

Окислительный стресс и ожирение у детей – роль биоэлементов

А.С. Лесная, М.А. Даренская, Л.В. Рычкова, Н.В. Семёнова, Ж.В. Прохорова,
В.А. Шевчук, Л.И. Колесникова

*Научный центр проблем здоровья семьи и репродукции человека
664003, г. Иркутск, ул. Тимирязева, 16*

Резюме

В настоящее время нет единого представления о состоянии биоэлементного статуса у детей и подростков, страдающих ожирением. В связи с этим нами выполнено обобщение имеющихся данных, находящихся в открытом доступе, и представлена информация о роли и содержании биоэлементов, участвующих в регуляции свободнорадикального гомеостаза, в генезе детского ожирения. В литературном обзоре описаны современные представления об ожирении как о метаболической патологии, рассмотрена многофакторность развития окислительного стресса при ожирении, в том числе у детей и подростков, раскрыта роль биоэлементов в регулировании свободнорадикального гомеостаза и показано, что они могут выступать в качестве кофакторов антиоксидантных ферментов и/или быть инициаторами окислительных реакций. Определены наиболее значимые биоэлементы, участвующие в регулировании свободнорадикальных процессов – медь, цинк, марганец, селен и железо. Анализ литературы показывает, что у детей и подростков с ожирением наблюдаются изменения в метаболизме основных биоэлементов, участвующих в регуляции редокс-гомеостаза. Содержание меди, цинка, селена, марганца и железа может варьировать в зависимости от половой принадлежности и возраста обследуемых, а также типа биоматериала.

Ключевые слова: биоэлементы, микроэлементы, свободнорадикальное окисление, окислительный стресс, ожирение, дети, подростки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Автор для переписки: Лесная А.С., e-mail: tasi121212@mail.ru

Для цитирования: Лесная А.С., Даренская М.А., Рычкова Л.В., Семёнова Н.В., Прохорова Ж.В., Шевчук В.А., Колесникова Л.И. Окислительный стресс и ожирение у детей – роль биоэлементов. *Сибирский научный медицинский журнал*. 2024;44(5):24–34. doi: 10.18699/SSMJ20240503

The role of bioelements – components of free radical oxidation – in the genesis of childhood obesity

A.S. Lesnaya, M.A. Darenskaya, L.V. Rychkova, N.V. Semenova, Zh.V. Prokhorova,
V.A. Shevchuk, L.I. Kolesnikova

*Scientific Centre for Family Health and Human Reproduction Problems
664003, Irkutsk, Timiryazeva st., 16*

Abstract

Currently, there is no common understanding of the bioelement status of obese children and adolescents. In this regard, we have summarized the available data on open access and presented information on the role and content of bioelements involved in the regulation of free radical homeostasis in the genesis of childhood obesity. The literature review revealed modern ideas about obesity as a metabolic pathology. The multifactorial nature of the development of oxidative stress in obesity, including in children and adolescents, is considered, the role of bioelements in the regulation of free radical homeostasis is revealed and it is shown that they can act as cofactors of antioxidant enzymes and/or be initiators of oxidative reactions. The most significant bioelements involved in the regulation of free radical processes are copper, zinc, manganese, selenium and iron. The analysis of the literature shows that children and adolescents with obesity experience changes in the metabolism of the main bioelements involved in the regulation of redox homeostasis. The

content of copper, zinc, selenium, manganese and iron may vary depending on the gender and age of the subjects, as well as the type of biomaterial being studied.

Key words: bioelements, microelements, free radical oxidation, oxidative stress, obesity, children, adolescents.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Correspondence author: Lesnaya A.S., e-mail: tasi121212@mail.ru

Citation: Lesnaya A.S., Darenskaya M.A., Rychkova L.V., Semenova N.V., Prokhorova Zh.V., Shevchuk V.A., Kolesnikova L.I. The role of bioelements – components of free radical oxidation – in the genesis of childhood obesity. *Sibirskij nauchnyj medicinskij zhurnal* = *Siberian Scientific Medical Journal*. 2024;44(5):24–34. [In Russian]. doi: 10.18699/SSMJ20240503

Современные представления о развитии свободнорадикальной патологии при ожирении

К настоящему времени распространенность ожирения приобретает масштабы неинфекционной эпидемии, что делает данную патологию одним из ведущих метаболических расстройств, характеризующимся хроническим нарушением обмена веществ и проявляющимся чрезмерным накоплением жировой ткани [1]. Особый интерес представляет изучение механизмов патогенеза ожирения в детско-юношеском возрасте, так как в этот период происходит стремительный рост и развитие организма с перестройкой основных систем регуляции. Считается, что избыточный вес в детском возрасте и метаболические нарушения, ассоциированные с ним, сохраняются и во взрослом периоде, поэтому у детей и подростков необходимо проводить своевременную коррекцию избыточного веса еще на раннем этапе развития патологии [2, 3]. Несмотря на попытки снизить количество детей и подростков, страдающих ожирением, оно с каждым годом увеличивается [4].

Долговременное нарушение метаболических путей, ассоциированных с ожирением, приводит к формированию хронических патологий, которые проявляются в виде сахарного диабета 2 типа, заболеваний сердечно-сосудистой системы, обструктивной болезни легких, подагры, ревматоидного артрита, синдрома обструктивного апноэ сна, неалкогольной жировой болезни печени, репродуктивных нарушений, метаболического синдрома и др., а на молекулярном уровне – в виде хронического системного воспаления и метаболического стресса [5]. Последний характеризуется гиперпродукцией в клетках и внеклеточной жидкости активных форм кислорода, азота, галогенов, а также карбонильных соединений, получивших общее название активированных кислородных метаболитов (АКМ) [6]. Накопление АКМ изменяет равновесие в системе свободнорадикального гомеостаза в сторону преобладания окислительных реакций, что может способствовать развитию свободнорадикальной патологии – окислительного

стресса (ОС) [7]. В частности, доказана решающая роль хронического ОС в патогенезе ожирения у детей и подростков [8, 9].

ОС может иметь как положительный, так и отрицательный эффект, в связи с этим он подразделяется на эустресс и дистресс [10]. При окислительном эустрессе увеличение продукции АКМ находится под контролем механизмов регуляции ОС и обоснованно повышенной потребностью в клеточной сигнализации и активацией защитных механизмов при воздействии патогенов бактериальной и вирусной природы [11]. Окислительный дистресс, напротив, приводит к бесконтрольной гиперпродукции АКМ, что вызывает необратимую окислительную модификацию макромолекул, тем самым придавая им токсичность, мутагенность и канцерогенность [6]. При этом ОС служит неспецифическим фактором патогенеза не только ожирения, но и других социально значимых заболеваний, что делает его ключевым звеном коморбидности [12].

