



Поступление железа с питьевой водой в организм человека: биодоступность, кинетика, метаболизм (литературный обзор)

И.А. Хлыстов, П.К. Харьковская, В.Б. Гурвич, Т.В. Бушуева, Р.Р. Сахаутдинова

ФБУН «Екатеринбургский медицинский-научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий», ул. Попова, д. 30, г. Екатеринбург, 620014, Российская Федерация

Резюме

Введение. Проблема железодефицитной анемии остается актуальной и приоритетной. В настоящее время железодефицитная анемия диагностируется у 30 % мирового населения. Анализ причин анемии зачастую не учитывает ряд факторов, оказывающих влияние на биодоступность элемента.

Цель исследования: обзор литературных данных по вопросам питьевого поступления железа, его биологической доступности, кинетики и метаболизма в организме человека.

Материалы и методы. В обзор входили российские и зарубежные источники по библиотекам Google, Google Scholar, Scopus, Springer, PubMed, Wiley, eLIBRARY, КиберЛенинка, StudMed. Глубина поиска охватывала период 1973–2024 гг., с преимущественным выбором источников не старше 10 лет. Ключевые слова: содержание и формы железа в воде, химические реакции, биодоступность и метаболизм железа, синергизм и антагонизм элементов. Из 250 первоначальных источников было отобрано 46 работ. Критерии исключения: обзорные статьи и материалы, не соответствующие цели исследований.

Результаты. С питьевой водой поступает до 44 % железа. Одним из факторов развития железодефицитной анемии выступает низкое содержание железа в питьевой воде и продуктах питания. Биодоступность элемента зависит от его формы, валентности, присутствия хелатирующих соединений и других микроэлементов. Количество железа в организме регулируется посредством кишечной абсорбции, транспорта, хранения, мобилизации и выведения. Некоторые микроэлементы могут конкурировать за пути всасывания железа. В присутствии большого числа микроэлементов могут нарушаться молекулярные механизмы, ответственные за абсорбцию, транспорт и включение железа в структуру гема.

Заключение. По результатам проведенного обзора был установлен ряд факторов, способствующих развитию дефицита железа у человека. Выявлен недостаток эпидемиологических данных о причинах возникновения железодефицитных состояний в связи с экспозицией воды различного состава на определенные группы людей, недостаточно расшифрованы биохимические и кинетические механизмы процессов усвоения организмом железоорганических соединений и совместного влияния металлов на метаболизм этого элемента.

Ключевые слова: железо, питьевая вода, биодоступность железа, железодефицитная анемия, микроэлементы.

Для цитирования: Хлыстов И.А., Харьковская П.К., Гурвич В.Б., Бушуева Т.В., Сахаутдинова Р.Р. Поступление железа с питьевой водой в организм человека: биодоступность, кинетика, метаболизм (литературный обзор) // Здоровье населения и среда обитания. 2025. Т. 33. № 2. С. 63–71. doi: 10.35627/2219-5238/2025-33-2-63-71

Iron Intake with Drinking Water: Bioavailability, Kinetics, and Metabolism in Humans: A Literature Review

Ivan A. Khlystov, Polina K. Kharkovskaya, Vladimir B. Gurvich, Tatiana V. Bushueva, Renata R. Sakhautdinova
Yekaterinburg Medical Research Center for Prophylaxis and Health Protection in Industrial Workers, 30 Popov Street,
Yekaterinburg, 620014, Russian Federation

Summary

Introduction: The issue of iron deficiency anemia remains relevant and a priority. Currently, it is diagnosed in 30 % of the world population. The analysis of its causes often disregards a whole number of factors affecting iron bioavailability.

Objective: To review publications on the iron intake with drinking water, its bioavailability, kinetics, and metabolism in humans.

Materials and methods: The search for Russian and foreign papers published in 1973–2024, with a preference given to those issued over the past 10 years, was performed in the Google, Google Scholar, Scopus, Springer, PubMed, Wiley, eLIBRARY, CyberLeninka, and StudMed databases using the following keywords: iron content and forms in water, chemical reactions, iron bioavailability and metabolism, synergism and antagonism of elements. Of 250 publications originally found, we selected 46 papers having excluded review articles and those noncompliant with the purpose of the review.

Results: We established that up to 44 % of dietary iron comes with drinking water. Low iron levels in drinking water and food products are among the factors contributing to iron deficiency anemia. Iron bioavailability depends on its form, valence, combined exposure to chelating compounds and other trace elements. Iron levels in humans are regulated by intestinal absorption, transport, storage, mobilization, and excretion. Some trace elements can compete for pathways of iron absorption. In the presence of their multitude, molecular mechanisms responsible for the absorption, transport and incorporation of iron into the heme structure can be disrupted.

Conclusions: The findings helped identify a number of factors contributing to iron deficiency in humans. We revealed a lack of epidemiological data on the causes of iron deficiency disorders in certain population groups related to drinking water of varied composition. Besides, the biochemical and kinetic mechanisms of absorption of organoiron compounds and the combined effect of trace metals on the metabolism of this element have not been fully established.

Keywords: iron, drinking water, iron bioavailability, iron deficiency anemia, microelements.

Cite as: Khlystov IA, Kharkovskaya PK, Gurvich VB, Bushueva TV, Sakhautdinova RR. Iron intake with drinking water: Bioavailability, kinetics, and metabolism in humans: A literature review. *Zdorov'e Naseleniya i Sreda Obitaniya*. 2025;33(2):63–71. (In Russ.) doi: 10.35627/2219-5238/2025-33-2-63-71

Введение. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), железодефицитная анемия (ЖДА) является наиболее распространенной формой алиментарного дефицита в мире, которой страдают порядка 30 % населения, в частности 40 % беременных и 42 % детей [1]¹. В Российской Федерации существуют объективные сложности сбора статистических данных по частоте выявленных случаев анемии. По данным Росстата, в 2020 г. анемия была зарегистрирована у 1406,8 тыс. человек, в том числе у 35,5 % женщин после беременности, а среди детей до 14 лет анемия в 2020 г. была выявлена у 214,6 тыс. человек². Как правило, железодефицитные состояния связаны с патологиями желудочно-кишечного тракта, в особенности кишечными кровотечениями, менструальным циклом, наследственными заболеваниями крови (в том числе нарушением экспрессии гена эритроферрона), хронической болезнью почек, инфекционными заболеваниями (малярия, гельминтозы), метаболическими нарушениями и дефицитом питательных веществ [2–5].

