

Животноводство и кормопроизводство. 2021. Т. 104, № 4. С. 170-181.
Animal Husbandry and Fodder Production. 2021. Vol. 104, no 4. P. 170-181.

ФИЗИОЛОГИЯ ЖИВОТНЫХ

Обзорная статья
УДК 636.085:577.17
doi:10.33284/2658-3135-104-4-170

Роль железа в пищеварении у полигастричных животных

Оксана Вячеславовна Шошина¹, Святослав Валерьевич Лебедев², Елена Владимировна Шейда³
^{1,2,3}Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, Оренбург, Россия
¹oksana.shoshina.98@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4104-3333>
²lsv74@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9485-7010>
³elena-snejjda@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2586-613X>

Аннотация. Железо (Fe) относится к одному из важнейших металлов в животном организме, который содержится в тканях животных и растений. Железосодержащие белки выполняют в организме различные функции: гемоглобин переносит кислород к тканям и органам, миоглобин осуществляет связывание и резервирование кислорода. Цитохромы, цитохромоксидазы, каталазы и пероксидазы – ферменты, отвечающие за прирост живой массы и сохранность молодняка. Железо обеспечивает нормальную деятельность ферментов и течение метаболических реакций, что проявляется действием на органы дыхательной, кровеносной и иммунной системы. Недостаточное содержание Fe в рационе может спровоцировать развитие анемии. Существуют два вида железа: гемовое и негемовое. Первое попадает в живые организмы из белковой пищи и переваривается значительно лучше, чем негемовое железо. Второе составляет основную группу Fe в растениях. Железо всасывается зрелыми энтероцитами средней верхней ворсинки и, в основном, тонкой кишкой. Железо в форме наночастиц в кишечнике всасывается в составе сложного комплекса – ферритина растительного происхождения посредством эндоцитоза, тем самым снижает резорбцию в кишечнике. Для полигастричных животных это сопровождается активацией микробиологических процессов в рубце, что выражается в повышении концентрации аммиака, а также повсеместным снижением кислотности-щелочного равновесия до 6,7-6,9. Большинству бактерий железо необходимо для роста и выживания, модулируя несколько ключевых метаболических путей, включая биосинтез рибофлавина, функцию антиоксидантных ферментов, анаэробное дыхание, выработку бутирата, а также вирулентность патогенных бактерий. Тотальная регуляция в кишечнике и его гомеостаз играет решающую роль в поддержании здоровой микробиоты. На основании вышеизложенного исследования железа как микрокомпонента рациона сельскохозяйственных животных должны проводиться с учётом его биологической роли в биокоординационных соединениях.

Ключевые слова: полигастричные животные, кормление, пищеварение, ферменты, железо, наночастицы, микробиота, ферропортин, трансферрин, гемохроматоз

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

Для цитирования: Шошина О.В., Лебедев С.В., Шейда Е.В. Роль железа в пищеварении у полигастричных животных (обзор) // Животноводство и кормопроизводство. 2021. Т. 104, № 4. С. 170-181. <https://doi.org/10.33284/2658-3135-104-4-170>

PHYSIOLOGY OF ANIMALS

Original article

The role of iron in digestion in polygastric animals (review)

Oksana V Shoshina, Svyatoslav V Lebedev, Elena V Sheyda
^{1,2,3}Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia
¹oksana.shoshina.98@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4104-3333>
²lsv74@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9485-7010>
³elena-snejjda@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2586-613X>

Abstract. Iron is one of the most important metals in the animal body, which is contained in animals and plants tissues. Iron proteins perform various functions in the body: hemoglobin carries oxygen to tissues and organs, myoglobin binds and reserves oxygen. Cytochromes, cytochrome oxidases, catalases and peroxidases are enzymes responsible for the growth of live weight and the safety of young animals.

An iron ensures the normal activity of enzymes and the course of metabolic reactions, which is manifested by the effect on the organs of the respiratory, circulatory and immune systems. Insufficient iron content in the diet can lead to anemia. There are two types of iron: containing a coloring substance - "heme" and not containing "heme". The first enters living organisms from protein food and is digested much better than iron without "heme". Not containing "heme" is the main group of iron in plants. Iron is absorbed by mature enterocytes of the middle upper villi and, mainly, by the small intestine. Iron in the form of nanoparticles in the intestine is absorbed as part of a complex aggregate - ferritin of plant origin through endocytosis. This complex aggregate may include several thousand iron atoms, which reduces resorption in the intestine. For polygastric animals it activates microbiological processes in the rumen, which is expressed in an increase in the concentration of ammonia, as well as a widespread decrease in the acid-base balance of the rumen fluid in the control group to 6,7-6,9. Most bacteria require iron for growth and survival. It regulates bacterial survival by modulating several key metabolic pathways, including riboflavin biosynthesis, antioxidant enzyme function, anaerobic respiration, butyrate production, and virulence of pathogenic bacteria. Indicating that iron availability is tightly regulated in the intestine and its homeostasis plays a crucial role in maintaining a healthy microbiota. So it is important to make allowance about iron importance in coordination complex when studying the diet of farm animals.

Keywords: polygastric animals, feeding, digestion, enzymes, iron, nanoparticles, microbiota, ferroportin, transferrin, hemochromatosis

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

For citation: 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>

Введение.

Железо составляет основу более ста ферментов живого организма, которые отвечают за прирост живой массы и сохранность молодняка. Кроме того, Fe обеспечивает нормальную деятельность энзимов и течение метаболических реакций (Ватутин Н.Т. и др., 2012; Andrews NC, 1999).

Железо – биогенный элемент, участвует в метаболизме гемоглобина, миоглобина, цитохромов, пероксидазы, каталазы. Гемоглобин отвечает за насыщение тканей и органов кислородом. Также ионы железа входят в состав белков, транспортирующих и запасующих железо: трансферрина, ферритина, гемосидерина (Комлева Н.А. 2021; Морщакова Е.Ф. и др., 2003).

Недостаток железа в организме может привести к развитию анемии и тканевой гипоксии. В итоге доставка кислорода к периферическим органам снижается и понижается уровень клеточного дыхания, замедляется обмен веществ (Miao J et al., 2019; Pasricha SR et al., 2021; Higashimura Y et al., 2020).

Железо существует в живом организме в двух формах Fe^{2+} и Fe^{3+} . Железо со степенью окисления $2+$ мгновенно окисляется в присутствии воздуха. (Pajarillo EAB et al., 2021). Для защиты железа от окисления используют: изоляция металла от коррозионной среды; электрохимические методы защиты (протекторная защита, электрозащита); изготовление детали из материала; изменение свойств коррозионной среды (Jiang L et al., 2021; Han YM et al., 2017).