Не вызывает сомнений то, что системный ОС усиливается с возрастанием индекса массы тела (ИМТ) [13]. В преобладающем большинстве случаев повышение ИМТ связано с увеличением жировой массы в организме, что способствует дисфункции жировой ткани и ее биомеханическому воздействию на окружающие ее ткани с развитием метаболических последствий для здоровья. Однако исследованиями последних лет установлено, что ожирение может протекать и без метаболических нарушений, в результате чего выделяют его метаболически здоровый и метаболически нездоровый фенотип. В целом метаболически здоровое ожирение чаще встречается у женщин, молодых людей, лиц с ИМТ < 35 кг/м² и европеоидов [14].

В настоящее время известно несколько факторов, способствующих формированию ОС при ожирении. В первую очередь свой вклад в развитие свободнорадикальной патологии вносят процессы перекисного окисления липидов и гликолиза, в результате активации которых усиливается продукция АКМ [5]. Существенную роль в развитии свободнорадикальной патологии при

ожирении играет и сама жировая ткань. Являясь эндокринным органом, жировая ткань секретирует во внутреннюю среду организма ряд соединений, участвующих в поддержании свободнорадикального гомеостаза, в том числе провоспалительные цитокины и ароматазу. Цитокины способны стимулировать синтез АКМ, а ароматаза принимает участие в синтезе эстрогенов из андрогенов, тем самым меняя гормональный фон в сторону гиперэстрогении, при этом эстрогены могут выступать как прооксиданты, увеличивая окислительную нагрузку на организм [15]. Дополнительным фактором ОС при ожирении является вынужденная усиленная мышечная активность, сопровождающаяся прогрессией потребления кислорода, увеличением содержания гипоксантина в плазме и гиперпродукцией супероксидного анион-радикала [13].

Следует отметить, что в большинстве случаев при ожирении, формирующемся в связи с особенностями питания, нарушается баланс липидных фракций, который характеризуется дислипидемией, связанной с увеличением содержания липопротеинов низкой плотности (ЛПНП) и снижением концентрации липопротеинов высокой плотности (ЛПВП) [16, 17]. И те и другие липопротеины являются потенциальными субстратами окисления, но ЛПНП подвергаются окислению значительно интенсивнее, чем ЛПВП, что также вносит свой вклад в развитие ОС [18, 19].

В многофакторности развития ОС немало важным компонентом является снижение активности системы антиоксидантной защиты (АОЗ) организма, которое служит причиной повышения интенсивности свободнорадикальных процессов в организме у людей с ожирением [20, 21]. Изменения в системе АОЗ могут происходить в результате дефицита отдельных ее компонентов, например, антиоксидантных ферментов, витаминов, высокомолекулярных белков и аминокислот, обладающих антиоксидантной активностью, а также мочевины, мочевой кислоты, глутатиона, билирубина и некоторых биоэлементов, изучение роли которых в регуляции процессов свободнорадикального гомеостаза представляется наиболее интересным [22].

Роль биоэлементов в системе свободнорадикального окисления – АОЗ

При дефиците биоэлементов в рационе человека имеет место снижение резистентности организма к неблагоприятным факторам окружающей среды, получившее название «феномен мальадаптации», который заключается в недостаточной обеспеченности организма эссенциальными веществами [23]. Применительно к процессам свобод-

норадикального окисления мальадаптация проявляется снижением концентрации и активности ферментов АОЗ, где биоэлементы используются в роли кофакторов антиоксидантных ферментов.

Одним из основных ферментов АОЗ является супероксиддисмутаза (СОД), снижение активности которой обнаружено при ожирении у подростков [24]. СОД представлена несколькими изоформами, различающимися типом переходного металла-кофактора в активном центре и местонахождением в клетке. Самая распространенная димерная Cu,Zn-СОД локализуется преимущественно в цитоплазме, но также может обнаруживаться в межмембранном пространстве митохондрий, пероксисомах, лизосомах и ядре [25]. Как видно из названия, Cu,Zn-СОД имеет в составе медь в качестве кофактора активного центра и цинк в качестве кофактора, стабилизирующего конформацию. Тетрамерная СОД с марганцем (Mn-СОД) локализуется в митохондриях эукариотических клеток. Во внеклеточной среде циркулирует самая крупная форма Cu,Zn-СОД, которая отличается от цитоплазматической тетрамерным строением и, соответственно, большей молекулярной массой [26, 27].

Медь и цинк способны активировать металлотиионы – белки, антиоксидантные функции которых заключаются в утилизации АКМ и активации СОД, что приводит к увеличению уровня общей антиоксидантной активности. Очевидно, активация СОД обусловлена способностью металлотиионов высвобождать микроэлементы для формирования третичной структуры фермента [28]. Также, по мнению некоторых авторов, цинк является важным регулятором интенсивности реакций перекисного окисления липидов, путем стимуляции активности СОД, соответственно, его дефицит будет приводить к усилению повреждения клеточных мембран АКМ [29].

Не менее важным компонентом защиты от ОС является система глутатиона во главе с трипептидом глутатионом и глутатион-зависимыми ферментами [30], в том числе глутатионпероксидазами (ГПО). Существует восемь изоформ ГПО, пять из которых (ГПО1, ГПО2, ГПО3, ГПО4, ГПО6) содержат в активном центре селен в виде остатка аминокислоты селеноцистеина. ГПО катализируют восстановление пероксида водорода или органических гидропероксидов до воды и соответствующих спиртов, в связи с чем ферменты способны обезвреживать продукты перекисного окисления липидов [31]. Кроме того, ГПО, содержащие селеноцистеин, способны проявлять пероксинитритредуктазную активность, т.е. восстанавливать ONOO^- до нитрит-аниона NO_2^- [32]. При дефиците Se уменьшается активность и

концентрация ГПО в сыворотке крови, что можно использовать для оценки насыщения организма селеном [33].