Доля поступления железа в организм с питьевой водой достигает до 34–44 % [6, 7]. В ряде случаев питьевая вода может выступать одним из факторов развития ЖДА. Так, при содержании железа в воде < 2 мг/дм³ риск развития анемии у детей возрастом от 12 до 23 месяцев был в 1,51 раза выше по сравнению с группами, потребляющими воду с содержанием железа ≥ 2 мг/дм³ [8]. Хронический дефицит железа в организме детей 14–17 лет возникает и при повышенном содержании железа в питьевой воде (до 2,7 ПДК). Однако данное состояние связывали с недостаточным поступлением биодоступного железа из пищевых продуктов [9]. Было показано увеличение рисков развития дефицита железа у мужчин в 1,55 раза и у женщин в 1,20 раза с увеличением жесткости воды [10]. Зачастую в работах лишь констатируется факт наличия связи между составом воды, в частности содержанием железа, и вероятностью появления болезни. В целом прослеживается недостаток эпидемиологических данных о причинах возникновения ЖДА в связи с экспозицией воды различного состава на определенные группы людей.

Способность железа к усвоению в организме зависит от химической формы, в которой находится элемент [11], а также от присутствия в отделах желудочно-кишечного тракта ряда соединений – усилителей и ингибиторов его всасывания [12]. Имеется ряд работ [7, 13], посвященных изучению особенностей метаболизма железа в присутствии других металлов. Несмотря на это, причины железодефицитных состояний остаются малоизученными, не всегда учитывается форма поступающего элемента, множественное влияние других веществ и элементов на его усвоение и обмен.

Цель исследования – обзор литературных данных по вопросам питьевого поступления железа, его биологической доступности, кинетики и метаболизма в организме человека.

Материалы и методы. Поиск электронных российских и иностранных (англоязычных) источников осуществлен по интернет-библиотекам и поисковым системам Google, Google Scholar, Scopus, Springer, PubMed, Wiley, eLIBRARY, КиберЛенинка, StudMed. Научные публикации входили в журналы, индексируемые в российских и международных информационно-аналитических системах научного цитирования: РИНЦ, Google Scholar, Scopus, КиберЛенинка, Mendeley, а также в журналах Q1–Q4 квартилей, индексируемых Web of Science и Scopus.

Поиск публикаций в российских источниках включал ключевые слова: железодефицитная анемия, содержание и формы железа в воде, метаболизм железа, биодоступность железа, синергизм и антагонизм элементов в организме. Поиск публикаций в международных базах и поисковых системах включал ключевые слова: iron bioavailability, iron deficiency anemia, iron metabolism and absorption, Fenton reaction, iron chelation, iron balance in the body, iron metabolic pathways. Глубина поиска составляла 1973–2024 гг.; преимущественно отбирались источники не старше 10 лет. Журнальные статьи содержали исключительно результаты экспериментальных (оригинальных) исследований. Критерии для включения источников более раннего периода издания: наличие результатов фундаментальных исследований, описания методик и справочных данных. Из 250 первоначальных источников было отобрано 46 работ. В перечень литературы не вошло 10 источников, представленных в сносках.

Критериями исключения были: публикации, относящиеся к обзорным статьям и не содержащие оригинальные исследования, а также не соответствующие цели исследований.

Результаты. Представленный обзор посвящен анализу литературных данных по вопросам вклада питьевого пути в обеспечение организма человека железом, форм нахождения этого элемента в водоемах, химических и биохимических реакций с участием данного элемента, факторов его биодоступности, метаболизма и раскрывает вероятные причины развития ЖДА.

Формы железа в природных водах. В природных водах находятся соединения двухвалентного (закисного) и трехвалентного (окисного) железа. В грунтовых водах часто содержится бикарбонат закиси железа Fe(HCO₃)₂. В поверхностных водах железо также содержится в виде органических комплексных соединений (например, гуминовое железо в речных водах болотного питания) или в виде труднорастворимого гидрата окиси железа Fe(OH)₃, частицы которого могут иметь различную

¹ World Health Organization. WHO guidance helps detect iron deficiency and protect brain development. Published on April 20, 2020. [Электронный ресурс.] Режим доступа: <https://www.who.int/ru/news/item/20-04-2020-who-guidance-helps-detect-iron-deficiency-and-protect-brain-development> (дата обращения: 22.01.2025).

² Ведение пациентов с железодефицитной анемией на этапе оказания первичной медико-санитарной помощи. Практическое руководство. Драпкина О.М., Авалуева Е.Б., Бакулин И.Г., Виноградова М.А. и др. М.: РОПНИЗ, ООО «СилицияПолиграф», 2022. 88 с. [Электронный ресурс.] Режим доступа: org.gnicpm.ru/wp-content/uploads/2024/01/18-mr-novoe.pdf (дата обращения: 04.12.2024).

<https://doi.org/10.35627/2219-5238/2025-33-2-63-71>
Review Article

степень дисперсности [14]. Присутствие железа в растворимой или нерастворимой форме обусловлено свойствами и компонентами воды, такими как pH, карбонаты, диоксид углерода, растворенный кислород, сероводород и микроорганизмы, окисляющие либо восстанавливающие элемент³. Концентрация железа выше 1–2 мг/дм³ значительно ухудшает органолептические свойства питьевой воды, придавая ей неприятный вяжущий вкус, и делает воду малоприспособленной для использования, даже в технических целях [15]. Растворенное железо представлено соединениями, находящимися в ионной форме, в виде гидроксокомплексов и комплексов с растворенными неорганическими и органическими веществами природных вод. В ионной форме мигрирует главным образом Fe(II), а Fe(III) в отсутствие комплексообразующих веществ не может в значительных количествах находиться в растворенном состоянии⁴.

Предельно допустимая концентрация (ПДК) железа составляет 0,3 мг/дм³, лимитирующий показатель вредности – органолептический⁵. Согласно справочным данным, средняя концентрация железа в проточных водоемах может достигать 0,7 мг/дм³. В подземных водах, где железо находится в форме железа (II), концентрации обычно составляют 0,5–10 мг/дм³, но иногда могут доходить до 50 мг/дм³. Концентрация железа в питьевой воде обычно составляет менее 0,3 мг/дм³, однако она может повышаться в результате применения солей железа в качестве коагулянтов при водоподготовке, а также при использовании труб из чугуна, стали и оцинкованного железа⁶. Повышенные концентрации железа в питьевой воде могут быть обусловлены сроком эксплуатации системы водоснабжения [16]. По данным Государственного доклада, загрязнение питьевой воды железом входит в число приоритетных факторов, приводящих к развитию различных заболеваний органов и систем⁷. В частности, вода поверхностных источников водоснабжения Свердловской области характеризуется повышенным природным содержанием гуминовых веществ, влияющих на показатели: цветность, мутность воды, содержание железа, марганца и образование хлорорганических соединений; железо входит в число приоритетных загрязнителей питьевой воды⁸.

Реакции с участием железа в водоемах и *in vivo*. Железо в организме является наиболее распространенным катализатором образования свободных радикалов и окислительного стресса, которые участвуют в повреждении тканей при большинстве патологических состояний, возник-

новении и прогрессировании рака, нейродегенерации и многих других заболеваниях [17]. В 1890-х годах Генри Джон Хорстман Фентон обнаружил окислительно-восстановительную реакцию между Fe(II) и перекисью водорода (H₂O₂) с образованием гидроксильного радикала (•OH) и других реактивных форм кислорода, называемую реакцией Фентона [18]. Данная реакция происходит как в естественных условиях, так и внутри аэробных организмов [19].