Потребность в железе крупного рогатого скота составляет 50 мг/кг сухого вещества корма. Усвоение, а это – около 10 %, зависит от физиологического состояния и ингредиентов потребляемого корма (Suttle N, 2016).

В рационе железо содержится в гемовых либо в различных негемовых формах. Негемовое железо содержится в мясных и растительных продуктах. Не исключено, что оно может иметь в своём составе железо, способное растворяться, состоять из низкомолекулярных комплексов, запасааться в ферритине. Гемовое железо имеет отличительную особенность: в его состав входит гем, который находится в соединении с протопорфирином, что обосновывает эффект лучшего усвоения гемового железа (Carpenter CE et al., 1992) и его участия для роста и жизнеспособности бактерий в кишечнике (Schroeder BO et al., 2016). Токсический эффект железа связан с изменением микробно-

го профиля в кишечнике, способствуя росту потенциально патогенных видов энтеробактерий по причине снижения лактобацилл и бифидобактерий. Поэтому при доклинической аттестации добавок, обогащённых железом, необходимо учитывать их влияние на микробиом и возможные последующие последствия (Zimmermann MB et al., 2010; Jaeggi T et al., 2015). Бактерии имеют несколько транспортных систем для поглощения железа, при этом сами микроэлементы формируют устойчивость у бактерий, способность бороться с окислительным стрессом и вырабатывать энергию с помощью метаболических процессов и ферментов, связанных с металлами (Boyer E et al., 2002). В частности, железо модулирует несколько ключевых метаболических путей, включая биосинтез рибофлавина, функцию антиоксидантных ферментов (т. е. каталазу), анаэробное дыхание, выработку бутирата, а также вирулентность патогенных бактерий, что указывает на жёсткое регулирование железа в кишечнике для поддержания здоровой микробиоты (Tsolis RM et al., 1996; Anjem A et al., 2012; Dostal A et al., 2015).

Микроорганизмы кишечника обладают различными механизмами регулирования системного и клеточного уровней железа для гомеостаза (Farghali M et al., 2020; Anderson GJ et al., 2017), которые включают модуляцию секреции муцина в кишечнике, что приводит к увеличению всасывания железа (Congrad ME et al., 1993). Лактобациллы, вырабатывая молочную кислоту, тем самым снижая pH толстой кишки, способствуют увеличению превращения трёхвалентного железа (Fe^{3+}) в более абсорбируемое двухвалентное железо (Fe^{2+}) в микроокружении кишечника (Bering S et al., 2006; Норре М et al., 2015). Кишечные комменсалы также могут увеличить доступность пищевого железа за счёт преобразования эллаговой кислоты в урוליфин А, поскольку он не связывает Fe^{3+} по сравнению с эллаговой кислотой (Saha et al., 2016). Перегрузка железом может вызвать дисгомеостаз кишечника за счёт уменьшения численности комменсальных бактерий и стимулирования роста патогенных бактерий (Jaeggi T et al., 2015). С другой стороны, было показано, что пробиотическая группа *Bifidobacteriaceae* синтезирует сидерофоры и усваивает железо толстой кишки, что уменьшает супероксид и снижает риск заболеваний кишечника (Vega-Bautista A et al., 2019).

Пробиотики и пребиотики оказывают различное влияние на всасывание железа *in vitro*. Например, *Bifidobacterium infantis* снижал поглощение железа, тогда как *Lactobacillus acidophilus* увеличивал поглощение железа в линии эпителиальных клеток толстой кишки (Laparra JM et al., 2009). Механизмы, посредством которых лактобациллы влияют на усвоение железа, могут включать метаболизм флавоноидов и фитиновой кислоты из пищевых источников, что играет важную роль в биодоступности железа. Фитиновая кислота связывает железо, а лактобациллы способствуют разложению фитиновой кислоты, высвобождая связанное железо для всасывания в кишечнике. Эти результаты показывают, что влияние пробиотиков на усвоение железа зависит от вида, и правильный выбор бактерий требует тщательного рассмотрения (Schüemann K et al., 1999).

Всасывание железа происходит главным образом в тонком кишечнике зрелыми энтероцитами средней верхней ворсинки. Небольшая его часть всё-таки может абсорбироваться дистальными частями желудочно-кишечного тракта (Fuqua BK et al., 2012). Для того чтобы из просвета кишечника достигнуть кровотока, железо должно пересечь в начале апикальную мембрану щеточной каймы, затем базолатеральную мембрану энтероцитов. Данному носителю необходимо двухвалентное железо, но большая часть пребывает в трёхвалентном виде (Gunshin H et al., 2005). В результате для всасывания железо необходимо восстановить до трёхвалентной формы (McKie AT et al., 2001). В том случае, если у организма нет необходимости в железе, происходит его задержка в клеточном ферритине энтероцита и выделяется из организма такой энтероцит уже после многолетней жизни. Когда железо требуется, оно может быстро экспортироваться с помощью базолатеральной мембраны энтероцитов через ферропортин 1 (Donovan A et al., 2005). Эффект такой транспортировки железа во много раз усиливается медьзависимым железooksидазой гефестином, который превращает недавно транспортируемый Fe^{2+} в форму Fe^{3+} (Chua K et al., 2015).

Негемовое железо также транспортируется через апикальную мембрану кишечного энтероцита с помощью транспортёра двухвалентных ионов металла (DMT1) и выводится в кровоток через ферропортин 1 (FPN1). Вновь абсорбированное железо связывается с трансферрином плазмы и

распределяется по телу в местах утилизации, причём костный мозг эритроидного происхождения особенно требователен к железу. Наполненный железом трансферрин присоединяется к рецептору трансферрина 1 поверх основного количества клеток организма, и по завершению эндоцитоза железо в комплексе попадает в цитоплазму через DMT1 в эндосомальной мембране. Это железо может использоваться для метаболических функций, храниться в цитозольном ферритине или выводиться из клетки через FPN1. Концентрации клеточного железа модулируются регуляторными белками железа. Регулирование всасывания и переноса железа из тканей в плазму во всём организме происходит под действием пептида гепсидина, полученным из печени (Zoller H et al., 2001; Anderson GJ et al., 2017).