Селен также содержится в активном центре тиоредоксинредуктаз, известны три их изоформы – цитозольная, митохондриальная и тестикулярная. Принцип работы системы тиоредоксина сводится к восстановлению тиоредоксинами внутри- и межмолекулярных дисульфидных связей в белках и пептидах (например, в окисленном глутатионе), окисленный тиоредоксин в свою очередь восстанавливается тиоредоксинредуктазой с участием NADPH в передаче электрона. Согласно новым данным о функциях тиоредоксиновой системы, она осуществляет не только защиту от окислительного повреждения биомолекул, но и клеточный сигналинг с использованием перекиси водорода и оксида азота (NO) [34]. Также отмечено, что увеличение уровня тиоредоксинредуктазы в тканях и сыворотке крови коррелирует с повышением образования АКМ, что может свидетельствовать об активном участии этой системы в предотвращении развития процессов свободнорадикального окисления [33].

Рассматривая роль селена в поддержании редокс-статуса, необходимо отметить, что селеносодержащие ГПО и тиоредоксинредуктазы входят в группу селенопротеинов, где помимо представленных белков интерес также представляет селенопротеин Р, который, в отличие от других представителей этого семейства, содержит 10 остатков селеноцистеина, что составляет около 40–50 % от общего количества селена в плазме. В связи с этим селенопротеин Р рассматривают в качестве переносчика селена, но, помимо этого, его функции заключаются в регуляции активности ГПО, связывании гепарина, комплексообразовании с ионами тяжелых металлов и защите клетки от окислительного повреждения за счет его антиоксидантных свойств [35]. Важно отметить, что определение в плазме крови уровня селенопротеина Р наряду с ГПО3 используют как эффективный способ оценки статуса селена в организме [36]. Некоторые селеносодержащие белки могут принимать участие в регулировании окислительно-восстановительного гомеостаза, модификации белков и стресса эндоплазматического ретикула (например, селенопротеины К, S и Т) [37].

К железосодержащим ферментам антиоксидантного звена относят каталазу, имеющую в составе трехвалентное железо. Классическая гемсодержащая каталаза, присутствующая в организме человека, разлагает пероксид водорода на кислород и воду, а также может удалять пероксинитрит и противодействовать его образованию путем окисления NO. В последнее время все боль-

ше данных указывает на то, что каталаза также участвует в регуляции других физиологических процессов, где H_2O_2 действует как вторичный мессенджер, окисляющий сигнальные молекулы. Эти процессы включают передачу сигнала между клетками, клеточную пролиферацию, дифференцировку и апоптоз [38].

Также к железосодержащим относят ферменты семейства пероксидаз: миелопероксидаза, эозинофильная пероксидаза (ЭПО), лактопероксидаза (ЛПО), тиреоидная пероксидаза, пероксидазин. Они катализируют сложные циклы реакций с участием перекиси водорода, в которых могут образовываться высокореакционные интермедиаты, в том числе активные формы галогенов, что может служить причиной формирования галогенирующего стресса – одного из вариантов развития свободнорадикальной патологии [39]. Железосодержащие NO-синтазы продуцируют другой тип АКМ – NO, который является предшественником других активных форм азота (например, вступая в реакцию с супероксидным анион-радикалом, образует токсичный для клеток пероксинитрит), в результате происходит активация цепочки реакций по пути развития нитрозирующего стресса [11].

Важно отметить, что металлы с переменной валентностью сами по себе могут выступать в роли прооксидантов и служат инициаторами свободнорадикальных реакций. Так, железо может быть инициатором в процессах перекисного окисления липидов, чрезмерное накопление продуктов которого может привести к программируемой гибели клеток по типу ферроптоза [40].

Участвовать в регуляции свободнорадикального гомеостаза биоэлементы могут не только в составе ферментов, но и в составе белков, обладающих антиоксидантными функциями. Одним из них является белок острой фазы воспаления, в котором содержится восемь атомов меди – церулоплазмин. Церулоплазмин способен инактивировать супероксидный анион-радикал, переводить железо в окисленную форму, предупреждая его прооксидантные эффекты, служить источником меди при синтезе медьзависимых ферментов, в частности Cu,Zn-СОД, участвовать в формировании дисульфидных форм цистеина и гомоцистеина. При этом церулоплазмин может оказывать и прооксидантное действие посредством окисления витамина С, катехоламинов, серотонина и ряда других соединений [31].

Окислительное повреждение биомолекул также могут ингибировать антиоксиданты, содержащиеся в составе серу, кобальт и магний, что предполагает включение в терапию и профилактику нарушений свободнорадикального гомеостаза при

ожирении комплекса препаратов антиоксидантно-го действия [41–43]. Однако анализ литературы позволяет заключить, что наиболее значимыми биоэлементами, принимающими участие в регуляции свободнорадикального гомеостаза, все же остаются медь, цинк, марганец, селен и железо.

Содержание основных биоэлементов, участвующих в регуляции свободнорадикального гомеостаза, у детей и подростков с ожирением

Анализ результатов исследований последних лет по определению содержания биоэлементов у детей и подростков с ожирением выявил характерные изменения в метаболизме основных химических элементов, участвующих в свободнорадикальном гомеостазе (таблица).

Согласно данным разных источников, ожирение у детей и подростков либо сопровождается

снижением содержания меди [44, 45], либо не изменяется [46, 47]. При стратификации по полу и возрасту выявлена значимая взаимосвязь между самым высоким квартилем концентрации меди в крови детей и подростков и статусом ожирения [48], а в регрессионных моделях ожирение рассматривалось как отрицательный предиктор содержания меди в волосах [49]. Принимая во внимание то, что медь участвует в работе сердечно-сосудистой системы, можно предположить, что ее дефицит будет являться одним из факторов риска, способствующих в дальнейшем развитию сердечно-сосудистых заболеваний у пациентов детско-юношеского возраста [50].