Во время активации пероксида водорода H₂O₂ ионами Fe(II) образуются ионы Fe(III) и •OH (рисунк). В свою очередь, окисленный ион Fe(III) вступает в реакцию с H₂O₂ и образует Fe(II). Далее следует цепь реакций с участием Fe(II, III) и H₂O₂, приводящая к образованию различных реактивных интермедиатов [20]. H₂O₂ и Fe(II) могут приводить к разрушению растворенных органических веществ в воде [21].

В организме человека реакция Фентона регулирует связанные с гомеостазом процессы, но ее продукты вызывают окислительное повреждение клеток [18]. Как было установлено, эта реакция играет ключевую роль в окислении мембранных липидов, окислении аминокислот и в реакциях, где присутствуют биологические восстановители, такие как аскорбиновая кислота или тиолы. Образующийся в ходе реакции супероксидный радикал может восстанавливать и высвобождать Fe³⁺ из ферритина или высвобождать Fe²⁺ из кластеров «железо – сера». Предполагается, что появление заболеваний сердца, таких как ишемическая болезнь и реперфузионный синдром миокарда, сопровождается возникновением реакции Фентона [19].

В водоемах присутствуют различные соединения, обладающие комплексообразующими

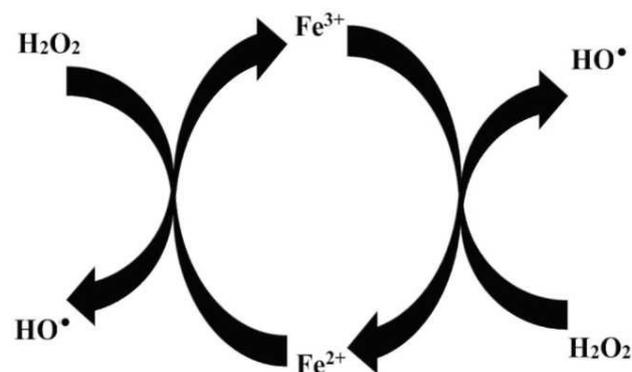


Рисунок. Механизм образования гидроксильного радикала в реакции Фентона

Figure. The mechanism of hydroxyl radical generation in the Fenton reaction

³ Унифицированные методы анализа вод. Издание 2-е, исправленное. Под ред. д-ра хим. наук Ю.Ю. Лурье. М.: «Химия», 1973. 376 с.

⁴ Логинова Е.В., Лопух П.С. Гидроэкология. Курс лекций. Минск: БГУ, 2011. 258 с.

⁵ СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

⁶ Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda. Geneva: World Health Organization; 2022. [Электронный ресурс.] Режим доступа: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064> (дата обращения: 22.01.2024).

⁷ О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2023 году: Государственный доклад. Москва: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2024. – 364 с. [Электронный ресурс.] Режим доступа: https://rospotrebnadzor.ru/documents/details.php?ELEMENT_ID=27779 (дата обращения: 22.01.2025).

⁸ О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Свердловской области в 2023 году: Государственный доклад – Екатеринбург: Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Свердловской области, 2024 – 262 с. [Электронный ресурс.] Режим доступа: https://www.66.rospotrebnadzor.ru/c/document_library/get_file?uuid=0432a3c6-299e-4329-b142-7d28a40c1c76&groupId=10156 (дата обращения: 22.01.2025).

и хелатирующими свойствами по отношению к поливалентным металлам, в частности железу [22, 23], что влияет на их подвижность и биодоступность [24]. В биологических системах ионы металлов всегда связаны с лигандами – донорами электронов, такими как кислород, азот и сера. Ионы металлов в форме комплексов лигандов и хелаторов участвуют практически во всех биохимических, метаболических, токсикологических процессах [17].

Поступление железа в организм и факторы, влияющие на его усвоение. Согласно данным ВОЗ, средняя доля поступления микроэлементов с питьевой водой составляет от 1 до 20 % [7]. По сравнению с другими металлами, железо занимает промежуточное положение по вкладу поступления в организм с питьевой водой [16].

Основными формами поступающего в организм человека железа выступают: негемовое железо в виде двухвалентного (Fe^{2+}) и трехвалентного железа (Fe^{3+}), а также гемовое железо. Ионные формы, как правило, характерны для воды. Негемовое железо также поступает с растительными продуктами, а гемовое – с продуктами питания животного происхождения [11]. В целом биодоступность Fe^{2+} несколько выше, чем у трехвалентного железа Fe^{3+} , причем более растворимые соли обладают большей биодоступностью, чем менее растворимые. Гемовое железо (Fe^{2+}), не связанное с гемоглобином и миоглобином, всасывается более эффективно, чем негемовое железо; при этом всасывание гемового железа не ограничивается механизмом контроля всасывания железа в кишечнике [25]. Железо мобилизуется из пищи в кислой среде желудка путем хелатирования с муцинами, аскорбатом, гистидином, фруктозой и т. д. [11, 12].

Хелатирование позволяет сохранить растворимость железа при его поступлении в щелочную среду двенадцатиперстной кишки из кислой среды желудка [11]. Полифенолы, фитины, танины, оксалаты, соли кальция и фосфора, дубильные вещества, пищевые волокна, некоторые медикаменты зачастую затрудняют усвоение железа [12, 26, 27]. Полифенолы регулируют всасывание и метаболизм железа несколькими способами. Во-первых, потребление продуктов или напитков, богатых полифенолами, ограничивает всасывание негемового железа из рациона. Флавоноиды, такие как силимарин, куркумин и кверцетин, обладают способностью хелатирования железа. В частности, полифенол чая, эпигаллокатехин-3-галлат, ингибирует всасывание железа в кишечнике, уменьшая базолатеральный экспорт железа в клетки [28]. Имеются данные о кинетике и метаболизме соединений железа с аминокислотами, используемых в терапии дефицитных состояний [29]. Было обнаружено, что степень всасывания железа из водных растворов, содержащих 15 мг/дм^3 элементарного железа в виде бисглицинового хелата железа и аскорбата железа, была практически одинаковой (34,6 и 29,9 % соответственно) [30]. Взаимодействие железа и железосодержащих белков с пищевыми продуктами и молекулами ксенобиотиков, включая лекарственные препараты, может влиять на

метаболизм железа и патологические процессы. Деферипрон, дефероксамин, деферазирокс и другие хелатирующие препараты используются при детоксикации тяжелых металлов, лечении большинства заболеваний, связанных с метаболизмом железа, включая избыток и дефицит железа, нейродегенерацию и рак, а также нарушений, связанных с воздействием свободных радикалов [17].

Метаболизм железа. В течение своей жизни человек усваивает от 25 до 50 г пищевого железа. Взрослые мужчины потребляют ~ 8,7 мг железа в день, а взрослые женщины до 50 лет ~ 14,8 мг в день (после 50 ~ 8,7 мг), чтобы компенсировать потерю железа во время менструации, беременности и кормления грудью. В организме взрослого человека содержится около 3–5 г железа, 75–80 % из этой массы входит в состав гемоглобина, 5–10 % включено в состав миоглобина, 1 % – в дыхательных ферментах, катализирующих процессы дыхания в клетках и тканях, 25 % – депонировано преимущественно в печени и мышцах, а также в селезенке и костной ткани [31].

