацион цыплят-бройлеров.

В процессе исследований УДЧ железа с размером 50 и 80 нм зафиксировано, что данные химические элементы при внесении в живые объекты показывали разные биологические эффекты, что проявлялось в динамике свечения люминесцентных бактерий, а также при изучении темпов роста и развития сельскохозяйственной птицы. При этом интересно, что применение биолюминесцентного метода тестирования позволяет прогнозировать возможные эффекты УДЧ

* Адрес для переписки:
Гарипова Наталия Викторовна
E-mail: profnat27@mail.ru

при внесении в рацион животным и птице (Mohajerani et al., 2019).

Однако, дискутируя о возможности применения УДЧ необходимых микроэлементов в кормлении, следует принять во внимание тот факт, что необходимо изучать их с позиции безопасности применения и с учетом более высокой усвояемости, чем минеральные аналоги (Sengul et al., 2020; Patra et al., 2020).

Ультрадисперсные частицы различных химических элементов продолжают оставаться наиболее перспективными источниками микроэлементов в сельском хозяйстве и других сферах науки и техники (Hassan et al., 2020).

Имеются сведения о безопасности применения некоторых УДЧ с определенными параметрами, в том числе и в сельском хозяйстве (Cattò et al., 2019). В то же время данный вопрос является предметом для более углубленного рассмотрения (концентрация вещества, способ введения, длительность применения и др.).

Анализируя научные источники, можно сделать вывод о том, что накапливаются данные, освещающие вопросы использования УДЧ металлов в практике специалистов в животноводстве (Gangadoo et al., 2020). Пристальное внимание и изучение широкого круга вопросов, связанных с применением УДЧ в сельском хозяйстве, обусловлено рядом аспектов: УДЧ металлов вызывают меньшие токсические эффекты, чем их минеральные аналоги (Sizova et al., 2015); показано их успешное применение в комплексе с другими УДЧ и веществами различной природы (Robinson, 1990); отмечена повышенная биодоступность микроэлементов из частиц ультрадисперсной размерности (Congrad et al., 2000). Поэтому выбор источника железа в качестве УДЧ является обоснованным и перспективным для применения в области животноводства и птицеводства (López et al., 2004).

Внимание к железу как необходимому химическому элементу обусловлено его значимостью для полноценного роста и развития живого организма. Интенсивные процессы выращивания птицы требуют наличия сбалансированного рациона, в котором обязательно должно нормироваться содержание макро- и микроэлементов, в том числе и железа (Finch et al., 1978). Правильное и эффективное нормирование рациона по микроэлементам есть залог высокой продуктивности животноводства.

Микроэлементы необходимы для того, чтобы поддерживать жизнедеятельность организма

на уровне нормы, участвовать в различных физиологических процессах, протекающих в организме и т.д.

Ц е л ь р а б о т ы – анализ и обобщение имеющихся научных данных по проблеме применения ультрадисперсных частиц железа в качестве кормовой добавки в рационах сельскохозяйственных животных и птицы.

ЗНАЧЕНИЕ ЖЕЛЕЗА В ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЖИВОГО ОРГАНИЗМА

Чаще всего железо в теле представлено его трехвалентной формой. Железо бывает геминное и негеминное. В геминном виде при нахождении железа в белках содержится еще и гемм, который представляет собой железопорфириновый комплекс. Это белки, переносящие кислород (гемоглобин, миоглобин) и гемсодержащие ферменты процесса дыхания (пероксидаза, каталаза, цитохромы). Негеминное железо делится на резервное (служит для образования новых клеток крови) и паренхиматозное (обнаруживается чаще всего в мускулах). Запасные резервы железа находятся в печени и в селезенке и могут содержать до одной седьмой всего железа в теле (Liu, 2006; Mohajerani et al., 2019).

В крови животных железо находится в связи с протеинами (трансферритин, сидерфин, гаптоглобин). В составе белка гемоглобина содержится до 0,3% железа, он переносит кислород; белок сидерфин необходим для доставки железа к клеткам. Запасными белками, в состав которых входит железо, являются ферритин и гемосидерин. В них содержится от 20 до 35% железа соответственно. Данные белки служат для депонирования железа и его высвобождения в случае необходимости. При этом биодоступность железа из его соединений с остатками фосфора и фосфорной кислоты, оксидов, солей углекислоты крайне мала (Степанова и др., 2015).

В течении всей жизни содержание железа в организме живых существ неодинаково. Например, в ранний период содержание железа подвержено значительным перепадам; при взрослении такие колебания прекращаются, уровень железа приобретает постоянные значения. Всасывание железа регулируется паренхимой селезенки, печени, слизистой ЖКТ, а также кроветворной системой. Из организма железо выводится посредством работы почек, желчного пузыря и кишечника. Больше всего запасов железа в органах кроветворения, так как оно входит в состав красных клеток крови (Кван и др., 2021).

Если в теле животного наблюдается нехватка микроэлемента, то могут возникнуть нарушения в опорно-двигательном аппарате, перебои в работе сердца. Если же в кровяном русле недостаточно белка-переносчика, отмечаются проблемы в функционировании ЖКТ, гипоальбуминемия, замедляется рост и развитие, уменьшается активность ферментов аэробной дыхательной цепи в митохондриях (Raje et al., 2018).

Поскольку в этой связи обеспечение организма сельскохозяйственных животных и птицы является первостепенной задачей, актуально и изучение вопросов применения новых источников данного микроэлемента. Ультрадисперсные частицы являются наиболее перспективными в данном отношении, так как им присущи уникальные биологические свойства, что обусловлено физико-химическими свойствами УДЧ. Прежде всего, это размер в области нанометрового диапазона (от 1 до 100 нм в среднем) и большое отношение поверхности к объему, что обуславливает высокую способность к реакциям с различными веществами.