Уровень цинка в большинстве проведенных исследований был достоверно ниже по сравнению с контрольной группой и отрицательно коррелировал с избыточной массой тела и ожирением [44, 48, 51]. При этом содержание цинка в сыворотке

Роль биоэлементов в регуляции свободнорадикального гомеостаза и изменение их концентрации у детей и подростков с ожирением

The role of bioelements in the regulation of free radical homeostasis and changes in their concentration in obese children and adolescents

Биоэлемент	Роль в регуляции свободнорадикального гомеостаза	Изменение при наличии ожирения
Медь (Cu)	– Активация металлотионеинов – Входит в состав церулоплазмина, цитоплазматической и внеклеточной Cu,Zn-СОД в качестве кофактора активного центра	– По типу исследуемого биоматериала: в крови – снижается или не меняется в волосах – снижается – В зависимости от гендерной принадлежности: у мальчиков – снижается у девочек – не меняется
Цинк (Zn)	– Активация металлотионеинов – Входит в состав цитоплазматической и внеклеточной Cu,Zn-СОД в качестве кофактора стабилизирующего конформацию	– По типу исследуемого биоматериала: в крови – снижается или не меняется в волосах – снижается – В зависимости от гендерной принадлежности: у мальчиков – снижается у девочек – увеличивается
Марганец (Mn)	– Входит в состав митохондриальной Mn-СОД в качестве кофактора активного центра	– По типу исследуемого биоматериала: в крови – увеличивается или не меняется в волосах – нет данных – В зависимости от гендерной принадлежности: у мальчиков – снижается у девочек – увеличивается
Селен (Se)	– Входит в состав селенопротеинов, в том числе ферментов семейства ГПО, тиоредоксинредуктаз	– По типу исследуемого биоматериала: в крови – увеличивается или не меняется в волосах – нет данных – В зависимости от гендерной принадлежности: у мальчиков – снижается у девочек – не меняется
Железо (Fe)	– Инициатор свободнорадикальных реакций – Входит в состав каталазы, пероксидаз, NO-синтаз	По типу исследуемого биоматериала: в крови – снижается или не меняется в волосах – нет данных В зависимости от гендерной принадлежности: у мальчиков – не меняется у девочек – снижается

у детей, страдающих ожирением, может не выходить за границы нормы [52], а в образцах волос – быть обратно пропорциональным выраженности ожирения [49]. В ряде других работ не установлено достоверной разницы в уровне биоэлемента у детей и подростков с нормальным ИМТ, избыточным весом и ожирением [46, 47]. Отмечается, что металлы-микроэлементы, включая цинк, непосредственно участвуют в синтезе, хранении и активности инсулина, формируя определенный фенотипический подтип инсулинорезистентности, что может быть одним из путей патогенеза ожирения [53]. Возможно, поэтому прием цинка у данной группы пациентов может приводить к снижению ИМТ, концентрации холестерина и ЛПНП в сыворотке крови, а следовательно, и подавлению окислительных процессов [50]. Также высказано предположение, что содержание цинка в детстве и подростковом возрасте может отражаться на маркерах сердечно-сосудистых заболеваний и ожирения [54].

Изучение уровня селена у детей и подростков с ожирением без разделения по полу показало более высокие значения в группе с патологией [51], его положительную связь с концентрацией холестерина [48], при этом активность ГПО в плазме/сыворотке снижается [55]. В другой работе, наоборот, обнаружено уменьшение содержания биоэлемента, которое ассоциировано с лицами мужского пола до- и постпубертатного периода [56]. В таком случае можно предположить, что у лиц женского пола должен выявляться более высокий уровень биоэлемента. Однако во взрослом периоде у женщин с ожирением также наблюдалось снижение концентрации селена в плазме и эритроцитах параллельно с увеличением его концентрации в моче. В бинарном логистическом регрессионном анализе селен в эритроцитах считался независимым предиктором сывороточной концентрации цитокина IL-8 у женщин с ожирением, отражая противовоспалительное действие этого микроэлемента в данной группе пациентов [57]. Отсюда следует, что на уровень селена в организме могут влиять такие факторы, как пол пациента, возраст, тип исследуемого биоматериала и, в зависимости от той или иной группы представленных факторов, происходит распределение селена для регуляции углеводного и липидного обмена, участия в механизмах иммунного ответа, дифференциации адипоцитов или участия в АОЗ.

Изменения в метаболизме железа при ожирении у детей и подростков характеризуются снижением уровня сывороточного железа, индекса насыщения трансферрина и увеличением содержания ферритина и гепсидина. При этом наблюдается положительная корреляция между

содержанием ферритина и прогепсидина и отрицательная – между уровнем железа в крови и гепсидина [58–60]. Увеличение концентрации ферритина может отражать развитие системного воспаления, ассоциированного с ожирением и образующегося вне зависимости от фенотипа патологии (метаболически здоровое или нездоровое ожирение) [21, 61]. Тогда основной причиной дефицита железа, связанного с ожирением, можно считать ингибирование его всасывания в результате повышенной экспрессии гепсидина в жировой ткани, что предполагает классические механизмы регулирования метаболизма данного биоэлемента [62]. Но, по-видимому, при ожирении могут формироваться и другие отношения между параметрами метаболизма железа. Например, в исследовании S. Aka et al. установлено, что, несмотря на значительно более низкий уровень сывороточного железа, общей железосвязывающей способности и процента насыщения трансферрина, содержание гепсидина и ферритина у обследованных с ожирением было таким же, как у лиц без него [63]. В других работах, наоборот, показано отсутствие разницы в содержании железа у детей с нормальным ИМТ и с лишним весом, а также ожирением от 4 до 16 лет. Авторы предполагают, что ожирение у подростков практически не изменяет статус железа, но влияет на эритропоэтическую активность [47, 64]. А при оценке гендерных особенностей биоэлементного статуса у подростков с ожирением снижение содержания железа наблюдалось только в группе девушек [65]. Исходя из этого, можно заключить, что у детей и подростков при наличии ожирения помимо физиологических взаимосвязей между параметрами метаболизма железа могут формироваться и патогенетические, ассоциированные с полом [66].

В отличие от других биоэлементов, участвующих в свободнорадикальном гомеостазе, уровень марганца у детей с ожирением выше, чем в его отсутствие, причем максимальные значения связаны с ожирением у лиц в возрасте от 6 до 19 лет [48, 51]. В другом исследовании, наоборот, не было существенных различий между группами в содержании марганца в сыворотке, что может быть следствием отсутствия разделения испытуемых по половому признаку [46]. Так, при разделении пациентов по полу у мальчиков выявлено недостаточное содержание марганца, а также меди и цинка относительно нормальных значений, в то время как у девочек старшего школьного возраста отмечался избыток марганца и цинка наряду с отсутствием различий по уровню меди [45]. О влиянии пола и пубертатного статуса на содержание эссенциальных металлов при ожирении также предполагают и другие авторы [53].

Подводя итог вышесказанному, можно заключить, что у детей и подростков с ожирением наблюдаются изменения в метаболизме основных биоэлементов, участвующих в регуляции свободнорадикального гомеостаза. Анализ литературы показывает, что содержание меди, цинка, селена, марганца и железа может варьировать в зависимости от пола и возраста испытуемых, а также типа исследуемого биоматериала.