Об абсорбции гемового железа известно очень мало. Предполагается, что оно связывается со щёточной каймой энтероцитов неповреждённой, а затем подвергается эндоцитозу, но детально этот процесс до конца не изучен (Fuqua BK et al., 2012). Имеется мнение, что при включении железа в энтероцит происходит его освобождение из гема под влиянием гемоксигеназ и далее оно выходит из клеток с помощью ферропортина 1. Железо способно двигаться по тонкому отделу кишечника также в виде ферритина, но задействованные механизмы на сегодняшний день неизвестны (Fleming MD et al., 1998; Takehiko T et al., 2012).

Дисбаланс железа в живом организме, как правило, приводит к развитию патологий по причине снижения концентрации гепсидина. Данные патологии охватывают разные виды гемохроматоза, в результате которых гепсидин начинает усиленно выделяться и потребность в железе возрастает. Помимо этого развиваются анемии, характеризующиеся активным всасыванием железа в кишечнике, в связи с чем развивается переизбыток железа (Bomford A, 2002; Fleming RE et al., 2002; Pietrangelo A, 2002; Lopez A et al., 2016).

Из большого числа источников железа наиболее активным является ультрадисперсная форма. Её отличие от ионных частиц выражается в следующем: экологическая безопасность, высокоэффективность, экономическая выгода (Кокоева А.Т. и др., 2017), повышенная биодоступность, пролонгированность и невиливание действия на микрофлору (Короткова А.М. и др., 2019; Kianpour S et al., 2018; Talankova-Sereda TE et al., 2016). Наночастицы железа в составе комбикорма влияют на накопление кальция и стронция, которые принимают активное участие в развитии скелетно-мышечной системы (Сизова Е.А. и др., 2014).

Особенностью наночастиц железа является всасывание в кишечнике в составе сложного комплекса – ферритина растительного происхождения посредством эндоцитоза. В следствии содержания в ферритине более тысячи атомов железа всасывание таких наночастиц протекает менее активно по сравнению с ионными формами. Медленные процессы освобождения железа из наночастиц и плохая доступность для бактерий кишечника – достоинство для предотвращения генерационных процессов выведения железа из организма. Такие процессы возникают после поглощения растворимого железа, которое ограничивает его доступ в организм (Rehman AU et al., 2021).

При совместном применении наночастиц железа с титаном и цинком образуется коллаборация агентов-переносчиков по доставке биомолекул, способная, преодолевая барьеры организма, усиливать действие лекарственных препаратов (Ezealigo US et al., 2021).

Таким образом, биотическое действие железа обеспечивает жизнедеятельность живых организмов: функциональное многообразие, неспособность замещаться другими металлами и участие в биохимических процессах дыхания клеток. Оно характеризуется лёгкостью окисления и восстановления, переносом и накоплением кислорода, транспортировкой электронов в митохондриях (Crichton RR et al., 2002). Применение железа в форме микро- и наночастиц перспективно. Для полигастричных это выражается реакцией на микробиологические процессы в первом отделе многокамерного желудка, что выражается в повышении концентрации аммиака, а также повсеместным снижением кислотно-щелочного равновесия рубцовой жидкости в контрольной группе до показателей 6,7-6,9 (Ajay SM et al., 2020; Шейда Е.В. и др., 2020).

В исследованиях Jadhav P с коллегами (2022) отмечено, что УДЧ обладают способностью воздействовать на жизнедеятельность микроорганизмов. Стимулирующий эффект на процессы

синтеза метана оказывает добавление железа в форме наночастиц в условия сбраживания анаэробов (Liu J et al., 2013; Мирошников И.С., 2017; Ngueagni PT et al., 2021).

Заключение.

Железо в составе многочисленных соединений обеспечивает жизнедеятельность живых организмов, а также играет ключевую роль в различных метаболических процессах. Из желудочно-кишечного тракта оно всасывается главным образом в тонком кишечнике только в двухвалентной ионизированной форме, за счёт активного транспорта. Наиболее перспективно использовать железо в форме микро- и наночастиц, так как это экологически безопасно, высокоэффективно и экономически выгодно.

На основании вышеизложенного исследования железа как микрокомпонента рациона сельскохозяйственных животных должны проходить с учётом его биологической роли в биокоординационных соединениях.

Список источников

1. Влияние сульфата и наночастиц железа на особенности обмена химических элементов в мышечной ткани / Е.А. Сизова, С.В. Лебедев, О.Ю. Сипайлова, Д.В. Нестеров // Учёные записки Казанской Государственной Академии ветеринарной медицины им. Н.Э. Баумана. 2014. Т. 217. № 1. С. 251-255. [Sizova EA, Lebedev SV, Sipailova OYu, Nesterov DV. The influence of sulphates and iron nanoparticles on features of exchange of chemical elements in muscle tissue. Uchenye zapiski Kazanskoi Gosudarstvennoi Akademii veterinarnoi meditsiny im. NE Baumana. 2014;217(1):251-255. (*In Russ*)].

2. Воздействие ультрадисперсных частиц Fe на биохимический статус организма и экзокринную деятельность поджелудочной железы на фоне скармливания белковых рационов при выращивании крупного рогатого скота / Е.В. Шейда, С.В. Лебедев, С.А. Мирошников, В.В. Гречкина, Г.И. Левахин // Животноводство и кормопроизводство. 2020. Т. 103. № 3. С. 190-203. [Sheyda EV, Lebedev SV, Miroshnikov SA, Grechkina VV, Levakhin GI. Influence of ultrafine Fe on biochemical status of organism and exocrine activity of pancreas against the background of feeding with protein diets in raising cattle. Animal Husbandry and Fodder Production. 2020;103(3):190-203. (*In Russ*)]. doi: 10.33284/2658-3135-103-3-190

3. Кокоева А.Т., Кокоева Ал.Т., Ногаева В.В. Технологические основы производства говядины с использованием нанопорошка железа // Перспективы производства продуктов питания нового поколения: материалы Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием, (г. Омск, 13-14 апр. 2017 г.). Омск: Омский ГАУ им. П.А. Столыпина. 2017. С. 69-72. [Kokoeva AT, Kokoeva ALT, Nogayeva VV. Technological bases of beef production with the use of nanopowder iron (Conference proceedings) Perspektivy proizvodstva produktov pitaniya novogo pokoleniya: materialy Vseross. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem, (g. Omsk, 13-14 apr. 2017 g.). Omsk: Omskii GAU im. P.A. Stolypina; 2017: 69-72. (*In Russ*)].