Большое число исследований, посвященных экспериментам на сельскохозяйственных животных, являются подтверждением перспективности использования УДЧ в животноводстве и птицеводстве. При внесении в рацион УДЧ оказывают широкое биологическое действие, влияя и на продуктивность животных. Это обусловлено тем, что свойства УДЧ не согласуются с таковыми их минеральных аналогов, а принципиально отличаются в механизме воздействия. Известно, что нанометровый диапазон, присущий УДЧ, позволяет приобрести им совершенно новые свойства. Большая удельная поверхность молекулы обуславливает высокую реакционную способность, в результате чего наноформы веществ легко вступают во взаимодействие с биологическими объектами. Рассматривая УДЧ, отметим, что атомы, составляющие частицу, отличаются от таких же атомов в минеральном аналоге. Исследователи считают, что в частицах нанометрового диапазона атомы обнаруживаются на поверхности частицы (Hänsch et al., 2009).

Такие характерные особенности УДЧ привели к тому, что их начинают широко изучать и применять во многих областях науки и техники, например, в медицине, биотехнологии, оптике, фармации, животноводстве, растениеводстве и др. (Nikonov et al., 2011).

В строении УДЧ металлов можно выделить «сердцевину» и внешний контур, который имеет

толщину в несколько нанометров. Ультрадисперсные частицы металлов могут взаимодействовать с биологическими объектами только будучи коллоидными частицами. Данная частица состоит из атомов, которые могут иметь различный заряд. Коллоидная частица характеризуется наличием слоев, размеры которых также лежат в нанометровом диапазоне. За счет данных нанослоев происходит обмен с другими веществами или биологическими молекулами. Ультрадисперсные частицы способны взаимодействовать с живым организмом на всех уровнях его организации (молекулярном, клеточном, тканевом и др.). Кроме того, УДЧ проявляют свое действие, находясь и в жидких средах организма (Sahin et al., 2001).

РОЛЬ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ОРГАНИЗМА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЖИВОТНЫХ И ПТИЦЫ ЖЕЛЕЗОМ

Использование УДЧ железа в качестве альтернативы давно применяемым минеральным формам внесения микроэлементов широко исследуется.

Так, А.А. Назарова с соавторами изучали как происходит взаимодействие УДЧ с животными при их добавлении в корм. При этом для УДЧ железа определены концентрации, которые оказали наиболее благоприятное действие на организм кроликов. Данное значение составило 0,08 мг УДЧ железа на 1 кг живого веса в сутки. При такой концентрации все физиологические параметры находились в норме, а привес массы был повышен. Результаты исследования позволили рекомендовать использовать УДЧ железа в качестве источника эссенциальных элементов, имеющего ряд преимуществ по сравнению с минеральными аналогами. То есть УДЧ могут стать перспективными катализаторами многих процессов, которые протекают в организме, что ведет за собой улучшение показателей жизнедеятельности, и, что важно, повышают живую массу, а также показатели морфологического и биохимического анализа крови (Sizova et al., 2015).

В исследованиях на крысах в условиях модельного эксперимента наиболее оптимальная концентрация УДЧ железа также была схожа с таковой у кроликов и составила 0,08 мг/кг в пересчете на живой вес животного. При этом однократное введение концентраций УДЧ железа, более чем в сто раз превышающее оптимальные дозы, не влекло за собой значимых изменений в показателях жизнедеятельности лабораторных

животных, что также подтверждает безопасность и отсутствие токсического эффекта при введении частиц, размеры которых определяются в нанометровом диапазоне. Все это позволяет утверждать, что применение УДЧ железа у сельскохозяйственных животных будет иметь схожее действие и улучшит показатели продуктивности (Yausheva et al., 2016; Patel et al., 2019; Hassan et al., 2020).

Внесение УДЧ железа в рацион может способствовать улучшению и оздоровлению микрофлоры кишечника птиц. Так, в исследовании О.В. Кван с соавторами (2021) показано, что добавление УДЧ железа в рацион считается одним из перспективных факторов влияния на состав кишечной микрофлоры для улучшения продуктивности птицы. При этом отмечено снижение содержания в кишечнике птицы бактерий семейства *Enterobacteriaceae*, среди которых имеются патогенные и условно-патогенные организмы. Таким образом, авторы сделали вывод о перспективах использования УДЧ железа у птицы, которая содержится на дефицитном по минеральным веществам рационе, что подтверждается возможностью использования УДЧ железа как антибиотических веществ в отношении представителей условно-патогенной микрофлоры ЖКТ бройлеров (Кван и др., 2021).

Как уже ранее было упомянуто, нанотехнологии используют материю размером от 1 до 100 нм с новыми характеристиками. Микроэлементы вводятся в небольших количествах в корм птице. Эффективность микроэлементов ограничена биодоступностью, антагонизмом и скоростью выведения из организма. Биодоступность УДЧ может быть увеличена, поскольку они имеют другие физические и химические свойства, чем их исходный соответствующий микроэлемент (Яушева и др., 2016). Ультрадисперсные частицы обладают более низким антагонизмом в кишечнике, что приводит к улучшению всасывания, уменьшению экскреции в окружающую среду и повышению эффективности кормления.

Железо является одним из важнейших микроэлементов, его дефицит может привести к различным патологическим состояниям и задержке роста. В исследовании (Ramakrishnan et al. 2011; Manke et al., 2013; Arakha et al., 2015) использовалась комбинация ксиланазы и УДЧ железа. В эксперименте оценивалась оценка общего влияния композиции на рост птицы. Замечено, что группа птиц, получавшая эндоксиланазу и УДЧ железа, показала на 54,5% больший прирост веса

к пятой неделе по сравнению с контрольной группой. Анализ железа в мышцах не выявил увеличения его концентрации, в то время как гистопатологические препараты не показали морфологических изменений в клетках печени. Таким образом, было доказано, что комбинация УДЧ FeO и ксиланазы имеет большой потенциал для использования в кормах для птицы для крупномасштабного производства мяса без каких-либо токсикологических эффектов (Rehman et al.; 2020 Abdel-Rahman et al., 2022).