Список литературы / References

1. Аметов А.С., Пашкова Е.Ю., Рамазанова З.Д., Дарсигова М.Н. Ожирение как неинфекционная эпидемия XXI века. Современные представления о патогенезе, рисках и подходах к фармакотерапии. *Эндокринология: Новости. Мнения. Обучение*. 2019;(2):57–66. doi: 10.24411/2304-9529-2019-12007
2. Darsigova M.N. Obesity as a non-infectious epidemic of the 21st century. Modern ideas about pathogenesis, risks and approaches to pharmacotherapy. *Endokrinologiya: Novosti. Mneniya. Obuchenie = Endocrinology: News. Opinions. Education*. 2019;(2):57–66. [In Russian]. doi: 10.24411/2304-9529-2019-12007
3. Daren'skaya M.A., Kolesnikova L.I., Rychkova L.V., Kravtsova O.V., Semenova N.V., Kolesnikov S.I. Relationship between lipid metabolism state, lipid peroxidation and antioxidant defense system in girls with constitutional obesity. *AIMS Molecular Science*. 2021;8(2):117–126. doi: 10.3934/molsci.2021009
4. Мильнер Е.Б., Широков Д.А., Леонова И.А. Морбидное ожирение у подростков (научный обзор). *Профилактика и клин. мед.* 2020;(1):42–50.
5. Milner E.B., Shirokov D.A., Leonova I.A. Morbid obesity in adolescents (review). *Profilakticheskaya i klinicheskaya meditsina = Preventive and Clinical Medicine*. 2020;1(74):42–50. [In Russian].
6. Бочарова О.В., Теплякова Е.Д. Ожирение у детей и подростков – проблема здравоохранения XXI века. *Казан. мед. ж.* 2020;101(3):381–388. doi: 10.17816/KMJ2020-381
7. Bocharova O.V., Teplyakova E.D. Obesity in children and adolescents is a healthcare problem of the XXI century. *Kazanskiy meditsinskiy zhurnal = Kazan Medical Journal*. 2020;101(3):381–388. [In Russian]. doi: 10.17816/KMJ2020-381
8. Лесная А.С., Даренская М.А., Семенова Н.В., Колесникова Л.И. Новый аспект метаболических нарушений при ожирении: карбонильный стресс. *Сиб. науч. мед. ж.* 2023;43(6):24–33. doi: 10.18699/SSMJ20230603
9. Lesnaya A.S., Daren'skaya M.A., Semenova N.V., Kolesnikova L.I. A new aspect of metabolic disorders in obesity: carbonyl stress. *Sibirskiy nauchnyy medicinskiy zhurnal = Siberian Scientific Medical Journal*. 2023;43(6):24–33. [In Russian]. doi: 10.18699/SSMJ20230603
10. Shkurat M.A., Mashkina E.V., Milyutina N.P., Shkurat T.P. The role of polymorphism of redox-sensitive genes in the mechanisms of oxidative stress in obesity and metabolic diseases. *Ecological Genetics*. 2023;21(3):261–287. doi: 10.17816/ecogen562714
11. Gutiérrez-Solis A.L., Garrido-Dzib A.G., Rochel-Pérez A., Magallón-Zertuche V., Chávez-Loría G., Medina-Vera I., Avila-Nava A. Oxidative stress biomarkers in Mexican subjects with overweight and obesity: a systematic review. *Metab. Syndr. Relat. Disord*. 2023;21(4):188–196. doi: 10.1089/met.2023.0001
12. Selvaraju V., Ayine P., Fadamiro M., Babu J.R., Brown M., Geetha T. Urinary biomarkers of inflammation and oxidative stress are elevated in obese children and correlate with a marker of endothelial dysfunction. *Oxid. Med. Cell. Longev*. 2019;2019:9604740. doi: 10.1155/2019/9604740
13. Поварова О.В., Городецкая Е.А., Каленикова Е.И., Медведев О.С. Метаболические маркеры и окислительный стресс в патогенезе ожирения у детей. *Рос. вестн. перинатол. и педиатрии*. 2020;65(1):22–29. doi: 10.21508/1027-4065-2020-65-1-22-29
14. Povarova O.V., Gorodetskaya E.A., Kalenikova E.I., Medvedev O.S. Metabolic markers and oxidative stress in children's obesity pathogenesis. *Rossiyskiy vestnik perinatologii i pediatrii = Russian Bulletin of Perinatology and Pediatrics*. 2020;65(1):22–29. [In Russian]. doi: 10.21508/1027-4065-2020-65-1-22-29
15. Кравченко С.Д., Козлова Н.М., Тирикова О.В. Методы оценки окислительного стресса в качестве потенциальных биомаркеров при НАЖБП. *Международ. научно-исслед. ж.* 2022;(8):58–72. doi: 10.23670/IRJ.2022.122.86
16. Kravchenko S.D., Kozlova N.M., Tirikova O.V. Oxidative stress evaluation methods as potential biomarkers in NAFLD. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal = International Research Journal*. 2022;(8):58–72. [In Russian]. doi: 10.23670/IRJ.2022.122.86
17. Молдогазиева Н.Т., Мохосоев И.М., Мельникова Т.И., Завадский С.П., Кузьменко А.Н., Терентьев А.А. Двойственная природа активных форм кислорода, азота и галогенов: их эндогенные источники, взаимопревращения и способы нейтрализации. *Успехи биол. химии*. 2020;60:123–172.
18. Moldogazieva N.T., Mokhosoev I.M., Melnikova T.I., Zavadsky S.P., Kuzmenko A.N., Terentyev A.A. Dual character of reactive oxygen, nitrogen, and halogen species: Endogenous sources, interconversions and neutralization. *Biochemistry (Mosc.)*. 2020;85(Suppl.1):S56–S78. [In Russian]. doi: 10.1134/S0006297920140047
19. Лысенко В.И. Оксидативный стресс как неспецифический фактор патогенеза органических повреждений (обзор литературы и собственных исследований). *Мед. неотлож. состояний*. 2020;16(1):24–35. doi: 10.22141/2224-0586.16.1.2020.196926