4. Комлева Н.А. Железо: роль в кормлении сельскохозяйственных животных, профилактика недостатка железа // Научный электронный журнал «Меридиан». 2021. № 1(54). С. 171-173. [Komleva NA. Ferrum: its role in food-producing animals' feeding, asiderosis' prophylaxis. Nauchnyi elektronnyi zhurnal «Meridian». 2021;1(54):171-173. (*In Russ*)].

5. Микробиологические аспекты влияния НЧ Fe на организм крыс Wistar / А.М. Короткова, О.В. Кван, И.А. Вершинина, С.В. Лебедев // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2019. Т. 81. № 3. С. 168-173. [Korotkova AM, Kvan OV, Verшинina IA, Lebedev SV. Microbiological aspects of the effect of FE NPs on Wistar rats. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2019;81(3):168-173. (*In Russ*)]. doi: 10.20914/2310-1202-2019-3-168-173

6. Мирошников И.С. Влияние препаратов наночастиц металлов-микроэлементов на рубцовое пищеварение и метаболизм химических элементов в системе «бактерии-простейшие» рубца //

Вестник мясного скотоводства. 2017. №1(97). С.68-77. [Miroshnikov IS. Influence of metal nanoparticles on ruminal digestion and metabolism of chemical elements in system "bacteria-protozoa" of rumen. Herald of Beef Cattle Breeding. 2017;1(97):68-77. (In Russ)].

7. Моршакова Е.Ф., Павлов А.Д. Регуляция гомеостаза железа // Гематология и трансфузиология. 2003. Т. 48. № 1. С. 36-38. [Morshchakova EF, Pavlov AD. Regulation of iron hemostasis. Gematol. i transfuziologiya. 2003;48(1):36-38. (In Russ)].

8. Роль железа в организме человека / Н.Т. Ватутин, Н.В. Калинкина, А.С. Смирнова, О.К. Кашанская, И.А. Мильнер // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Медицина». 2012. № 1024. С. 74-80. [Vatutin NT, Kalinkina NV, Smirnova AS, Kashanskaya OK, Milner IA. The role of iron in the human organism. The Journal of VN Karazin Kharkiv National University. Series Medicine. 2012;1024:74-80. (In Russ)].

9. Ajay CM, Mohan S, Dinesha P, Rosen MA. Review of impact of nanoparticle additives on anaerobic digestion and methane generation. Fuel. 2020;277:118234. doi: 10.1016/j.fuel.2020.118234

10. Anderson GJ, Frazer DM. Current understanding of iron homeostasis. Am J Clin Nutr. 2017;106(Suppl 6):1559S-1566S. <https://doi.org/10.3945/ajcn.117.155804>

11. Andrews NC. Disorders of iron metabolism. N Engl J Med. 1999;341(26):1986-1995. doi: 10.1056/NEJM199912233412607

12. Anjem A, Imlay JA. Mononuclear iron enzymes are primary targets of hydrogenperoxide stress. J Biol Chem. 2012;287(19):15544-15556. doi: 10.1074/jbc.M111.330365

13. Bering S, Suchdev S, Sjolto L, Berggren A, Tetens I, Bukhave K. A lactic acid-fermented oat gruel increases non-haem iron absorption from a phytate-rich meal in healthy women of childbearing age. Br J Nutr. 2006;96(1):80-85. doi: 10.1079/bjn20061683

14. Bomford A. Genetics of haemochromatosis. Lancet. 2002;360(9346):1673-1681. doi: 10.1016/S0140-6736(02)11607-2

15. Boyer E, Bergevin I, Malo D, Gros P, Cellier MF. Acquisition of Mn(II) in addition to Fe(II) is required for full virulence of Salmonella enterica serovar Typhimurium. Infect Immun. 2002;70(11):6032-6042. doi: 10.1128/IAI.70.11.6032-6042.2002

16. Carpenter CE, Mahoney AW. Contributions of heme and nonheme iron to human nutrition. Crit Rev Food Sci Nutr. 1992;31(4):333-367. doi: 10.1080/10408399209527576

17. Chua K, Fung E, Micewicz ED, Ganz T, Nemeth E, Ruchala P. Small cyclic agonists of iron regulatory hormone hepcidin. Bioorg Med Chem Lett. 2015;25(21):4961-4969. doi: 10.1016/j.bmcl.2015.03.012

18. Conrad ME, Umbreit JN. A concise review: iron absorption - the mucin-mobilferrin-integrin pathway. A competitive pathway for metal absorption. Am J Hematol. 1993;42(1):67-73. doi: 10.1002/ajh.2830420114

19. Crichton RR, Wilmet S, Leggsyter R, Ward RJ. Molecular and cellular mechanisms of iron homeostasis and toxicity in mammalian cells. Focused Review. Journal of Inorganic Biochemistry. 2002;91(1):9-18. doi: 10.1016/s0162-0134(02)00461-0

20. Donovan A, Lima CA, Pinkus JL, Pinkus GS, Zon LI, Robine S, Andrews NC. The iron exporter ferroportin/Slc40a1 is essential for iron homeostasis. Cell Metab. 2005;1(3):191-200. doi: 10.1016/j.cmet.2005.01.003

21. Dostal A, Lacroix C, Bircher L, Pham VT, Follador R, Zimmermann MB, Chassard C. Iron modulates butyrate production by a child gut microbiota in vitro. mBio. 2015;6(6):e01453-15. doi: 10.1128/mBio.01453-15

22. Ezealigo US, Ezealigo BN, Aisida SO, Ezema FI. Iron oxide nanoparticles in biological systems: Antibacterial and toxicology perspective. JCIS Open. 2021;4:100027. doi: 10.1016/j.jciso.2021.100027

23. Farghali M, Andriamanohiarisoamanana FJ, Ahmed MM, Kotb S, Yamamoto Y, Iwasaki M, Yamashiro T, Umetsu K. Prospects for biogas production and H₂S control from the anaerobic digestion of

cattle manure: The influence of microscale waste iron powder and iron oxide nanoparticles. *Waste Manag.* 2020;101:141-149. doi: 10.1016/j.wasman.2019.10.003

24. Fleming MD, Romano MA, Su MA, Garrick LM, Garrick MD, Andrews NC. Nramp2 is mutated in the anemic Belgrade (b) rat: Evidence of a role for Nramp2 in endosomal iron transport. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 1998;95(3):1148-1153. doi: 10.1073/pnas.95.3.1148