Железо – необходимый элемент для большинства организмов, включая бактерии. Окисленная форма железа нерастворима, а восстановленная форма высокотоксична для большинства макромолекул и в биологических системах, как правило, связана с Fe- и гемнесущими белками (Aslam et al., 2014). На фоне положительного влияния на обмен веществ и продуктивные качества микроэлементы оказывают отрицательное влияние на бактерии и микрофлору кишечника, что исключается путём дополнительного включения в рацион пробиотических препаратов.

Так, С.В. Лебедевым с соавторами (2019) исследовано совместное действие пробиотического препарата культуры клеток *Bifidobacterium longum* в составе препарата «Соя-бифидум» в дозировке 0,7 мл/кг корма и УДЧ железа в дозировке 17 мг/кг на цыплятах-бройлерах кросса Арбор Айкрес. Установлено, что у цыплят-бройлеров при совместном включении пробиотического препарата и УДЧ железа происходило достоверное увеличение живой массы на 10,16% на фоне минимального коэффициента расхода корма на 1 кг продукции, равного 1,2 относительно контрольной птицы. Сочетанное действие пробиотического препарата и УДЧ железа отличалось увеличением гемоглобина, эритроцитов, общего белка относительно цыплят контрольной группы. Отсутствие патологических изменений в печени было сопряжено со снижением аланинаминотрансферазы, аспартатаминотрансферазы, а также холестерина и щелочной фосфатазы. В исследовании показано, что несвязанное железо является индуктором перекисного окисления липидов и перекисной деструкции белков. Авторами сделан вывод о низкой степени высвобождения и скорости усвояемости металлов в микрочастицах, что исключает токсическое воздействие на организм и кишечную микрофлору. Полученные экспериментальные данные указывают на возможную оптимизацию минерального питания сельскохозяйственной птицы на основе исполь-

зования УДЧ железа и с нивелированием нагрузки на кишечную микрофлору путём включения в рацион пробиотического препарата «Соя-бифидум» (Лебедев и др., 2019).

На сегодняшний день актуальными представляются исследования отдельных характеристик метаболизма птицы при совместном скормливании культуры *Bifidobacterium longum* с ультрадисперсными частицами железа. Так, Е.П. Мирошниковой с соавторами (2020) представлены данные экспериментальных исследований влияния препарата «Соя-бифидум» и УДЧ железа на гематологические показатели крови цыплят-бройлеров: отмечено повышенное содержание эритроцитов. То есть использование в кормлении культуры *Bifidobacterium longum* сопровождается изменениями в белковом обмене, при этом дополнительное скормливание птице УДЧ железа позволяет активизировать белковый обмен (Мирошникова и др. 2020).

Одним из направлений совершенствования препаратов на основе УДЧ является уточнение размера частиц вещества. В исследовании Е.А. Сизовой и Е. Яушевой (2019) проверена гипотеза о воздействии размера частиц железа на рост и развитие цыплят. В опыте установлено стимулирующее действие препаратов железа на рост и откорм испытуемого животного в разных сроках после внутримышечной инъекции, в зависимости от параметров частиц. Увеличение активности роста сопровождалось набором массы протеина в приросте цыплят, накоплением концентраций аргинина в печени, вследствие чего увеличивалась концентрация моноцитов в крови. Исследования проводились с целью определения влияния разноразмерных ультрадисперсных препаратов элементарного железа на продуктивность и метаболизм цыплят-бройлеров. Ультрадисперсные частицы железа синтезированы методом высокотемпературной конденсации. Тест с использованием генноинженерного люминесцирующего штамма *Echerichia coli* K12 TG1 (*in vitro*) не выявил токсичность УДЧ и их агломератов. В эксперименте на 120 цыплятах-бройлерах «Смена 7» (*in vivo*) дана сравнительная оценка эффективности однократной внутримышечной инъекции препаратов железа с размером частиц 80 нм (ультрадисперсные частицы), 923 нм (агломераты ультрадисперсных частиц) и 10 мкм (микрочастицы). Использование данных препаратов позволило увеличить живую массу цыплят. Максимальная разница с контрольной группой достигнута при использовании УДЧ на 4-е сутки после инъекции;

агломератов – на 17-е сутки; микрочастиц – на 17-е сутки. Инъекции препаратов железа сопровождалась увеличением отложения протеина в суточном приросте цыплят: при использовании УДЧ на 1,3–4,3 г, агломератов – на 0,6–1,4 г, микрочастиц – на 0,1–1,4 г. Использование препаратов железа сопровождалось повышением содержания аргинина в печени цыплят по сравнению с контролем. Для разноразмерных частиц элементарного железа показаны сходные биологические эффекты, нарастающие по мере уменьшения размера частиц (Сизова и др., 2019).

Таким образом, ультрадисперсные формы жизненно необходимых металлов и их соединений могут найти широкое использование в животноводстве в качестве препаратов микроэлементов. Это обуславливается наиболее значимой биодоступностью микроэлементов из УДЧ в сопоставлении с классическими препаратами.

СВЕРХВЫСОКИЕ ЧАСТОТЫ В ДИСПЕРГИРОВАНИИ МИКРОЧАСТИЦ

Важно отметить, что в настоящее время перспективными для применения в кормлении сельскохозяйственных животных признаются не только вещества и компоненты корма, которые имеют высокую степень дисперсии (например, нанодиапазона, а также ультрадисперсные частицы), но и микрочастицы. Несомненный плюс микрочастиц, например, железа, состоит в том, что при особых режимах обработки железо более эффективно воздействует на процессы, протекающие в живом организме, и способно оказывать положительное влияние на хозяйственно значимые характеристики сельскохозяйственной продукции.