- Lysenko V.I. Oxidative stress as a non-specific factor of organ damage pathogenesis (review of literature and own data). *Meditsina neotlozhnykh sostoyaniy = Emergency Medicine*. 2020;16(1):24–35. [In Russian]. doi: 10.22141/2224-0586.16.1.2020.196926
13. Аникин Д.А., Демко И.В., Соловьева И.А., Собко Е.А., Гордеева Н.В., Крапошина А.Ю. Место свободнорадикального окисления в патогенезе метаболического синдрома. *Профилактикт. мед.* 2022;25(11):98–104. doi: 10.17116/profmed20222511198
- Anikin D.A., Demko I.V., Solovyeva I.A., Sobko E.A., Gordeeva N.V., Kraposhina A.Yu. Free radical oxidation in the pathogenesis of metabolic syndrome. *Profilakticheskaya meditsina = The Russian Journal of Preventive Medicine and Public Health*. 2022;25(11):98–104. [In Russian]. doi: 10.17116/profmed20222511198
14. Драпкина О.М., Самородская И.В., Старинская М.А., Ким О.Т., Неймарк А.Е. Ожирение: оценка и тактика ведения пациентов. М.: Силицея-Полиграф, 2021. 180 с.
- Drapkina O.M., Samorodskaya I.V., Starinskaya M.A., Kim O.T., Neymark A.E. Obesity: assessment and tactics of patient management. Moscow: Silicea-Poligraph, 2021. 180 p. [In Russian].
15. Дронь А.Н., Карпова И.А., Чернова А.М. Эффекты половых стероидов на свободнорадикальное окисление липидов у женщин. *Мед. наука и образ. Урала*. 2013;14(1):177–180.
- Dron A.N., Karpova I.A., Chernova A.M. The effects of sex steroids on the free-radical oxidation of lipids in women. *Meditsinskaya nauka i obrazovanie Urala = Medical Science and Education of the Urals*. 2013;14(1):177–180. [In Russian].
16. Никитина О.А., Даренская М.А., Рычкова Л.В., Семёнова Н.В., Бричагина А.С., Вотинева А.С., Колесникова Л.И. Особенности липидного обмена при идиопатическом ожирении у подростков различных этнических групп. *Соврем. пробл. науки и образ.* 2022;(3):87. doi:10.17513/spno.31696
- Nikitina O.A., Darenskaya M.A., Rychkova L.V., Semenova N.V., Brichagina A.S., Votinea A.S., Kolesnikova L.I. Features of lipid metabolism in adolescents with idiopathic obesity of different ethnic groups. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*. 2022;(3):87. [In Russian]. doi:10.17513/spno.31696
17. Nussbaumerova B., Rosolova H. Obesity and dyslipidemia. *Curr. Atheroscler. Rep.* 2023;25(12):947–955. doi: 10.1007/s11883-023-01167-2
18. Ланкин В.З., Тихазе А.К., Косач В.Я. Сравнительная окисляемость разных классов липопротеидов плазмы крови. *Биохимия*. 2022; 87(11):1659–1666. doi: 10.31857/S0320972522110112
- Lankin V.Z., Tikhase A.K., Kosach V.Ya. Comparative susceptibility to oxidation of different classes of blood plasma lipoproteins. *Biochemis-try (Mosc.)*. 2022;87(11):1335–1341. doi: 10.1134/S0006297922110128
19. Даренская М.А., Рычкова Л.В., Колесников С.И., Семенова Н.В., Никитина О.А., Бричагина А.С., Михалевич И.М., Колесникова Л.И. Определение наиболее информативных показателей биохимического статуса у юношей различной этнической принадлежности с ожирением с помощью дискриминантного анализа. *Бюл. эксперим. биол. и мед.* 2022;173(4):468–473. doi: 10.47056/0365-9615-2022-173-4-468-473
- Darenskaya M.A., Rychkova L.V., Kolesnikov S.I., Semenova N.V., Nikitina O.A., Brichagina A.S., Mikhalovich I.M., Kolesnikova L.I. Biochemical status of obese male adolescents of different ethnicity: discriminant analysis in the identification of the most informative indicators. *Bull. Exp. Biol. Med.* 2022;173(4):459–463. doi: 10.1007/s10517-022-05579-z
20. Хасанова Г.М., Агзамова Ш.А. Причины и патогенетические аспекты формирования ожирения у детей. *Евразийское научное объединение*. 2019;(6-3):204–207.
- Khasanova G.M., Agzamova Sh.A. Causes and pathogenetic aspects of the formation of obesity in children. *Evrasiyskoe nauchnoe obyedinenie = Eurasian Scientific Association*. 2019;(6-3):204–207. [In Russian].
21. Даренская М.А., Рычкова Л.В., Колесников С.И., Кравтцова О.В., Семенова Н.В., Бричагина А.С., Блиznyuk А., Yuzvak N., Rashidova M.A., Kolesnikova L.I. Oxidative stress index levels in Asian adolescents with exogenous-constitutional obesity. *Int. J. Biomed.* 2022;12(1):142–146. doi: 10.21103/Article12(1)_OA16
22. Луканина С.Н., Сахаров А.В., Просенко О.И., Жучаев К.В., Борисенко Е.А. Влияние окислительного стресса на элементный статус тканевых компартментов органов регуляции минерального гомеостаза. *Учен. зап. Казан. гос. акад. вет. мед. им. Н.Э. Баумана*. 2020;241(1):130–138. doi: 10.31588/2413-4201-1883-241-1-130-138
- Lukanina S.N., Sakharov A.V., Prosenko O.I., Zhuchaev K.V., Borisenko E.A. Influence of oxidative stress on the element status of tissue of organs regulations of mineral homeostasis. *Uchenye zapiski Kazanskoy gosudarstvennoy akademii veterinarnoy meditsiny imeni Nikolaya Ernestovicha Baumana = Scientific Notes. Kazan Bauman State Academy of Veterinary Medicine*. 2020;241(1):130–138. [In Russian]. doi: 10.31588/2413-4201-1883-241-1-130-138
23. Григорьев К.И., Харитонов Л.А., Григорьев А.И., Богомаз Л.В. Нутрициологические теории и практические решения к повышению здоровья детей и подростков. *Эксперим. и клин. гастроэнтерол.* 2023;(1):117–125. doi: 10.31146/1682-8658-ecg-209-1-117-125
- Grigoriev K.I., Kharitonova L.A., Grigoriev A.I., Bogomaz L.V. Nutritional theories and practical solutions to improve the health of children and adolescents. *Eksperimental'naya i klinicheskaya gastroenter-*

ologiya = *Experimental and Clinical Gastroenterology*. 2023;(1):117–125. [In Russian]. doi: 10.31146/1682-8658-ecg-209-1-117-125