25. Fleming RE, Sly WS. Mechanisms of iron accumulation in hereditary hemochromatosis. *Annual Review of Physiology.* 2002;64:663-680. doi: 10.1146/annurev.physiol.64.081501.155838

26. Fuqua BK, Vulpe CD, Anderson GJ. Intestinal iron absorption. *J Trace Elem Med Biol.* 2012;26(2-3):115-119. doi: 10.1016/j.jtemb.2012.03.015

27. Gunshin H, Fujiwara Y, Custodio AO, Drenzo C, Robine S, Andrews NC. Slc11a2 is required for intestinal iron absorption and erythropoiesis but dispensable in placenta and liver. *J Clin Invest.* 2005;115(5):1258-1266. doi: 10.1172/JCI24356

28. Han YM, Yoon H, Lim S, Sung MK, Shin CM, Park YS, Kim N, Lee DH, Kim JS. Risk factors for Vitamin D, zinc, and selenium deficiencies in Korean patients with inflammatory bowel disease. *Gut Liver.* 2017;11(3):363-369. doi: 10.5009/gnl16333

29. Higashimura Y, Takagi T, Naito Y, Uchiyama K, Mizushima K, Tanaka M, Hamaguchi M, Itoh Y. Zinc deficiency activates the IL-23/Th17 Axis to aggravate experimental colitis in mice. *J Crohns Colitis.* 2020;14(6):856-866. doi: 10.1093/ecco-jcc/jjz193

30. Hoppe M, Onning G, Berggren A, Hulthen L. Probiotic strain *Lactobacillus plantarum* 299v increases iron absorption from an iron-supplemented fruit drink: A double-isotope cross-over single-blind study in women of reproductive age. *Br J Nutr.* 2015;114(8):1195-1202. doi: 10.1017/S000711451500241X

31. Jadhav P, Khalid ZB, Zularisam AW, Krishnan S, Nasrullah M. The role of iron-based nanoparticles (Fe-NPs) on methanogenesis in anaerobic digestion (AD) performance. *Environmental Research.* 2022;204(B):112043. doi: 10.1016/j.envres.2021.112043

32. Jaeggi T, Kortman GA, Moretti D, Chassard C, Holding P, Dostal A, Boekhorst J, Timmerman HM, Swinkels DW, Tjalsma H, et al. Iron fortification adversely affects the gut microbiome, increases pathogen abundance and induces intestinal inflammation in Kenyan infants. *Gut.* 2015;64:731-742. doi: 10.1136/gutjnl-2014-307720

33. Jiang L, Dong Y, Yuan Y, Zhou X, Liu Y, Meng X. Recent advances of metal-organic frameworks in corrosion protection: from synthesis to applications. *Chemical Engineering Journal.* 2021:1-66. doi: 10.1016/j.cej.2021.132823

34. Kianpour S, Ebrahimezhad A, Negahdaripour M, Mohkam M, Mohammadi F, Niknezhad SV, Ghasemi Y. Characterization of biogenic Fe (III)-binding exopolysaccharide nanoparticles produced by *Ralstonia* sp. SK03. *Biotechnol Prog.* 2018;34(5):1167-1176. doi: 10.1002/btpr.2660

35. Laparra JM, Glahn RP, Miller DD. Assessing potential effects of inulin and probiotic bacteria on Fe availability from common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) to Caco-2 cells. *J Food Sci.* 2009;74(2):H40-H46. doi: 10.1111/j.1750-3841.2008.01027.x

36. Liu J, Vipulanandan C. Effects of Au/Fe and Fe nanoparticles on *Serratia* bacterial growth and production of biosurfactant. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl.* 2013;33(7):3909-3915. doi: 10.1016/j.msec.2013.05.026

37. Lopez A, Cacoub P, Macdougall IC, Peyrin-Biroulet L. Iron deficiency anaemia. *The Lancet.* 2016;387(10021):907-916. doi: 10.1016/S0140-6736(15)60865-0

38. McKie AT, Barrow D, Launde-Dada GO, Rolfs A, Sager G, Mudaly E, Mudaly M, Richardson C, Barlow D, Bomford A, Peters TJ, Raja KB, Shirali S, Hediger MA, Farzaneh F, Simpson RJ. An iron-regulated ferric reductase associated with the absorption of dietary iron. *Science.* 2001;291:1755-1759. doi: 10.1126/science.1057206

39. Miao J, Liao W, Pan Z, Wang Q, Duan S, Xiao S, Yang Z, Cao Y. Isolation and identification of iron-chelating peptides from casein hydrolysates. *Food Funct.* 2019;10(5):2372-2381. doi: 10.1039/c8fo02414f