Количество железа в организме регулируется, главным образом, посредством кишечной абсорбции, транспорта, хранения (главным образом в печени), мобилизации и потери [25]. Дефицит железа будет развиваться при поступлении в организм менее 1 мг/сутки. Резорбция железа по разным данным составляет от 3 до 35 % от его поступления. Порог токсичности железа – 200 мг/сутки. Летальная доза для человека – 7000–35000 мг [13]. Основное место всасывания железа – двенадцатиперстная кишка и проксимальный отдел тощей кишки [12, 32]. В тонком кишечнике эволюционно предусмотрены биохимические механизмы, позволяющие усваивать три формы железа – гем, трехвалентное и двухвалентное железо [11]. Регуляция всасывания железа – очень важный для организма процесс, он контролируется печеночным гормоном гепсидином, так как у человека отсутствуют механизмы для активного выведения избыточного количества данного микроэлемента. Транспорт и депонирование осуществляется специальными белками – ферропортином, гепестином, трансферрином, ферритином [33, 34]. На сегодня известно около 20 видов белков, участвующих в метаболизме железа [35].

Железо обладает высокой кумулятивной способностью с периодом полувыведения из организма до 5,5 года. Выведение железа из организма может происходить за счет десквамации покровных тканей (кишечника, кожи) и выделения с биологическими жидкостями (моча, пот, желчь), а также при кровотечениях разного рода [13, 36]. Железо биохимически более активно в растворенной форме по сравнению с кристаллической [37]. Пищевое железо не способно негативно воздействовать на человеческий организм, в то время как неорганическое обладает иммунодепрессантными свойствами [36]. Связь развития нейродегенерации с уровнем железа в организме еще изучается. Известен факт, что развитие нейродегенеративных заболеваний связано с аномалиями распределения железа в тканях головного мозга. С одной стороны, перегрузка

железом может вызвать аутоотоксическую цепь, приводящую к нейродегенерации, но в то же время, гибель нейронов также связана с дефицитом железа [38]. Железо постепенно накапливается с возрастом, в результате чего активизируются процессы старения на клеточном уровне. Избыток металла приводит к дисфункции органов, за счет выработки активных форм кислорода, что приводит к повреждению печени, диабету, сердечно-сосудистым заболеваниям, эндокринной дисфункции, нейродегенерации и глазным заболеваниям [39].

Взаимосвязь метаболизма железа и других микроэлементов. Микроэлементы в организме работают параллельно и в то же время взаимодействуют друг с другом [40], проявляют антагонистические или синергетические эффекты [7, 41]. Дисбаланс хотя бы одного металла запускает механизм перестройки метаболизма других металлов. Эволюционно в живом организме созданы уникальные взаимосвязи микроэлементов. Например, в младенческом возрасте плохо регулируется всасывание хрома, железа, цинка, механизмы регулирования этих микроэлементов устанавливаются с увеличением зрелости кишечника. Эффективность абсорбции меди и цинка снижается в пожилом возрасте, тогда как абсорбция хрома и селена не меняется [7]. Микроэлементы, активно участвующие в регуляции обменных процессов в организме человека, можно условно разделить на элементы с низкой и высокой гомеостатической емкостью. Железо относится к элементам с установленной минимальной гомеостатической емкостью, дополнительно уменьшающейся с возрастом. К элементам с минимальной гомеостатической емкостью относятся также P, Zn, Cu, Se, Cr, J. К элементам с высокой гомеостатической емкостью относятся Pb, Cd, Be, As, Ti, U. Дефицит или дисбаланс Fe, P, Zn, Cu, Se, Cr, J приводит к накоплению Pb, Cd, Be, As, Ti, U [13].

Дисбаланс железа в организме, его избыток или недостаток, способствует повышенному накоплению токсичных металлов – свинца, марганца, кобальта, цинка, стронция, кадмия, меди, алюминия, скандия и др. [31]. Исследования взаимодействия металлов показывают, что некоторые из них могут конкурировать за пути всасывания железа в кишечнике. К таким металлам относятся Pb, Mn, Co, Zn. Из этой группы металлов свинец является особенно опасным элементом для метаболизма железа. Свинец поглощается транспортером двухвалентного металла 1 (DMT1) и вторично блокирует усвоение железа посредством конкурентного ингибирования. В районах с интенсивно развитой промышленностью дефицит железа часто сопровождается интоксикацией свинцом, что приводит к серьезным медицинским осложнениям, особенно у детей [42]. Кроме того, свинец препятствует ряду важных железозависимых метаболических этапов, таких как биосинтез гема [42, 43].

Повышенное содержание кадмия в организме способствует развитию анемии, вызванной усилением распада эритроцитов и снижением усвоения железа в кишечнике. Кадмий может влиять на транспорт ионов железа в кишечнике. С другой

стороны, концентрация кадмия в крови значительно повышена у лиц с дефицитом железа в организме, что говорит об увеличении абсорбции кадмия при этом состоянии [31]. Дефицит микронутриентов, а именно цинка, меди, кобальта и никеля у пациентов с ЖДА может привести к формированию так называемого функционального дефицита железа. Предположительно, нарушаются молекулярные механизмы, обеспечиваемые микроэлементами, отвечающими за абсорбцию, транспорт и включение в структуру гема железа. Это одна из возможных причин низкой эффективности монотерапии препаратами железа [44]. А.В. Скальным и соавт. установлено, что с увеличением концентрации какого-либо металла во внешней среде растет концентрация элемента в живом организме. При накоплении микроэлемента до предельных для организма величин включаются защитные механизмы регуляции концентрации поступающего избытка химического вещества. Это происходит различными путями – снижение абсорбции и/или усиление экскреции и/или кумуляция в организме, например в жировой ткани [13].

Обсуждение. Железо является распространенным компонентом природных вод, а форма его нахождения зависит от множества химических и микробиологических факторов. Железо обладает высокой химической и биохимической активностью. Существует процесс, одновременно происходящий как в условиях окружающей среды, так внутри организма – это реакция Фентона [18, 19].

Организмом человека железо усваивается в ионной, или негемовой, форме (Fe^{2+} , Fe^{3+}), а также в форме гема. Однако присутствие хелатирующих компонентов влияет на процессы всасывания, биодоступность и дальнейший метаболизм этого металла. Неотъемлемой особенностью железа является участие в процессах всасывания, транспорта, депонирования в течение всей жизни человека. Существуют регуляторные процессы контроля и выделения этого элемента из организма. Установлена связь накопления железа с возрастом и развитием некоторых патологий. Все эти факторы являются основополагающими в развитии железодефицитных состояний.