Впервые изучением воздействия микрочастиц железа совместно с особыми методами его обработки стала заниматься группа ученых под руководством С.А. Мирошникова (Гарипова и др. 2013; Гарипова и др. 2015; Мирошников и др., 2018; Гарипова и др., 2019). Исследования основываются на следующих положениях. Известно, что микрочастицы железа способны в кишечнике всасываться путем эндоцитоза в составе сложных комплексов (Theil, 2011). Диспергирование таких частиц с получением более мелких положительно повлияет на усвоение железа в живом организме, в том числе и цыплят-бройлеров. Для диспергирования предложен способ их обработки сверхвысокими частотами (СВЧ), как отдельно, так и совместно с воздействием ультразвука, что открывает широкие воз-

возможности для применения данного метода в кормлении животных. В результате повышается эффективность экстрагирования ценных кормовых веществ из сырья, полимеры расщепляются до мономеров, а также повышается устойчивость полученных веществ к окислительному стрессу. Проведение исследований по использованию как сверхвысоких, так и ультразвуковых частот в кормлении животных и обработке кормовых ресурсов показали перспективность применения данных физических технологий, в том числе и с микроэлементами.

Возможность использования высокодиспергированных добавок в рацион исследовалась в ряде работ (Alekseeva et al., 2019; Patra et al. 2019). Микрочастицы являются перспективными для использования у живых организмов, так как они имеют меньшее негативное действие, чем частицы нанодиапазона. Наночастицы способны к диссоциации ионов с поверхности, что в среде ЖКТ может привести к негативным последствиям, а также чрезмерному накоплению микроэлементов в тканях. Частицы металлов, чьи размеры лежат в микрометровом диапазоне избавлены от таких отрицательных влияний на животных. К тому же большая часть микроэлементов всасывается в процессе энтерального пищеварения (Theil, 2011).

Достоверное увеличение переваримости сухого вещества на 6,4% наблюдалось при воздействии электромагнитного поля СВЧ (Гарипова и др. 2015). Это объясняется структурным преобразованием в корме, возникшем при тепловом воздействии в результате электромагнитной СВЧ-обработки (Vecchia et al., 2009).

При анализе результатов, полученных в ходе оценки биологической доступности микроэлементов железа для организма птицы, отмечено, что дополнительное воздействие как ультразвука, так и электромагнитного СВЧ на опытные комплексы даёт достоверное увеличение биодоступности железа из микрочастиц на 5,8–7,0%.

Обсуждая данные эффекты, можно предположить, что частицы микроэлементов металлической природы при воздействии СВЧ испытывают местный разогрев. Это ведет к спеканию и формированию органических плёнок на поверхности микрочастиц железа. Предполагается, что покрытые пленкой частицы, могут быть более доступными при их всасывании в кишечном тракте. Также обработанные частицы железа могут способствовать повышению ферментативной активности микроорганизмов ЖКТ (Theil, 2011) и гидролизу растительных остатков в своем

окружении. Как результат – повышение темпов роста и развития сельскохозяйственной птицы (Мирошников и др., 2018).

В отличие от традиционных методов нагрева, методы электромагнитного воздействия обеспечивают возможность равномерного, быстрого нагрева, экологическую чистоту нагрева, высокое бактерицидное действие, сокращение времени технологических процессов, ценное сохранение важных питательных веществ пищевых продуктов и комбикормов (Гарипова и др. 2019).

Анализируя полученные данные, можно отметить, что введение в рацион микрочастиц железа с последующим воздействием различных видов обработки корма оказало положительный эффект. С включением в рацион микрочастиц железа с последующим воздействием СВЧ на корм произошло большее резервирование в виде жира в теле подопытных птиц. Воздействие ультразвуковой обработки корма сопровождалось снижением доли жира в теле цыплят (Гарипова и др., 2015).

Известно, что включение в рацион птицы железосодержащих комплексов, обработанных ультразвуком, приводит к увеличению содержания глюкозы в крови и увеличению содержания этого элемента в крови, причем наиболее значительно – при воздействии СВЧ. Таким образом, использование микрочастиц железа в биотических дозах повышает интенсивность роста цыплят-бройлеров и влияет на их интерьер. При этом наиболее рациональным представляется использовать предварительно обработанные кормосмеси железа и отрубей с помощью воздействия СВЧ (Гарипова и др., 2013).

Сегодня активно изучаются эффекты воздействия разноразмерных частиц железа на живые организмы. В данном аспекте для сельского хозяйства перспективным является применение обработанных СВЧ и ультразвуком микрочастиц железа в составе различных комплексов для повышения продуктивности сельскохозяйственных животных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Неотъемлемой составляющей полноценного развития и функционирования всех внутренних органов и систем является постоянство внутреннего гомеостаза живого организма. Минеральные вещества играют немаловажную роль в этом постоянстве. Так, железо активно участвует в ферментативных процессах, кроветворении и переносе кислорода. В многочисленных исследованиях установлено, что на обмен химических эле-

ментов влияет большой ряд факторов, в частности способ введения в организм, дозировка и форма соединений химических элементов. Все это свидетельствует о сложности межэлементных взаимоотношений и нестабильности равновесия в организме, что делает необходимым более глубокое их изучение для понятия физиологического состояния организма, выявления нарушений, связанных с дисэлементозами, и разработки путей их коррекции. По мере развития учения о пищевых источниках микронутриентов стала очевидной необходимость замены минеральных форм микроэлементов на более биологически доступные и менее токсичные органические соединения. Последние получают все большее распространение в практике. Между тем, помимо орга-

нических форм, определенный интерес представляют другие источники микроэлементов, в частности нано-, ультрадисперсные формы и микрочастицы металлов, которые в силу целого ряда характеристик (меньшей токсичности, биодоступности и др.) способны эффективно заменять в том числе и органические формы.

Одной из перспективных технологий в данном контексте является использование СВЧ обработки пшеничных отрубей в сочетании с микродисперсными частицами железа, что изменяет структурный и химический составы опытного комплекса, способствуя повышению переваримости питательных веществ, и сопровождается ростом биодоступности железа, обеспечивая прирост живой массы птицы.