40. Ngueagni PT, Kumar PS, Woumfo ED, Abilarasu A, Joshiba GJ, Femina Carolin C, Prasanamedha G, Fotsing PN, Siewe M. Effectiveness of a biogenic composite derived from cattle horn core/iron nanoparticles via wet chemical impregnation for cadmium (II) removal in aqueous solution. *Chemosphere*. 2021;272:129806. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.129806
41. Pajarillo EAB, Lee E, Kang D-K. Trace metals and animal health: Interplay of the gut microbiota with iron, manganese, zinc, and copper. *Animal Nutrition*. 2021;7(3):750-761. doi: 10.1016/j.aninu.2021.03.005
42. Pasricha SR, Tye-Din J, Muckenthaler MU, Swinkels DW. Iron deficiency. *The Lancet*. 2021;397(10270):233-248. doi: 10.1016/S0140-6736(20)32594-0
43. Pietrangelo A. Physiology of iron transport and the hemochromatosis gene. *Am J Physiol*. 2002;282(3):G403-G414. doi: 10.1152/ajpgi.00404.2001
44. Rehman AU, Nazir S, Irshad R, Tahir K, Rehman K, UllIslam R, Wahab Z. Toxicity of heavy metals in plants and animals and their uptake by magnetic iron oxide nanoparticles. *Journal of Molecular Liquids*. 2021;321:114455. doi: 10.1016/j.molliq.2020.114455
45. Saha P, Yeoh BS, Singh R, Chandrasekar B, Vemula PK, Haribabu B, Vijay-Kumar M, Jala VR. Gut microbiota conversion of dietary ellagic acid into bioactive phytochemical urolithin A inhibits heme peroxidases. *PloS One*. 2016;11(6):e0156811. doi: 10.1371/journal.pone.0156811
46. Schroeder BO, Backhed F. Signals from the gut microbiota to distant organs in physiology and disease. *Nat Med*. 2016;22:1079-1089. doi: 10.1038/nm.4185
47. Schüemann K, Elsenhans B, Forth W. Kinetic analysis of ⁵⁹Fe movement across the intestinal wall in duodenal rat segments ex vivo. *Am J Physiol*. 1999;276(2):431-440. doi: 10.1152/ajpgi.1999.276.2.G431
48. Suttle N. Ruminant nutrition – digestion and absorption of minerals and vitamins. Reference Module in Food Science. 2016. doi: 10.1016/B978-0-08-100596-5.00964-1
49. Talankova-Sereda TE, Lyapina KV, Shkopinsky EA, Ustinov AI, et al. Influence of Cu and Co nanoparticles on growth characteristics and biochemical structure of *Mentha longifolia* in vitro. In: Fesenko O, Yatsenko L, editors. *Nanophysics, nanophotonics, surface studies and applications*. Springer Proceedings in Physics. Springer, Cham. 2016;183:427-436. doi: 10.1007/978-3-319-30737-4_36
50. Takehiko T, Rabindra KB, Elizabeth CT. Ferritin ion channel disorder inhibits Fe(II)/O₂ reactivity at distant sites. *Inorg Chem*. 2012;51(21):11406-11. doi: 10.1021/ic3010135. Epub 2012 Oct 23
51. Tsois RM, Baumler AJ, Heffron F, Stojiljkovic I. Contribution of TonB- and Feo-mediated iron uptake to growth of *Salmonella typhimurium* in the mouse. *Infect Immun*. 1996;64(11):4549e56. doi: 10.1128/IAI.64.11.4549-4556.1996
52. Vega-Bautista A, de la Garza M, Carrero JC, Campos-Rodriguez R, Godinez-Victoria M, Drago-Serrano ME. The impact of lactoferrin on the growth of in-testinal inhabitant bacteria. *Int J Mol Sci*. 2019;20(19):4707. doi: 10.3390/ijms20194707
53. Zimmermann MB, Chassard C, Rohner F, N'Goran EK, Nindjin C, Dostal A, Utzinger J, Ghattas H, Lacroix C, Hurrell RF. The effects of iron fortification on the gut microbiota in African children: a randomized controlled trial in Cote d'Ivoire. *Am J Clin Nutr*. 2010;92(6):1406-1415. doi: 10.3945/ajcn.110.004564
54. Zoller H, Weiss G, Theurl I, Koch RO, Vogel W, Obrist P, Pietrangelo A, Montosi G, Haile DJ. Expression of the duodenal iron transporters divalent-metal transporter 1 and ferroportin 1 in iron deficiency and iron overload. *Gastroenterology*. 2001;120(6):1412-1419. doi: 10.1053/gast.2001.24033

References

1. Sizova EA, Lebedev SV, Sipailova OYu, Nesterov DV. The influence of sulphates and iron nanoparticles on features of exchange of chemical elements in muscle tissue. *Scientific Notes Kazan Bauman State Academy of Veterinary Medicine*. 2014;217(1):251-255.
2. Sheyda EV, Lebedev SV, Miroshnikov SA, Grechkin VV, Levakhin GI. Influence of ultrafine Fe on biochemical status of organism and exocrine activity of pancreas against the background of feeding with protein diets in raising cattle. *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2020;103(3):190-203. doi: 10.33284/2658-3135-103-3-190

3. Kokoeva AT, Kokoeva AI, Nogayeva VV. Technological bases of beef production with the use of nanopowder iron. (Conference proceedings) Prospects for the production of food products of a new generation: materials All-Russian. scientific-practical conf. with int. participation (Omsk, 13-14 April. 2017). Omsk: Omsk SAU name Stolypina PA; 2017:69-72.
4. Komleva NA. Ferrum: its role in food-producing animals' feeding, asiderosis' prophylaxis. Scientific electronic journal «Meridian». 2021;1(54):171-173.
5. Korotkova AM, Kvan OV, Vershinina IA, Lebedev SV. Microbiological aspects of the effect of FE NPs on Wistar rats. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2019;81(3):168-173. doi: 10.20914/2310-1202-2019-3-168-173
6. Miroshnikov IS. Influence of metal nanoparticles on ruminal digestion and metabolism of chemical elements in system "bacteria-protozoa" of rumen. Herald of Beef Cattle Breeding. 2017;1(97):68-77.
7. Morshchakova EF, Pavlov AD. Regulation of iron hemostasis. Hematology and Transfusiology. 2003;48(1):36-38.
8. Vatutin NT, Kalinkina NV, Smirnova AS, Kashanskaya OK, Milner IA. The role of iron in the human organism. The Journal of VN Karazin Kharkiv National University. Series Medicine. 2012;1024:74-80.
9. Ajay CM, Mohan S, Dinesha P, Rosen MA. Review of impact of nanoparticle additives on anaerobic digestion and methane generation. Fuel. 2020;277:118234. doi: 10.1016/j.fuel.2020.118234
10. Anderson GJ, Frazer DM. Current understanding of iron homeostasis. Am J Clin Nutr. 2017;106(Suppl 6):1559S-1566S. <https://doi.org/10.3945/ajcn.117.155804>
11. Andrews NC. Disorders of iron metabolism. N Engl J Med. 1999;341(26):1986-1995. doi: 10.1056/NEJM199912233412607
12. Anjem A, Imlay JA. Mononuclear iron enzymes are primary targets of hydrogenperoxide stress. J Biol Chem. 2012;287(19):15544-15556. doi: 10.1074/jbc.M111.330365
13. Bering S, Suchdev S, Sjolto L, Berggren A, Tetens I, Bukhave K. A lactic acid-fermented oat gruel increases non-haem iron absorption from a phytate-rich meal in healthy women of childbearing age. Br J Nutr. 2006;96(1):80-85. doi: 10.1079/bjn20061683
14. Bomford A. Genetics of haemochromatosis. Lancet. 2002;360(9346):1673-1681. doi: 10.1016/S0140-6736(02)11607-2
15. Boyer E, Bergevin I, Malo D, Gros P, Cellier MF. Acquisition of Mn(II) in addition to Fe(II) is required for full virulence of Salmonella enterica serovar Typhimurium. Infect Immun. 2002;70(11):6032-6042. doi: 10.1128/IAI.70.11.6032-6042.2002
16. Carpenter CE, Mahoney AW. Contributions of heme and nonheme iron to human nutrition. Crit Rev Food Sci Nutr. 1992;31(4):333-367. doi: 10.1080/10408399209527576
17. Chua K, Fung E, Micewicz ED, Ganz T, Nemeth E, Ruchala P. Small cyclic agonists of iron regulatory hormone hepcidin. Bioorg Med Chem Lett. 2015;25(21):4961-4969. doi: 10.1016/j.bmcl.2015.03.012
18. Conrad ME, Umbreit JN. A concise review: iron absorption - the mucin-mobilferrin-integrin pathway. A competitive pathway for metal absorption. Am J Hematol. 1993;42(1):67-73. doi: 10.1002/ajh.2830420114
19. Crichton RR, Wilmet S, Leggsyer R, Ward RJ. Molecular and cellular mechanisms of iron homeostasis and toxicity in mammalian cells. Focused Review. Journal of Inorganic Biochemistry. 2002;91(1):9-18. doi: 10.1016/s0162-0134(02)00461-0
20. Donovan A, Lima CA, Pinkus JL, Pinkus GS, Zon LI, Robine S, Andrews NC. The iron exporter ferroportin/Slc40a1 is essential for iron homeostasis. Cell Metab. 2005;1(3):191-200. doi: 10.1016/j.cmet.2005.01.003
21. Dostal A, Lacroix C, Bircher L, Pham VT, Follador R, Zimmermann MB, Chassard C. Iron modulates butyrate production by a child gut microbiota in vitro. mBio. 2015;6(6):e01453-15. doi: 10.1128/mBio.01453-15