В большинстве научных источников констатируется факт изменения содержания и соотношения металла(-ов) в организме в ответ на поступление извне. Также мало внимания уделяется вопросам взаимодействия железа и других металлов с белками и другими компонентами в организме. Многие факторы могут влиять на структуру и биохимические функции белковых или небелковых комплексов железа *in vivo*, что приводит к изменениям биологической активности металла. К числу таких факторов могут относиться хелаторы, ионы металлов, анионы, свободные радикалы и другие реактивные формы кислорода, азота и т. д. Аналогичным образом некоторые изменения в структуре металлического комплекса могут влиять на функцию и метаболические пути ионов металлов и связанных с ними процессов. В этом контексте многие молекулы с хелатирующими свойствами или иными формами

связей с металлами могут влиять на все процессы, связанные с их участием [17].

Вместе с тем имеется лишь небольшое количество работ, посвященных изучению механизмов множественного, в том числе конкурентного, взаимодействия микроэлементов друг с другом и с биологическими молекулами. Из всей доступной научной литературы данные вопросы в значительной степени раскрыты в фундаментальных исследованиях А.В. Скального [13]^{9,10}. Влияние микроэлементов на обмен железа, как правило, выражается в конкуренции за его всасывание, блокирование усвоения, нарушение железосвязанных метаболических процессов и включение в структуру биологических молекул, в том числе за счет хелатирования. В последнее время активно проводятся исследования по изучению образования металлсодержащих структур, или кластеров металлов, в частности железа, с органическими молекулами и элементами [45, 46]. Вероятнее всего, продолжение работы в данном направлении будет способствовать более полному пониманию обмена, биодоступности и процессов взаимодействия металлов в организме.

Заключение. Железо является распространенным компонентом природных вод, а форма его нахождения зависит от множества химических и микробиологических факторов. С питьевой водой человек получает до 44 % железа от общего рациона питания. Установлено развитие ЖДА как при низком уровне железа в питьевой воде (< 2 мг/дм³), так и при высоком (до 2,7 ПДК). Дополнительные факторы, способствующие развитию ЖДА: физиологические особенности организма и патологические состояния, включающие инфекционные и неинфекционные заболевания, нахождение железа в биологически малодоступных формах, ингибирование всасывания, изменения биодоступности железа вследствие конкурентных взаимодействий с другими микроэлементами и хелатерами. Требуется проведение более детальных эпидемиологических исследований для установления связи состава воды с развитием дефицитных состояний, изучения формирования, биодоступности и метаболизма железосодержащих хелатных соединений, углубленное изучение механизмов множественного обмена микроэлементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kumar A, Sharma E, Marley A, Samaan MA, Brookes MJ. Iron deficiency anaemia: Pathophysiology, assessment, practical management. *BMJ Open Gastroenterol.* 2022;9(1):000759. doi: 10.1136/bmjgast-2021-000759
2. Stein J, Connor S, Virgin G, Ong DE, Pereyra L. Anemia and iron deficiency in gastrointestinal and liver conditions. *World J Gastroenterol.* 2016;22(35):7908-7925. doi: 10.3748/wjg.v22.i35.7908
3. Shokrgozar N, Golafshan HA. Molecular perspective of iron uptake, related diseases, and treatments. *Blood Res.* 2019;54(1):10-16. doi: 10.5045/br.2019.54.1.10
4. Ataide R, Fielding K, Pasricha SR, Bennett C. Iron deficiency, pregnancy, and neonatal development. *Int J Gynaecol Obstet.* 2023;162(Suppl 2):14-22. doi: 10.1002/ijgo.14944
5. Gafter-Gvili A, Schechter A, Rozen-Zvi B. Iron deficiency anemia in chronic kidney disease. *Acta Haematol.* 2019;142(1):44-50. doi: 10.1159/000496492
6. National Research Council. *Drinking Water and Health: Volume 3.* Washington, DC: The National Academies Press; 1980. doi: 10.17226/324
7. World Health Organization. *Trace Elements in Human Nutrition and Health.* Geneva: WHO; 1996. Accessed November 15, 2024. <https://www.who.int/publications/item/9241561734>
8. Choudhury N, Siddiqua TJ, Ahmed SMT, et al. Iron content of drinking water is associated with anaemia status among children in high groundwater iron areas in Bangladesh. *Trop Med Int Health.* 2022;27(2):149-157. doi: 10.1111/tmi.13710
9. Ковальчук В.К. Оценка фактического потребления железа подростковым населением в регионе с повышенным содержанием железа в питьевой воде // Экология человека. 2015. Т.5. С. 8-13.
10. Rigas AS, Ejsing BH, Sørensen E, et al. Calcium in drinking water: Effect on iron stores in Danish blood donors – Results from the Danish Blood Donor Study. *Transfusion.* 2018;58(6):1473. doi: 10.1111/trf.14600
11. Conrad ME, Umbreit JN. Iron absorption and transport – An update. *Am J Hematol.* 2020;64(4):287-298. doi: 10.1002/1096-8652(200008)64
12. Piskin E, Cianciosi D, Gulec S, Tomas M, Capanoglu E. Iron absorption: Factors, limitations, and improvement methods. *ACS Omega.* 2022;7(24):20441-20456. doi: 10.1021/acsomega.2c01833
13. Скальный А.В. Химические элементы в физиологии и экологии человека. М.: Издательский дом «ОНИКС 21 век», 2004. 216 с.
14. Лапотьшикина Н.П., Сазонов Р.П. Водоподготовка и водно-химический режим тепловых сетей. М.: Энергоиздат, 1982. 200 с.
15. Кутергин А.С., Недобух Т.А. Применение алюмосиликатного сорбента для очистки природных вод от тяжелых металлов // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 3. С. 19–23. doi: 10.18412/1816-0395-2020-3-19-23
16. Ковшов А.А., Новикова Ю.А., Федоров В.Н., Тихонова Н.А. Оценка рисков нарушений здоровья, связанных с качеством питьевой воды, в городских округах арктической зоны Российской Федерации // Вестник уральской медицинской академической науки. 2019. Т. 16(2). С. 215–222. doi: 10.22138/2500-0918-2019-16-2-215-222
17. Kontoghiorghes GJ, Kontoghiorghes CN. Iron and chelation in biochemistry and medicine: New approaches to controlling iron metabolism and treating related diseases. *Cells.* 2020;9(6):1456. doi: 10.3390/cells9061456
18. Abe C, Miyazawa T, Miyazawa T. Current use of Fenton reaction in drugs and food. *Molecules.* 2022;27(17):5451. doi: 10.3390/molecules27175451
19. Barbusiński K. Fenton reaction – Controversy concerning the chemistry. *Ecol Chem Eng.* 2009;16(3):347-358.
20. Исаев А.Б., Магомедова А.Г. Новые технологии очистки сточных вод от красителей на основе окислительных процессов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2022. Т. 63(4). С. 247–268.
21. Li H, Ding S, Song W, Wang X, Ding J, Lu J. The degradation of dissolved organic matter in black and odorous water by humic substance-mediated Fe(II)/

⁹ Скальный А.В. Микроэлементозы человека: гигиеническая диагностика и коррекция // Микроэлементы в медицине. 2000. Т. 1. № 1. С. 2–8.