ЛИТЕРАТУРА

Богословская О.А., Сизова Е.А., Полякова В.С., Мирошников С.А., Лейпунский И.О., Ольховская И.П., Глущенко Н.Н. Изучение безопасности введения наночастиц меди с различными физико-химическими характеристиками в организм животных. Вестник Оренбургского государственного университета. 2009; (2): 124–127.

Гарипова Н.В. и др. Влияние препаратов микрочастиц железа на интерьер и продуктивность цыплят-бройлеров. Вестник Оренбургского государственного университета. 2013; 10(159): 56–60.

Гарипова Н.В. и др. Физические параметры микрочастиц железа и биологическая доступность при воздействии сверхвысокими частотами. Животноводство и кормопроизводство. 2019; 102(2): 21–29.

Гарипова Н.В., Курилкина М.Я. Влияние способов обработки отрубного продукта на химический состав веществ в теле цыплят-бройлеров. Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2015; 1 (51): 168–171.

Евстропов В.М., Зеленкова Г.А., Зеленков А.П. Современные подходы к исследованию биологических эффектов наночастиц металлов. Заметки ученого. 2020; (8): 32–36.

Кван О.В., Сизова Е.А., Камирова А.М. Микробное биоразнообразие слепого отдела кишечника цыплят-бройлеров при введении в корм различных ультрадисперсных частиц. Материалы 3-й Междунар. науч.-практич. конф. «Молекулярно-генетические технологии анализа экспрессии генов продуктивности и устойчивости к заболеваниям животных» (М., 30 сентября 2021 г.). М.: Сельскохозяйственные технологии. 2021; 255–263.

Короткова А.М. и др. Морфофизиологические изменения у пшеницы (*Triticum vulgare* L.) под влиянием наночастиц металлов (Fe, Cu, Ni) и их оксидов (Fe₃O₄, CuO, NiO). Сельскохозяйственная биология. 2017; 52(1): 172–182.

Красочко П.А. и др. Анализ препаратов на основе наночастиц микроэлементов, применяемых в животноводстве и ветеринарии. Сборник науч. трудов Краснодарского научного центра по зоотехнии и ветеринарии. 2021; 10(1): 92–99.

Лебедев С.В. и др. Влияние микрочастиц железа и пробиотического препарата соя-бифидум на рост, развитие и морфобиохимические показатели цыплят-бройлеров. Животноводство и кормопроизводство. 2019; 102(4): 227–237.

Лебедева Т.И., Красочко И.А., Красочко П.А. Влияние ветеринарных препаратов на основе наночастиц микроэлементов на здоровье животных и качество продукции. Вестник АПК Верхневолжья. 2021; (2): 73–79.

Мирошников С.А. и др. Продуктивное действие и переваримость кормов при использовании в кормлении птицы микрочастиц железа. Животноводство и кормопроизводство. 2018; 101(2): 7–16.

Мирошникова Е.П. и др. Влияние комплекса ультрадисперсных металлов-микроэлементов и пробиотического препарата на обмен веществ и интерьерные особенности цыплят-бройлеров. Животноводство и кормопроизводство. 2020; 103(1): 33–46.

Яушева Е.В., Мирошников С.А., Рогачев Б.Г. и др. Патент № 2593366 С1 РФ. Способ оценки внутримышечной инъекции нанодисперсного железа на продуктивность и метаболизм цыплят-бройлеров: № 2015121172/15: заявл. 03.06.2015; опубл. 10.08.2016.

Полищук С.Д. и др. Влияние строения наночастиц на механизм их взаимодействия с живыми системами. Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2019; 4(44): 45–53.

Сизова Е.А., Мирошников С.А. Различия биологических эффектов разноразмерных наночастиц металлов-микроэлементов. Мясное скотоводство – приоритеты и перспективы развития: Материалы междунар. науч.-практич. конф. (Оренбург, 25–26 апреля 2018 г.). Оренбург: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук». 2018; 155–164.