22. Ezealigo US, Ezealigo BN, Aisida SO, Ezema FI. Iron oxide nanoparticles in biological systems: Antibacterial and toxicology perspective. *JCIS Open*. 2021;4:100027. doi: 10.1016/j.jciso.2021.100027
23. Farghali M, Andriamanohiarisoamanana FJ, Ahmed MM, Kotb S, Yamamoto Y, Iwasaki M, Yamashiro T, Umetsu K. Prospects for biogas production and H₂S control from the anaerobic digestion of cattle manure: The influence of microscale waste iron powder and iron oxide nanoparticles. *Waste Manag*. 2020;101:141-149. doi: 10.1016/j.wasman.2019.10.003
24. Fleming MD, Romano MA, Su MA, Garrick LM, Garrick MD, Andrews NC. Nramp2 is mutated in the anemic Belgrade (b) rat: Evidence of a role for Nramp2 in endosomal iron transport. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 1998;95(3):1148-1153. doi: 10.1073/pnas.95.3.1148
25. Fleming RE, Sly WS. Mechanisms of iron accumulation in hereditary hemochromatosis. *Annual Review of Physiology*. 2002;64:663-680. doi: 10.1146/annurev.physiol.64.081501.155838
26. Fuqua BK, Vulpe CD, Anderson GJ. Intestinal iron absorption. *J Trace Elem Med Biol*. 2012;26(2-3):115-119. doi: 10.1016/j.jtemb.2012.03.015
27. Gunshin H, Fujiwara Y, Custodio AO, Drenzo C, Robine S, Andrews NC. Slc11a2 is required for intestinal iron absorption and erythropoiesis but dispensable in placenta and liver. *J Clin Invest*. 2005;115(5):1258-1266. doi: 10.1172/JCI24356
28. Han YM, Yoon H, Lim S, Sung MK, Shin CM, Park YS, Kim N, Lee DH, Kim JS. Risk factors for Vitamin D, zinc, and selenium deficiencies in Korean patients with inflammatory bowel disease. *Gut Liver*. 2017;11(3):363-369. doi: 10.5009/gnl16333
29. Higashimura Y, Takagi T, Naito Y, Uchiyama K, Mizushima K, Tanaka M, Hamaguchi M, Itoh Y. Zinc deficiency activates the IL-23/Th17 Axis to aggravate experimental colitis in mice. *J Crohns Colitis*. 2020;14(6):856-866. doi: 10.1093/ecco-jcc/jjz193
30. Hoppe M, Onning G, Berggren A, Hulthen L. Probiotic strain *Lactobacillus plantarum* 299v increases iron absorption from an iron-supplemented fruit drink: A double-isotope cross-over single-blind study in women of reproductive age. *Br J Nutr*. 2015;114(8):1195-1202. doi: 10.1017/S000711451500241X
31. Jadhav P, Khalid ZB, Zularisam AW, Krishnan S, Nasrullah M. The role of iron-based nanoparticles (Fe-NPs) on methanogenesis in anaerobic digestion (AD) performance. *Environmental Research*. 2022;204(B):112043. doi: 10.1016/j.envres.2021.112043
32. Jaeggi T, Kortman GA, Moretti D, Chassard C, Holding P, Dostal A, Boekhorst J, Timmerman HM, Swinkels DW, Tjalsma H, et al. Iron fortification adversely affects the gut microbiome, increases pathogen abundance and induces intestinal inflammation in Kenyan infants. *Gut*. 2015;64:731-742. doi: 10.1136/gutjnl-2014-307720
33. Jiang L, Dong Y, Yuan Y, Zhou X, Liu Y, Meng X. Recent advances of metal-organic frameworks in corrosion protection: from synthesis to applications. *Chemical Engineering Journal*. 2021:1-66. doi: 10.1016/j.cej.2021.132823
34. Kianpour S, Ebrahiminezhad A, Negahdaripour M, Mohkam M, Mohammadi F, Niknezhad SV, Ghasemi Y. Characterization of biogenic Fe (III)-binding exopolysaccharide nanoparticles produced by *Ralstonia* sp. SK03. *Biotechnol Prog*. 2018;34(5):1167-1176. doi: 10.1002/btpr.2660
35. Laparra JM, Glahn RP, Miller DD. Assessing potential effects of inulin and probiotic bacteria on Fe availability from common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) to Caco-2 cells. *J Food Sci*. 2009;74(2):H40-H46. doi: 10.1111/j.1750-3841.2008.01027.x
36. Liu J, Vipulanandan C. Effects of Au/Fe and Fe nanoparticles on *Serratia* bacterial growth and production of biosurfactant. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*. 2013;33(7):3909-3915. doi: 10.1016/j.msec.2013.05.026
37. Lopez A, Cacoub P, Macdougall IC, Peyrin-Biroulet L. Iron deficiency anaemia. *The Lancet*. 2016;387(10021):907-916. doi: 10.1016/S0140-6736(15)60865-0
38. McKie AT, Barrow D, Launde-Dada GO, Rolfs A, Sager G, Mudaly E, Mudaly M, Richardson C, Barlow D, Bomford A, Peters TJ, Raja KB, Shirali S, Hediger MA, Farzaneh F, Simpson RJ. An

iron-regulated ferric reductase associated with the absorption of dietary iron. *Science*. 2001;291:1755-1759. doi: 10.1126/science.1057206