¹⁰ Скальный А.В. Микроэлементозы человека (диагностика и лечение). Практическое руководство для врачей и студентов медицинских вузов. М.: КМК, 1999. 96 с.

<https://doi.org/10.35627/2219-5238/2025-33-2-63-71>
Review Article

- Fe(III) cycle under redox fluctuation. *J Environ Manage.* 2022;321:115942. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115942
22. Miranda LS, Wijesiri B, Ayoko GA, Egodawatta P, Gonetilleke A. Water-sediment interactions and mobility of heavy metals in aquatic environments. *Water Res.* 2021;202:117386. doi: 10.1016/j.watres.2021.117386
 23. Kungolos A, Samaras P, Tsiroidis V, Petala M, Sakellaropoulos G. Bioavailability and toxicity of heavy metals in the presence of natural organic matter. *J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng.* 2006;41(8):1509–1517. doi: 10.1080/10934520600754706
 24. Nowack B, VanBriesen JM. Chelating agents in the environment. In: *Biogeochemistry of Chelating Agents. ACS Symposium Series.* 2005;910:1-18. doi: 10.1021/bk-2005-0910.ch001
 25. Hathcock JN, Griffiths JC. *Vitamin and Mineral Safety.* 3rd ed. MacKay D, Wong A, Nguyen H, eds. Council for Responsible Nutrition, Washington, D.C.; 2013. Accessed November 15, 2024. <https://www.crnusa.org/sites/default/files/files/resources/CRN-SafetyBook-3rdEdition-2014-fullbook.pdf>
 26. Колосова Н.Г., Баяндина Г.Н., Машукова Н.Г., Геппе Н.А. Обмен железа в организме и пути коррекции его нарушений // Трудный пациент. 2011. Т. 9. № 8-9. С. 54–58.
 27. Espina A, Cañamares MV, Jurašeková Z, Sanchez-Cortes S. Analysis of iron complexes of tannic acid and other related polyphenols as revealed by spectroscopic techniques: Implications in the identification and characterization of iron gall inks in historical manuscripts. *ACS Omega.* 2022;7(32):27937–27949. doi: 10.1021/acsomega.2c01679
 28. Xu T, Zhang X, Liu Y, et al. Effects of dietary polyphenol supplementation on iron status and erythropoiesis: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Am J Clin Nutr.* 2021;114(2):780–793. doi: 10.1093/ajcn/nqab068
 29. Ashmead HD. The absorption and metabolism of iron amino acid chelate. *Arch Latinoam Nutr.* 2001;51(1 Suppl 1):13–21.
 30. Olivares M, Pizarro F. Bioavailability of iron bis-glycinate chelate in water. *Arch Latinoam Nutr.* 2001;51(1 Suppl 1):22–25.
 31. Ребров В.Г., Громова О.А. Витамины, макро- и микроэлементы. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2008. 960 с.
 32. Milman NT. A review of nutrients and compounds, which promote or inhibit intestinal iron absorption: Making a platform for dietary measures that can reduce iron uptake in patients with genetic haemochromatosis. *J Nutr Metab.* 2020;2020(1):7373498. doi: 10.1155/2020/7373498
 33. Шапов И.А., Гасанова П.О. Железо, абсорбция, транспорт // Вестник гематологии. 2016. Т. 12. № 1. С. 31–38.
 34. Roth MP, Meynard D, Coppin H. Regulators of hepcidin expression. *Vitam Horm.* 2019;110:101–129. doi: 10.1016/bs.vh.2019.01.005
 35. Мильто И.В., Суходоло И.В., Прокопьева В.Д., Климентьева Т.К. Молекулярные и клеточные основы метаболизма железа у человека // Биохимия. 2016. Т. 81. № 6. С. 725–742.
 36. Лапенко В.В., Бикбулатова Л.Н., Миняйло Л.А., Харьков В.В. Гигиеническая оценка содержания железа в водопроводной воде административных центров севера Тюменской области // Здоровье населения и среда обитания. 2022. № 3. С. 53–58. doi: 10.35627/2219-5238/2022-30-3-53-58
 37. Han G, Yang K, Zeng J, Zhao Y. Dissolved iron and isotopic geochemical characteristics in a typical tropical river across the floodplain: The potential environmental implication. *Environ Res.* 2021;200:111452. doi: 10.1016/j.envres.2021.111452
 38. Levi S, Ripamonti M, Moro AS, Cozzi A. Iron imbalance in neurodegeneration. *Mol Psychiatry.* 2024;29(4):1139–1152. doi: 10.1038/s41380-023-02399-z
 39. Chen WJ, Kung GP, Gnana-Prakasam JP. Role of iron in aging related diseases. *Antioxidants (Basel).* 2022;11(5):865. doi: 10.3390/antiox11050865
 40. Baudry J, Kopp JF, Boeing H, Kipp AP, Schwerdtle T, Schulze MB. Changes of trace element status during aging: Results of the EPIC–Potsdam cohort study. *Eur J Nutr.* 2020;59(7):3045–3058. doi: 10.1007/s00394-019-02143-w
 41. Wang X, Zhao Y, Wu X, Cui L, Mao S. Editorial: Trace element chemistry and health. *Front Nutr.* 2022;9:1034577. doi: 10.3389/fnut.2022.1034577
 42. Stota M, Waśik M, Stołtny T, et al. Relationship between lead absorption and iron status and its association with oxidative stress markers in lead-exposed workers. *J Trace Elem Med Biol.* 2021;68:126841. doi: 10.1016/j.jtemb.2021.126841
 43. Abbaspour N, Hurrell R, Kelishadi R. Review on iron and its importance for human health. *J Res Med Sci.* 2014;19(2):164–174.
 44. Angelova MG, Petkova-Marinova TV, Pogorielov MV, Loboda AN, Nedkova-Kolarova VN, Bozhinova AN. Trace element status (iron, zinc, copper, chromium, cobalt, and nickel) in iron-deficiency anaemia of children under 3 years. *Anemia.* 2014;2014:718089. doi: 10.1155/2014/718089
 45. Permyakov EA. Metal binding proteins. *Encyclopedia.* 2021;1(1):261–292. doi: 10.3390/encyclopedia1010024
 46. Yuan G, Curtolo F, Deng Y, et al. Highly dynamic polynuclear metal cluster revealed in a single metallothionein molecule. *Research (Wash D C).* 2021;2021:9756945. doi: 10.34133/2021/9756945