- Сизова Е.А., Яушева Е.В. Сравнительная продуктивность цыплят бройлеров при инъекционном введении разноразмерных ультрадисперсных частиц железа. Животноводство и кормопроизводство. 2019; 102(1): 6–21.
- Степанова И.А., Макаров П.М., Назарова А.А. Воздействие оптимальных и токсичных концентраций биологически активных наночастиц металлов на физиологические показатели крыс и кроликов. Исследования молодых ученых – аграрному производству: Материалы онлайн-конф., посвящ. Дню российской науки (г. Белгород, 4 февраля 2015 г.). Ассоциация аграрных вузов ЦФО. Белгород: Белгородский гос. аграрный ун-т имени В.Я. Горина. 2015; 26–31.
- Яушева Е.В., Мирошников С.А. Продуктивное действие совместного использования препаратов наночастиц железа и аргинина в питании цыплят бройлеров. Известия Оренбургского гос. аграрного ун-та. 2015; 5(55): 158–160.
- Abdel-Rahman H.G., Alian H.A., Mahmoud M. Impacts of dietary supplementation with nano-iron and methionine on growth, blood chemistry, liver biomarkers, and tissue histology of heat-stressed broiler chickens. Tropical Animal Health and Production. 2022; 54(2): 1–11.
- Alekseeva L.V., Lukianov A.A., Migulev P.I. The application of mineral additives in different formulations for feeding animals. Biosc. Biotech. Res. Comm. Special. 2019; 12(5), 4(196): 7.
- Arakha M., et al. Antimicrobial activity of iron oxide nanoparticle upon modulation of nanoparticle-bacteria interface. Scientific reports. 2015; 5(1): 1–12.
- Aslam M.F. et al. Ferroportin mediates the intestinal absorption of iron from a nanoparticulate ferritin core mimetic in mice. The FASEB Journal. 2014; 28(8): 3671–3678.
- Cattò C. et al. Impacts of dietary silver nanoparticles and probiotic administration on the microbiota of an *in vitro* gut model. Environmental Pollution. 2019; 245: 754–763.
- Conrad M.E., Umbreit J.N. Iron absorption and transport – an update. American journal of hematology. 2000; 64(4): 287–298.
- Finch C.A. et al. Body iron loss in animals. Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine. 1978; 159(3): 335–338.
- Gangadoo S. et al. Nanoparticles of selenium as high bioavailable and non-toxic supplement alternatives for broiler chickens. Environmental Science and Pollution Research. 2020; 27(14): 16159–16166.
- Hänsch R., Mendel R.R. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, CL). Current Opinion in Plant Biology. 2009; 12: 259–266.
- Hassan S., Hassan F., Rehman M.S. Nano-particles of trace minerals in poultry nutrition: potential applications and future prospects. Biological Trace Element Research. 2020; 195(2): 591–612.
- Liu W.T. Nanoparticles and their biological and environmental applications. Journal of bioscience and bioengineering. 2006; 102(1): 1–7.
- López M.A.A., Martos F.C. Iron availability: An updated review. International journal of food sciences and nutrition. 2004; 55(8): 597–606.
- Manke A., Wang L., Rojanasakul Y. Mechanisms of nanoparticle-induced oxidative stress and toxicity. BioMed. Research International. 2013; 5–7.
- Medina-Reyes E.I. et al. Food additives containing nanoparticles induce gastrotoxicity, hepatotoxicity and alterations in animal behavior: The unknown role of oxidative stress. Food and Chemical Toxicology. 2020; 146: 111814.
- Mohajerani A. et al. Nanoparticles in construction materials and other applications, and implications of nanoparticle use. Materials. 2019; 12(19): 3052.
- Mohajerani A. et al. Nanoparticles in construction materials and other applications, and implications of nanoparticle use. Materials. 2019; 12(19): 3052.
- Nikonov I., Folmanis Y.G., Folmanis G., Kovalenko L., Laptev G.Y., Egorov I., Fisinin V., Tananaev I. Iron nanoparticles as a food additive for poultry. In: Doklady Biological Sciences. 2011; 440: 328.
- Patel S. et al. Toxicity evaluation of magnetic iron oxide nanoparticles reveals neuronal loss in chicken embryo. Drug and chemical toxicology. 2019; 42(1): 1–8.
- Patra A.K. et al. Are nanomaterials potential new generation antimicrobial feed additives in livestock. Indian J. Anim. Heal. 2019; 58: 105–120.
- Patra A., Lalhriatpuii M. progress and prospect of essential mineral nanoparticles in poultry nutrition and feeding: a review. Biological Trace Element Research. 2020; 197(1): 233–253.
- Raje K., Ojha S., Mishra A., Munde V., Rawat C., Chaudhary S.K. Impact of supplementation of mineral nano particles on growth performance and health status of animals: a review. Journal of Entomology and Zoology Studies. 2018; (6): 1690–1694.
- Ramakrishnan V. et al. Evaluation of iron-induced oxidative stress and its amelioration by certain herbs in broilers. Toxicology international. 2011; 18(1): 54.
- Rehman H. et al. Effect of endoxylanase and iron oxide nanoparticles on performance and histopathological features in broilers. Biological Trace Element Research. 2020; 193(2): 524–535.
- Robinson J.J. Nutrition in the reproduction of farm animals. Nutrition Research Reviews. 1990; 3(1): 253–276.

- Sahin K., Sahin N., Onderci M., Yaralioglu S., Kucuk O. Protective role of supplemental vitamin E on lipid peroxidation, vitamins E, A and some mineral concentrations of broilers reared under heat stress. *Veterinární medicína-Praha*. 2001; 46: 140–148.
- Sengul A.B., Asmatulu E. Toxicity of metal and metal oxide nanoparticles: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2020; 18(5): 1659–1683.
- Singh R.P., Handa R., Manchanda G. Nanoparticles in sustainable agriculture: An emerging opportunity. *Journal of Controlled Release*. 2021; 329: 1234–1248.
- Sizova E.A. et al. Element status in rats at intramuscular injection of iron nanoparticles. *Biosciences Biotechnology Research Asia*. 2015; 12(S2): 119.
- Sizova E. et al. Growth enhancement by intramuscular injection of elemental iron nano- and microparticles. *Modern Applied Science*. 2015; 9(10): 17.
- Theil E. C. Iron homeostasis and nutritional iron deficiency. *The Journal of nutrition*. 2011; 141(4): 724S–728S.
- Vecchia P. et al. Exposure to high frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (100 kHz – 300 GHz). *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*. 2009; 378.
- Yausheva E.V. et al. Nanoparticles in combination with amino acids change productive and immunological indicators of broiler chicken. *Agricultural Biology*. 2016; 51(6): 912–920.

ULTRAFINE IRON PARTICLES IN ANIMAL HUSBANDRY (A REVIEW)

N.V. Garipova, V.A. Ryazanov

FSBSI Federal Scientific Center for Biological Systems and Agrotechnologies of the RAS,
st. January 9, 29, Orenburg, 460000, Russian Federation

ABSTRACT. Nanotechnologies are of great interest to researchers today. Their rapid development in recent decades is due to the fact that ultrafine particles (UFP), including metals, have completely different properties than traditional forms of chemical elements. At the moment, the use of UFP metals in the field of agriculture looks especially interesting. The advantage of new forms of trace elements is that with their help it is possible to overcome the negative effects inherent in traditional forms. So, when compiling the diets of animals and birds, it is necessary to carefully select the doses of elements in order to avoid their toxic effects, they also have a low digestibility in the body and the possibility of developing oxidative stress in animals. All this served as an impetus for studying the use of UFP as sources of trace elements in the diet of farm animals. Thus, this review is devoted to the use of ultrafine iron particles as a feed additive in the diets of farm animals and poultry.

KEYWORDS: ultrafine particles, trace elements, iron, productivity, farm animals, broiler chickens.