24. Никитина О.А., Даренская М.А., Рычкова Л.В., Семёнова Н.В., Лесная А.С., Прохорова Ж.В., Колесникова Л.И. Антиоксидантный статус у подростков при идиопатическом ожирении. *Соврем. пробл. науки и образ.* 2023;(5):39–48. doi: 10.17513/spno.33006

Nikitina O.A., Darenskaya M.A., Rychkova L.V., Semenova N.V., Lesnaya A.S., Prokhorova Zh.V., Kolesnikova L.I. Antioxidant status in adolescents with idiopathic obesity. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*. 2023;(5):39–48. [In Russian]. doi: 10.17513/spno.33006

25. Zheng M., Liu Y., Zhang G., Yang Z., Xu W., Chen Q. The applications and mechanisms of superoxide dismutase in medicine, food, and cosmetics. *Antioxidants*. 2023;12(9):1675. doi: 10.3390/antiox12091675

26. Saxena P., Selvaraj K., Khare S.K., Chaudhary N. Superoxide dismutase as multipotent therapeutic antioxidant enzyme: Role in human diseases. *Biotechnol. Lett.* 2022;44(1):1–22. doi: 10.1007/s10529-021-03200-3

27. Islam M.N., Rauf A., Fahad F.I., Emran T.B., Mitra S., Olatunde A., Shariati M.A., Rebezov M., Rengasamy K.R.R., Mubarak M.S. Superoxide dismutase: an updated review on its health benefits and industrial applications. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2022;62(26):7282–7300. doi: 10.1080/10408398.2021.1913400

28. Рыспекова Н.Н., Нурмухамбетов А.Н., Балабекова М.К., Аканов А.А. Металлотионеины и их роль в адаптации к действию повреждающих факторов (обзор литературы). *Вестн. КазНМУ*. 2014;(1):298–303.

Ryspekova N.N., Nurmukhambetov A.N., Balabekova M.K., Akanov A.A. Metallothioneins and their role in adaptation to the action of damaging factors (literature review). *Vestnik Kazakhskogo Natsional'nogo meditsinskogo universiteta = Bulletin of the Kazakh National Medical University*. 2014;(1):298–303. [In Russian].

29. Ахмеджанова З.И., Жиёмуратова Г.К., Данилова Е.А., Каримов Д.А. Макро- и микроэлементы в жизнедеятельности организма и их взаимосвязь с иммунной системой (обзор литературы). *Журнал теоретической и клинической медицины*. 2020;(1):16–21.

Akhmedzhanova Z.I., Zhiemuratova G.K., Danilova E.A., Karimov D.A. Macro- and microelements in the vital activity of the body and their relationship with the immune system (literature review). *Zhurnal teoreticheskoy i klinicheskoy meditsiny = Journal of Theoretical and Clinical Medicine*. 2020;(1):16–21. [In Russian].

30. Бричагина А.С., Семёнова Н.В., Мадаева И.М. Система глутатиона при нарушениях сна (обзор

литературы). *Acta Biomed. Sci.* 2020;5(6):133–143. doi: 10.29413/ABS.2020-5.6.15

Brichagina A.S., Semenova N.V., Madaeva I.M. The glutathione system in sleep disorders (literature review). *Acta Biomedica Scientifica*. 2020;5(6):133–143. [In Russian]. doi: 10.29413/ABS.2020-5.6.15

31. Рыбакова Л.П., Алексанян Л.Р., Капустин С.И., Бессмельцев С.С. Окислительно-антиокислительная система организма человека, роль в развитии патологического процесса и его коррекции (обзор литературы). *Вестн. гематол.* 2022;18(4):26–37.

Rybakova L.P., Aleksanyan L.R., Kapustin S.I., Bessmeltsev S.S. Human oxidant-antioxidant system, role in the pathological process and its correction (literature review). *Vestnik gematologii = Bulletin of Hematology*. 2022;18(4):26–37. [In Russian].

32. Sies H., Klotz L.O., Sharov V.S., Assmann A., Briviba K. Protection against peroxynitrite by selenoproteins. *Z. Naturforsch. C. J. Biosci.* 1998;53(3-4):228–232. doi: 10.1515/znc-1998-3-412

33. Бубнова Н.В., Тимофеева Н.Ю., Кострова О.Ю., Стручко Г.Ю., Котёлкина А.А., Самакина Е.С. Биологическая роль селена (обзор литературы). *Acta Medica Eurasica*. 2023;(2):114–123. doi: 10.47026/2413-4864-2023-2-114-123

Bubnova N.V., Timofeeva N.Yu., Kostrova O.Yu., Struchko G.Yu., Kotelkina A.A., Samakina E.S. The biological role of selenium (literature review). *Acta Medica Eurasica*. 2023;(2):114–123. [In Russian]. doi: 10.47026/2413-4864-2023-2-114-123

34. Тасакова О.С., Голубцова Н.Н., Гунин А.Г. Биологическая роль тиоредоксин-опосредованной внутриклеточной сигнализации при физиологическом старении (обзор литературы). *Acta Medica Eurasica*. 2023;(1):139–146. doi: 10.47026/2413-4864-2023-1-139-146

Tasakova O.S., Golubtsova N.N., Gunin A.G. Biological role of thioredoxin-mediated intracellular signaling during physiological aging (literature review). *Acta Medica Eurasica*. 2023;(1):139–146. [In Russian]. doi: 10.47026/2413-4864-2023-1-139-146

35. Reeves M.A., Hoffmann P.R. The human selenoproteome: recent insights into functions and regulation. *Cell. Mol. Life Sci.* 2009;66(15):2457–2478. doi: 10.1007/s00018-009-0032-4

36. Roman M., Jitaru P., Barbante C. Selenium biochemistry and its role for human health. *Metallomics*. 2014;6(1):25–54. doi: 10.1039/c3mt00185g

37. Handy D.E., Joseph J., Loscalzo J. Selenium, a micronutrient that modulates cardiovascular health via redox enzymology. *Nutrients*. 2021;13(9):3238. doi: 10.3390/nu13093238

38. Galasso M., Gambino S., Romanelli M.G., Donadelli M., Scupoli M.T. Browsing the oldest antioxidant enzyme: catalase and its multiple regulation in cancer. *Free Radic. Biol. Med.* 2021;172:264–272. doi: 10.1016/j.freeradbiomed.2021.06.010