REFERENCES

1. Kumar A, Sharma E, Marley A, Samaan MA, Brookes MJ. Iron deficiency anaemia: Pathophysiology, assessment, practical management. *BMJ Open Gastroenterol.* 2022;9(1):000759. doi: 10.1136/bmjgast-2021-000759
2. Stein J, Connor S, Virgin G, Ong DE, Pereyra L. Anemia and iron deficiency in gastrointestinal and liver conditions. *World J Gastroenterol.* 2016;22(35):7908–7925. doi: 10.3748/wjg.v22.i35.7908
3. Shokrgozar N, Golafshan HA. Molecular perspective of iron uptake, related diseases, and treatments. *Blood Res.* 2019;54(1):10–16. doi: 10.5045/br.2019.54.1.10
4. Ataide R, Fielding K, Pasricha SR, Bennett C. Iron deficiency, pregnancy, and neonatal development. *Int J Gynaecol Obstet.* 2023;162(Suppl 2):14–22. doi: 10.1002/ijgo.14944
5. Gafter-Gvili A, Schechter A, Rozen-Zvi B. Iron deficiency anemia in chronic kidney disease. *Acta Haematol.* 2019;142(1):44–50. doi: 10.1159/000496492
6. National Research Council. *Drinking Water and Health: Volume 3.* Washington, DC: The National Academies Press; 1980. doi: 10.17226/324
7. World Health Organization. *Trace Elements in Human Nutrition and Health.* Geneva: WHO; 1996. Accessed November 15, 2024. <https://www.who.int/publications/i/item/9241561734>
8. Choudhury N, Siddiqua TJ, Ahmed SMT, et al. Iron content of drinking water is associated with anaemia status among children in high groundwater iron areas in Bangladesh. *Trop Med Int Health.* 2022;27(2):149–157. doi: 10.1111/tmi.13710
9. Kovalchuk VK. Estimation of actual iron consumption by adolescent population in region with high content of iron in drinking water. *Ekologiya Cheloveka (Human Ecology).* 2015;(5):8–13. (In Russ.)

10. Rigas AS, Ejsing BH, Sørensen E, *et al.* Calcium in drinking water: Effect on iron stores in Danish blood donors – Results from the Danish Blood Donor Study. *Transfusion*. 2018;58(6):1473. doi: 10.1111/trf.14600
11. Conrad ME, Umbreit JN. Iron absorption and transport – An update. *Am J Hematol*. 2020;64(4):287-298. doi: 10.1002/1096-8652(200008)64
12. Piskin E, Cianciosi D, Gulec S, Tomas M, Capanoglu E. Iron absorption: Factors, limitations, and improvement methods. *ACS Omega*. 2022;7(24):20441-20456. doi: 10.1021/acsomega.2c01833
13. Skalny AV. [Chemical Elements in Human Physiology and Ecology.] Moscow: ONIX 21 Century Publ.; 2004. (In Russ.)
14. Lapotyshkina NP, Sazonov RP. [Water Treatment and Water Chemistry of Heat Networks.] Moscow: Energoizdat; 1982. (In Russ.)
15. Kutergin A, Nedobukh T. The use of aluminosilicate sorbent for the purification of natural waters from heavy metals. *Ekologiya i Promyshlennost' Rossii*. 2020;24(3):19-23. (In Russ.) doi: 10.18412/1816-0395-2020-3-19-23
16. Kovshov AA, Novikova YuA, Fedorov VN, Tikhonova NA. Diseases risk assessment associated with the quality of drinking water in the urban districts of Russian Arctic. *Vestnik Ural'skoy Meditsinskoy Akademicheskoy Nauki*. 2019;16(2):215-222. (In Russ.) doi: 10.22138/2500-0918-2019-16-2-215-222
17. Kontoghiorghes GJ, Kontoghiorghes CN. Iron and chelation in biochemistry and medicine: New approaches to controlling iron metabolism and treating related diseases. *Cells*. 2020;9(6):1456. doi: 10.3390/cells9061456
18. Abe C, Miyazawa T, Miyazawa T. Current use of Fenton reaction in drugs and food. *Molecules*. 2022;27(17):5451. doi: 10.3390/molecules27175451
19. Barbusiński K. Fenton reaction – Controversy concerning the chemistry. *Ecol Chem Eng*. 2009;16(3):347-358.
20. Isaev AB, Magomedova AG. Advanced oxidation processes based emerging technologies for dye wastewater treatment. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 2: Khimiya*. 2022;63(4):247-268. (In Russ.)
21. Li H, Ding S, Song W, Wang X, Ding J, Lu J. The degradation of dissolved organic matter in black and odorous water by humic substance-mediated Fe(II)/Fe(III) cycle under redox fluctuation. *J Environ Manage*. 2022;321:115942. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115942
22. Miranda LS, Wijesiri B, Ayoko GA, Egodawatta P, Goonetilleke A. Water-sediment interactions and mobility of heavy metals in aquatic environments. *Water Res*. 2021;202:117386. doi: 10.1016/j.watres.2021.117386
23. Kungolos A, Samaras P, Tsiridis V, Petala M, Sakellariopoulos G. Bioavailability and toxicity of heavy metals in the presence of natural organic matter. *J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng*. 2006;41(8):1509-1517. doi: 10.1080/10934520600754706
24. Nowack B, VanBriesen JM. Chelating agents in the environment. In: *Biogeochemistry of Chelating Agents. ACS Symposium Series*. 2005;910:1-18. doi: 10.1021/bk-2005-0910.ch001
25. Hathcock JN, Griffiths JC. *Vitamin and Mineral Safety*. 3rd ed. MacKay D, Wong A, Nguyen H, eds. Council for Responsible Nutrition, Washington, D.C.; 2013. Accessed November 15, 2024. <https://www.crnusa.org/sites/default/files/files/resources/CRN-SafetyBook-3rdEdition-2014-fullbook.pdf>
26. Kolosova NG, Bayandina GN, Mashukova NG, Geppe NAG. Iron exchange in the body and ways of correction of its abnormalities. *Trudnyy Patsient*. 2011;9(8-9):54-58. (In Russ.)
27. Espina A, Cañamares MV, Jurašeková Z, Sanchez-Cortes S. Analysis of iron complexes of tannic acid and other related polyphenols as revealed by spectroscopic techniques: Implications in the identification and characterization of iron gall inks in historical manuscripts. *ACS Omega*. 2022;7(32):27937-27949. doi: 10.1021/acsomega.2c01679
28. Xu T, Zhang X, Liu Y, *et al.* Effects of dietary polyphenol supplementation on iron status and erythropoiesis: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Am J Clin Nutr*. 2021;114(2):780-793. doi: 10.1093/ajcn/nqab068
29. Ashmead HD. The absorption and metabolism of iron amino acid chelate. *Arch Latinoam Nutr*. 2001;51(1 Suppl 1):13-21.
30. Olivares M, Pizarro F. Bioavailability of iron bis-glycinate chelate in water. *Arch Latinoam Nutr*. 2001;51(1 Suppl 1):22-25.
31. Rebrov VG, Gromova OA. [Vitamins, Macro- and Micro-elements.] Moscow: GEOTAR-Media; 2008. (In Russ.)
32. Milman NT. A review of nutrients and compounds, which promote or inhibit intestinal iron absorption: Making a platform for dietary measures that can reduce iron uptake in patients with genetic haemochromatosis. *J Nutr Metab*. 2020;2020(1):7373498. doi: 10.1155/2020/7373498
33. Shamov IA, Gasanova PO. Ferrum, absorption, transport. *Vestnik Gematologii*. 2016;12(1):31-38. (In Russ.)
34. Roth MP, Meynard D, Coppin H. Regulators of hepcidin expression. *Vitam Horm*. 2019;110:101-129. doi: 10.1016/bs.vh.2019.01.005
35. Milto IV, Suhodolo IV, Klimenteva TK, Prokopieva VD. Molecular and cellular bases of iron metabolism in humans. *Biochemistry (Moscow)*. 2016;81(6):549-564. doi: 10.1134/S0006297916060018
36. Lapenko VV, Bikbulatova LN, Minyaylo LA, Kharkov VV. Hygienic assessment of iron content in pipeline water of administrative centers of the north of Tyumen Region. *Zdorov'e Naseleniya i Sreda Obitaniya*. 2022;30(3):53-58. (In Russ.) doi: 10.35627/2219-5238/2022-30-3-53-58
37. Han G, Yang K, Zeng J, Zhao Y. Dissolved iron and isotopic geochemical characteristics in a typical tropical river across the floodplain: The potential environmental implication. *Environ Res*. 2021;200:111452. doi: 10.1016/j.envres.2021.111452
38. Levi S, Ripamonti M, Moro AS, Cozzi A. Iron imbalance in neurodegeneration. *Mol Psychiatry*. 2024;29(4):1139-1152. doi: 10.1038/s41380-023-02399-z
39. Chen WJ, Kung GP, Gnana-Prakasam JP. Role of iron in aging related diseases. *Antioxidants (Basel)*. 2022;11(5):865. doi: 10.3390/antiox11050865
40. Baudry J, Kopp JF, Boeing H, Kipp AP, Schwerdtle T, Schulze MB. Changes of trace element status during aging: Results of the EPIC-Potsdam cohort study. *Eur J Nutr*. 2020;59(7):3045-3058. doi: 10.1007/s00394-019-02143-w
41. Wang X, Zhao Y, Wu X, Cui L, Mao S. Editorial: Trace element chemistry and health. *Front Nutr*. 2022;9:1034577. doi: 10.3389/fnut.2022.1034577
42. Stota M, Wąsik M, Stołtny T, *et al.* Relationship between lead absorption and iron status and its association with oxidative stress markers in lead-exposed workers. *J Trace Elem Med Biol*. 2021;68:126841. doi: 10.1016/j.jtemb.2021.126841
43. Abbaspour N, Hurrell R, Kelishadi R. Review on iron and its importance for human health. *J Res Med Sci*. 2014;19(2):164-174.
44. Angelova MG, Petkova-Marinova TV, Pogorielov MV, Loboda AN, Nedkova-Kolarova VN, Bozhinova AN. Trace element status (iron, zinc, copper, chromium, cobalt, and nickel) in iron-deficiency anaemia of chil-