REFERENCES

- Bogoslovskaja O.A., Sizova E.A., Poljakova V.S., Miroshnikov S.A., Lejpunskij I.O., Ol'hovskaja I.P., Glushhenko N.N. Izuchenie bezopasnosti vvedeniya nanochastich medii s razlichnymi fiziko-himicheskimi harakteristikami v organizm zhivotnyh. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2009; (2): 124–127 (in Russ.).
- Garipova N.V. i dr. Vliyanie preparatov mikrochastich zheleza na inter'er i produktivnost' cypljat-brojlerov. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2013; 10(159): 56–60 (in Russ.).
- Garipova N.V. i dr. Fizicheskie parametry mikrochastich zheleza i biologicheskaja dostupnost' pri vozdeystvii sverhvisokimi chastotami. *Zhivotnovodstvo i kormoproizvodstvo*. 2019; 102(2): 21–29 (in Russ.).
- Garipova N.V., Kurilkina M. Ja. Vliyanie sposobov obrabotki otrubnogo produkta na himicheskij sostav veshhestv v tele cypljat-brojlerov. *Izvestija Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2015; 1 (51): 168–171 (in Russ.).
- Evstropov V.M., Zelenkova G.A., Zelenkov A.P. Sovremennye podhody k issledovaniju biologicheskikh jeffektov nanochastich metallov. *Zametki uchenogo*. 2020; (8): 32–36 (in Russ.).
- Kvan O.V., Sizova E.A., Kamirova A.M. Mikrobnoe bioraznoobrazie slepogo otdela kishechnika cypljat-brojlerov pri vvedenii v korm razlichnyh ul'tradispersnyh chastic. *Materialy 3-j Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. «Molekuljarno-geneticheskie tehnologii analiza jekspressii genov produktivnosti i ustojchivosti k zabolevanijam zhivotnyh» (M., 30 sentjabrja 2021 g.)*. M.: Sel'skohozjajstvennye tehnologii. 2021; 255–263 (in Russ.).
- Korotkova A.M. i dr. Morfofiziologicheskie izmeneniya u pshenicy (*Triticum vulgare* L.) pod vlijaniem nanochastich metallov (Fe, Cu, Ni) i ih oksidov (Fe₃O₄, CuO, NiO). *Sel'skohozjajstvennaja biologija*. 2017; 52(1): 172–182 (in Russ.).
- Krasochko P.A. i dr. Analiz preparatov na osnove nanochastich mikrojelementov, primenjaemyh v zhivotnovodstve i veterinarii. *Sbornik nauch. trudov Krasnodarskogo nauchnogo centra po zootehnii i veterinarii*. 2021; 10(1): 92–99 (in Russ.).
- Lebedev S.V. i dr. Vliyanie mikrochastich zheleza i probioticheskogo preparata soja-bifidum na rost, razvitie i morfofiohimicheskie pokazateli cypljat-brojlerov. *Zhivotnovodstvo i kormoproizvodstvo*. 2019; 102(4): 227–237 (in Russ.).

- Lebedeva T.I., Krasochko I.A., Krasochko P.A. Vlijanie veterinarnykh preparatov na osnove nanochastic mikrojelementov na zdorov'e zhivotnyh i kachestvo produkcii. Vestnik APK Verhnevolzh'ja. 2021; (2): 73–79 (in Russ.).
- Miroshnikov S.A. i dr. Produktivnoe dejstvie i perevarimost' kormov pri ispol'zovanii v kormlenii pticy mikrochastic zheleza. Zhivotnovodstvo i kormoproizvodstvo. 2018; 101(2): 7–16 (in Russ.).
- Miroshnikova E.P. i dr. Vlijanie kompleksa ul'tradispersnykh metallov-mikrojelementov i probioticheskogo preparata na obmen veshhestv i inter'ernye osobennosti cypljat-brojlerov. Zhivotnovodstvo i kormoproizvodstvo. 2020; 103(1): 33–46 (in Russ.).
- Jausheva E.V., Miroshnikov S.A., Rogachev B.G. i dr. Patent № 2593366 C1 RF. Sposob ocenki vnutrimyshechnoj in#ekcii nanodispersnogo zheleza na produktivnost' i metabolizm cypljat-brojlerov: № 2015121172/15: zajavl. 03.06.2015: opubl. 10.08.2016 (in Russ.).
- Polishhuk S.D. i dr. Vlijanie stroenija nanochastic na mehanizm ih vzaimodejstvija s zhivymi sistemami. Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo agrotehnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva. 2019; 4(44): 45–53 (in Russ.).
- Sizova E.A., Miroshnikov S.A. Razlichija biologicheskikh jeffektov raznorazmnykh nanochastic metallov-mikrojelementov. Mjasnoe skotovodstvo – priority i perspektivy razvitiya: Materialy mezhdunar. nauch.-praktich. konf. (Orenburg, 25–26 aprelja 2018 g.). Orenburg: Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe nauchnoe uchrezhdenie «Federal'nyj nauchnyj centr biologicheskikh sistem i agrotehnologij Rossijskoj akademii nauk». 2018; 155–164 (in Russ.).
- Sizova E.A., Jausheva E.V. Sravnitel'naja produktivnost' cypljat brojlerov pri in#ekcionnom vvedenii raznorazmnykh ul'tradispersnykh chastic zheleza. Zhivotnovodstvo i kormoproizvodstvo. 2019; 102(1): 6–21 (in Russ.).
- Stepanova I.A., Makarov P.M., Nazarova A.A. Vozdejstvie optimal'nyh i toksichnykh koncentracij biologicheskij aktivnykh nanochastic metallov na fiziologicheskie pokazateli krys i krolikov. Issledovanija molodyh uchenykh – agrarnomu proizvodstvu: Materialy onlajn-konf., posvjashh. Dnju rossijskoj nauki (g. Belgorod, 4 fevralja 2015 g.). Associacija agrarnykh vuzov CFO. Belgorod: Belgorodskij gos. agrarnyj un-t imeni V.Ja. Gorina. 2015; 26–31 (in Russ.).
- Jausheva E.V., Miroshnikov S.A. Produktivnoe dejstvie sovmestnogo ispol'zovanija preparatov nanochastic zheleza i arginina v pitanii cypljat brojlerov. Izvestija Orenburgskogo gos. agrarnogo un-ta. 2015; 5(55): 158–160 (in Russ.).
- Abdel-Rahman H.G., Alian H.A., Mahmoud M. Impacts of dietary supplementation with nano-iron and methionine on growth, blood chemistry, liver biomarkers, and tissue histology of heat-stressed broiler chickens. Tropical Animal Health and Production. 2022; 54(2): 1–11.
- Alekseeva L.V., Lukianov A.A., Migulev P.I. The Application of mineral additives in different formulations for feeding animals. Biosc. Biotech. Res. Comm. Special. 2019; 12(5), 4(196): 7.
- Arakha M., et al. Antimicrobial activity of iron oxide nanoparticle upon modulation of nanoparticle-bacteria interface. Scientific reports. 2015; 5(1): 1–12.
- Aslam M.F. et al. Ferroportin mediates the intestinal absorption of iron from a nanoparticulate ferritin core mimetic in mice. The FASEB Journal. 2014; 28(8): 3671–3678.
- Cattò C. et al. Impacts of dietary silver nanoparticles and probiotic administration on the microbiota of an in-vitro gut model. Environmental Pollution. 2019; 245: 754–763.
- Conrad M.E., Umbreit J.N. Iron absorption and transport – an update. American journal of hematology. 2000; 64(4): 287–298.
- Finch C.A. et al. Body iron loss in animals. Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine. 1978; 159(3): 335–338.
- Gangadoo S. et al. Nanoparticles of selenium as high bioavailable and non-toxic supplement alternatives for broiler chickens. Environmental Science and Pollution Research. 2020; 27(14): 16159–16166.
- Hänsch R., Mendel R.R. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, CL). Current Opinion in Plant Biology. 2009; 12: 259–266.
- Hassan S., Hassan F., Rehman M. S. Nano-particles of trace minerals in poultry nutrition: potential applications and future prospects. Biological Trace Element Research. 2020; 195(2): 591–612.
- Liu W.T. Nanoparticles and their biological and environmental applications. Journal of bioscience and bioengineering. 2006; 102(1): 1–7.
- López M.A.A., Martos F.C. Iron availability: An updated review. International journal of food sciences and nutrition. 2004; 55(8): 597–606.
- Manke A., Wang L., Rojanasakul Y. Mechanisms of nanoparticle-induced oxidative stress and toxicity. BioMed. Research International. 2013; 5–7.
- Medina-Reyes E.I. et al. Food additives containing nanoparticles induce gastrotoxicity, hepatotoxicity and alterations in animal behavior: The unknown role of oxidative stress. Food and Chemical Toxicology. 2020; 146: 111814.
- Mohajerani A. et al. Nanoparticles in construction materials and other applications, and implications of nanoparticle use. Materials. 2019; 12(19): 3052.
- Mohajerani A. et al. Nanoparticles in construction materials and other applications, and implications of nanoparticle use. Materials. 2019; 12(19): 3052.