39. Miao J, Liao W, Pan Z, Wang Q, Duan S, Xiao S, Yang Z, Cao Y. Isolation and identification of iron-chelating peptides from casein hydrolysates. *Food Funct*. 2019;10(5):2372-2381. doi: 10.1039/c8fo02414f

40. Ngueagni PT, Kumar PS, Woumfo ED, Abilarasu A, Joshiba GJ, Femina Carolin C, Prasanamedha G, Fotsing PN, Siewe M. Effectiveness of a biogenic composite derived from cattle horn core/iron nanoparticles via wet chemical impregnation for cadmium (II) removal in aqueous solution. *Chemosphere*. 2021;272:129806. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.129806

41. Pajarillo EAB, Lee E, Kang D-K. Trace metals and animal health: Interplay of the gut microbiota with iron, manganese, zinc, and copper. *Animal Nutrition*. 2021;7(3):750-761. doi: 10.1016/j.aninu.2021.03.005

42. Pasricha SR, Tye-Din J, Muckenthaler MU, Swinkels DW. Iron deficiency. *The Lancet*. 2021;397(10270):233-248. doi: 10.1016/S0140-6736(20)32594-0

43. Pietrangelo A. Physiology of iron transport and the hemochromatosis gene. *Am J Physiol*. 2002;282(3):G403-G414. doi: 10.1152/ajpgi.00404.2001

44. Rehman AU, NazirS, IrshadR, TahirK, RehmanK, UIIslamR, Wahab Z. Toxicity of heavy metals in plants and animals and their uptake by magnetic iron oxide nanoparticles. *Journal of Molecular Liquids*. 2021;321:114455. doi: 10.1016/j.molliq.2020.114455

45. Saha P, Yeoh BS, Singh R, Chandrasekar B, Vemula PK, Haribabu B, Vijay-Kumar M, Jala VR. Gut microbiota conversion of dietary ellagic acid into bioactive phy-toceutical urolithin A inhibits heme peroxidases. *PloS One*. 2016;11(6):e0156811. doi: 10.1371/journal.pone.0156811

46. Schroeder BO, Backhed F. Signals from the gut microbiota to distant organs in physiology and disease. *Nat Med*. 2016;22:1079-1089. doi: 10.1038/nm.4185

47. Schüemann K, Elsenhans B, Forth W. Kinetic analysis of ⁵⁹Fe movement across the intestinal wall in duodenal rat segments ex vivo. *Am J Physiol*. 1999;276(2):431-440. doi: 10.1152/ajpgi.1999.276.2.G431

48. Suttle N. Ruminant nutrition – digestion and absorption of minerals and vitamins. Reference Module in Food Science. 2016. doi: 10.1016/B978-0-08-100596-5.00964-1

49. Talankova-Sereda TE, Lyapina KV, Shkopinsky EA, Ustinov AI, et al. Influence of Cu and Co nanoparticles on growth characteristics and biochemical structure of *Mentha longifolia* in vitro. In: Fesenko O, Yatsenko L, editors. *Nanophysics, nanophotonics, surface studies and applications*. Springer Proceedings in Physics. Springer, Cham. 2016;183:427-436. doi: 10.1007/978-3-319-30737-4_36

50. Takehiko T, Rabindra KB, Elizabeth CT. Ferritin ion channel disorder inhibits Fe(II)/O₂ reactivity at distant sites. *Inorg Chem*. 2012;51(21):11406-11. doi: 10.1021/ic3010135. Epub 2012 Oct 23

51. Tsolis RM, Baumler AJ, Heffron F, Stojiljkovic I. Contribution of TonB- and Feo- mediated iron uptake to growth of *Salmonella typhimurium* in the mouse. *Infect Immun* 1996;64(11):4549e56. doi: 10.1128/IAI.64.11.4549-4556.1996

52. Vega-Bautista A, de la Garza M, Carrero JC, Campos-Rodriguez R, Godinez-Victoria M, Drago-Serrano ME. The impact of lactoferrin on the growth of in-testinal inhabitant bacteria. *Int J Mol Sci*. 2019;20(19):4707. doi: 10.3390/ijms20194707

53. Zimmermann MB, Chassard C, Rohner F, N'Goran EK, Nindjin C, Dostal A, Utzinger J, Ghattas H, Lacroix C, Hurrell RF. The effects of iron fortification on the gut microbiota in African children: a randomized controlled trial in Cote d'Ivoire. *Am J Clin Nutr*. 2010;92(6):1406-1415. doi: 10.3945/ajcn.110.004564

54. Zoller H, Weiss G, Theurl I, Koch RO, Vogel W, Obrist P, Pietrangelo A, Montosi G, Haile DJ. Expression of the duodenal iron transporters divalent-metal transporter 1 and ferroportin 1 in iron deficiency and iron overload. *Gastroenterology*. 2001;120(6):1412-1419. doi: 10.1053/gast.2001.24033

Информация об авторах:

Оксана Вячеславовна Шошина, аспирант 2-го года обучения, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29.

Святослав Валерьевич Лебедев, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории биологических испытаний и экспертиз, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8-912-345-87-38.

Елена Владимировна Шейда, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории биологических испытаний и экспертиз, Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук, 460000, г. Оренбург, ул. 9 Января, 29, тел.: 8-9228-62-64-02.

Information about the authors:

Oksana V Shoshina, 2st year postgraduate student, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 460000, Orenburg, 29, 9 Yanvarya St., tel.: 8-987-891-96-55.

Svyatoslav V Lebedev, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, Biological Tests and Examinations, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 460000, Orenburg, 29, 9 Yanvarya St., tel.: 8-912-345-87-38.

Elena V Sheyda, Cand. Sci (Biology), Researcher, Biological Tests and Examinations, Federal Research Centre of Biological Systems and Agrotechnologies of the Russian Academy of Sciences, 460000, Orenburg, 29, 9 Yanvarya St., tel.: 8-922-862-64-02.

Статья поступила в редакцию 26.10.2021; одобрена после рецензирования 15.11.2021; принята к публикации 13.12.2021.

The article was submitted 26.10.2021; approved after reviewing 15.11.2021; accepted for publication 13.12.2021.