- dren under 3 years. *Anemia*. 2014;2014:718089. doi: 10.1155/2014/718089
45. Пермяков ЕА. Metal binding proteins. *Encyclopedia*. 2021;1(1):261-292. doi: 10.3390/encyclopedia1010024
46. Yuan G, Curtolo F, Deng Y, *et al*. Highly dynamic polynuclear metal cluster revealed in a single metallothionein molecule. *Research (Wash D C)*. 2021;2021:9756945. doi: 10.34133/2021/9756945

Сведения об авторах:

✉ **Хлыстов Иван Андреевич** – к.б.н., старший научный сотрудник, заведующий лабораторией гигиены окружающей среды и экологии человека отдела комплексных проблем гигиены и профилактики заболеваний населения; e-mail: hlistovia@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4632-6060>.

Харькова Полина Константиновна – младший научный сотрудник лаборатории гигиены окружающей среды и экологии человека отдела комплексных проблем гигиены и профилактики заболеваний населения; e-mail: harkovapk@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7927-0246>.

Гурвич Владимир Борисович – д.м.н., научный руководитель; e-mail: gurvich@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6475-7753>.

Бушueva Татьяна Викторовна – к.м.н., заведующая научно-производственным отделом «Лабораторно-диагностических технологий»; e-mail: bushueva@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5872-2001>.

Сахаутдинова Рената Рашидовна – к.м.н., заведующая диагностическим лабораторным отделением; e-mail: sahautdinova@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2726-9259>.

Информация о вкладе авторов: концепция и дизайн исследования: *Хлыстов И.А., Гурвич В.Б.*; сбор данных, анализ и интерпретация результатов: *Хлыстов И.А., Харьковa П.К.*; обзор литературы: *Хлыстов И.А., Харьковa П.К., Бушueva Т.В.*; подготовка проекта рукописи: *Хлыстов И.А., Гурвич В.Б., Харьковa П.К., Сахаутдинова Р.Р.* Все авторы рассмотрели результаты и одобрили окончательный вариант рукописи.

Соблюдение этических стандартов: данное исследование не требует представления заключения по биомедицинской этике или иных документов.

Финансирование: исследование проведено без спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: Гурвич Владимир Борисович является членом редакционного совета научно-практического журнала «Здоровье населения и среда обитания», остальные авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Статья получена: 18.11.24 / Принята к публикации: 10.02.25 / Опубликовано: 28.02.25

Author information:

✉ Ivan A. **Khlystov**, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Head of the Laboratory of Environmental Health and Human Ecology, Department of Complex Problems of Hygiene and Disease Prevention; e-mail: hlistovia@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4632-6060>.

Polina K. **Kharkova**, Junior Researcher, Laboratory of Environmental Health and Human Ecology, Department of Complex Problems of Hygiene and Disease Prevention; e-mail: harkovapk@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7927-0246>.

Vladimir B. **Gurvich**, Dr. Sci. (Med.), Scientific Director; e-mail: gurvich@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6475-7753>.

Tatiana V. **Bushueva**, Cand. Sci. (Med.), Head of the Research and Production Association of Diagnostic Technologies; e-mail: bushueva@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5872-2001>.

Renata R. **Sakhautdinova**, Cand. Sci. (Med.), Head of the Department of Laboratory Diagnostics; e-mail: sahautdinova@ymrc.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2726-9259>.

Author contributions: study conception and design: *Khlystov I.A., Gurvich V.B.*; data collection, analysis and interpretation of results: *Khlystov I.A., Kharkova P.K.*; bibliography compilation and referencing: *Khlystov I.A., Kharkova P.K., Bushueva T.V.*; draft manuscript preparation: *Khlystov I.A., Gurvich V.B., Kharkova P.K., Sakhautdinova R.R.* All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

Compliance with ethical standards: Not applicable.

Funding: This research received no external funding.

Conflict of interest: Vladimir B. Gurvich is a member of the Editorial Council of the journal *Public Health and Life Environment*; other authors have no conflicts of interest to declare.

Received: November 19, 2024 / Accepted: February 10, 2025 / Published: February 28, 2025