- Nikonov I., Folmanis Y.G., Folmanis G., Kovalenko L., Laptev G.Y., Egorov I., Fisinin V., Tananaev I. Iron nanoparticles as a food additive for poultry. In: *Doklady Biological Sciences*. 2011; 440: 328.
- Patel S. et al. Toxicity evaluation of magnetic iron oxide nanoparticles reveals neuronal loss in chicken embryo. *Drug and chemical toxicology*. 2019; 42(1): 1–8.
- Patra A.K. et al. Are nanomaterials potential new generation antimicrobial feed additives in livestock. *Indian J. Anim. Heal.* 2019; 58: 105–120.
- Patra A., Lalhriatpuii M. progress and prospect of essential mineral nanoparticles in poultry nutrition and feeding: a review. *Biological Trace Element Research*. 2020; 197(1): 233–253.
- Raje K., Ojha S., Mishra A., Munde, V., Rawat, C., Chaudhary, S.K. Impact of supplementation of mineral nano particles on growth performance and health status of animals: a review. *Journal of Entomology and Zoology Studies*. 2018; (6): 1690–1694.
- Ramakrishnan V. et al. Evaluation of iron-induced oxidative stress and its amelioration by certain herbs in broilers. *Toxicology international*. 2011; 18(1): 54.
- Rehman H. et al. Effect of endoxylanase and iron oxide nanoparticles on performance and histopathological features in broilers. *Biological Trace Element Research*. 2020; 193(2): 524–535.
- Robinson J.J. Nutrition in the reproduction of farm animals. *Nutrition Research Reviews*. 1990; 3(1): 253–276.
- Sahin K., Sahin N., Onderci M., Yaralioglu S., Kucuk O. Protective role of supplemental vitamin E on lipid peroxidation, vitamins E, A and some mineral concentrations of broilers reared under heat stress. *Veterinárni medicína-Praha*. 2001; 46: 140–148.
- Sengul A.B., Asmatulu E. Toxicity of metal and metal oxide nanoparticles: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2020; 18(5): 1659–1683.
- Singh R.P., Handa R., Manchanda G. Nanoparticles in sustainable agriculture: An emerging opportunity. *Journal of Controlled Release*. 2021; 329: 1234–1248.
- Sizova E.A. et al. Element status in rats at intramuscular injection of iron nanoparticles. *Biosciences Biotechnology Research Asia*. 2015; 12(S2): 119.
- Sizova E. et al. Growth enhancement by intramuscular injection of elemental iron nano- and microparticles. *Modern Applied Science*. 2015; 9(10): 17.
- Theil E. C. Iron homeostasis and nutritional iron deficiency. *The Journal of nutrition*. 2011; 141(4): 724S–728S.
- Vecchia P. et al. Exposure to high frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (100 kHz – 300 GHz). *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*. 2009; 378.
- Yausheva E.V. et al. Nanoparticles in combination with amino acids change productive and immunological indicators of broiler chicken. *Agricultural Biology*. 2016; 51(6): 912–920.