39. Vlasova I.I. Peroxidase activity of human hemoproteins: keeping the fire under control. *Molecules*. 2018;23(10):2561. doi: 10.3390/molecules23102561
40. Kawabata T. Iron-induced oxidative stress in human diseases. *Cells*. 2022;11(14):2152. doi: 10.3390/cells11142152
41. Zimmerman M.T., Bayse C.A., Ramoutar R.R., Brumaghim J.L. Sulfur and selenium antioxidants: challenging radical scavenging mechanisms and developing structure-activity relationships based on metal binding. *J. Inorg. Biochem.* 2015;145:30–40. doi: 10.1016/j.jinorgbio.2014.12.020
42. Glade M.J., Meguid M.M. A glance at...antioxidant and antiinflammatory properties of dietary cobalt. *Nutrition*. 2018;46:62–66. doi: 10.1016/j.nut.2017.08.009
43. Даренская М.А., Рычкова Л.В., Колесников С.И., Кравцова О.В., Семенова Н.В., Бричагина А.С., Колесникова Л.И. Изменения в системе липопероксидации при базовой терапии экзогенно-конституционального ожирения у подростков разного пола. *Вопр. дет. диетол.* 2022;20(1):5–11. doi: 10.20953/1727-5784-2022-1-5-11
- Darenskaya M.A., Rychkova L.V., Kolesnikov S.I., Kravtsova O.V., Semenova N.V., Brichagina A.S., Kolesnikova L.I. Changes in lipid peroxidation system during standard therapy for exogenous constitutional obesity in adolescents of different sex. *Voprosy detskoy dietologii = Pediatric Nutrition*. 2022;20(1):5–11. [In Russian]. doi: 10.20953/1727-5784-2022-1-5-11
44. Vivek S.M., Dayal D., Khaiwal R., Bharti B., Bhalla A., Singh S., Kaur H., Attri S.V. Low serum copper and zinc concentrations in North Indian children with overweight and obesity. *Pediatr. Endocrinol. Diabetes Metab.* 2020;26(2):79–83. doi: 10.5114/pedm.2020.95627
45. Петрухина Е.А., Николаева Н.А., Акопьян А.А. Микроэлементный состав организма у детей при ожирении. *Бюл. мед. интернет-конф.* 2021;11(3):50.
- Petrukhina E.A., Nikolaeva N.A., Akopyan A.A. The microelement composition of the body in children with obesity. *Byulleten' meditsinskikh internet-konferentsiy = Bulletin of Medical Internet Conferences*. 2021;11(3):50. [In Russian].
46. Tascilar M.E., Ozgen I.T., Abaci A., Serdar M., Aykut O. Trace elements in obese Turkish children. *Biol. Trace Elem. Res.* 2011;143(1):188–195. doi: 10.1007/s12011-010-8878-8
47. Castillo-Valenzuela O., Duarte L., Arredondo M., Iñiguez G., Villarreal L., Pérez-Bravo F. Childhood obesity and plasma micronutrient deficit of Chilean children between 4 and 14 years old. *Nutrients*. 2023;15(7):1707. doi: 10.3390/nu15071707
48. Fan Y., Zhang C., Bu J. Relationship between selected serum metallic elements and obesity in children and adolescent in the U.S. *Nutrients*. 2017;9(2):104. doi: 10.3390/nu9020104
49. Grabeklis A.R., Skalny A.V., Ajsuvakova O.P., Skalnaya A.A., Mazaletskaya A.L., Klochkova S.V., Chang S.J.S., Nikitjuk D.B., Skalnaya M.G., Tinkov A.A. A search for similar patterns in hair trace element and mineral content in children with down's syndrome, obesity, and growth delay. *Biol. Trace Elem. Res.* 2020;196(2):607–617. doi: 10.1007/s12011-019-01938-6
50. Шарипова М.М., Ивкина М.В., Архангельская А.Н., Гуревич К.Г. Роль микроэлементов в развитии эндокринной патологии. *Экол. человека*. 2022;11(1):753–760. doi: 10.17816/humeco72102
- Sharipova M.M., Ivkina M.V., Arkhangel'skaya A.N., Gurevich K.G. Role of microelements in the development of endocrine pathology. *Ekologiya cheloveka = Human Ecology*. 2022;11(1):753–760. [In Russian]. doi: 10.17816/humeco72102
51. Cayir A., Doneray H., Kurt N., Orbak Z., Kaya A., Turan M.I., Yildirim A. Thyroid functions and trace elements in pediatric patients with exogenous obesity. *Biol. Trace Elem. Res.* 2014;157(2):95–100. doi: 10.1007/s12011-013-9880-8
52. Escobedo-Monge M.F., Torres-Hinojal M.C., Barrado E., Escobedo-Monge M.A., Marugán-Miguel-sanz J.M. Zinc nutritional status in a series of children with chronic diseases: a cross-sectional study. *Nutrients*. 2021;13(4):1121. doi: 10.3390/nu13041121
53. González-Domínguez Á., Millán-Martínez M., Domínguez-Riscart J., Lechuga-Sancho A.M., González-Domínguez R. Metal homeostasis and exposure in distinct phenotypic subtypes of insulin resistance among children with obesity. *Nutrients*. 2023;15(10):2347. doi: 10.3390/nu15102347
54. Nasab H., Rajabi S., Eghbalian M., Malakootian M., Hashemi M., Mahmoudi-Moghaddam H. Association of As, Pb, Cr, and Zn urinary heavy metals levels with predictive indicators of cardiovascular disease and obesity in children and adolescents. *Chemosphere*. 2022;294:133664. doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.133664
55. Fontenelle L.C., Cardoso de Araújo D.S., da Cunha Soares T., Climaco Cruz K.J., Henriques G.S., Marreiro D.D.N. Nutritional status of selenium in overweight and obesity: a systematic review and meta-analysis. *Clin. Nutr.* 2022;41(4):862–884. doi: 10.1016/j.clnu.2022.02.007
56. Błażewicz A., Szymańska I., Dolliver W., Suchocki P., Turło J., Makarewicz A., Skórzyńska-Dziduszko K. Are obese patients with autism spectrum disorder more likely to be selenium deficient? Research findings on pre- and post-pubertal children. *Nutrients*. 2020;12(11):3581. doi: 10.3390/nu12113581
57. Fontenelle L.C., de Paiva Sousa M., Dos Santos L.R., Cardoso B.E.P., de Sousa T.G.V., da Cunha Soares T., de Sousa Melo S.R., Morais J.B.S., da Silva Dias T.M., de Oliveira F.E., ... do Nascimento Marreiro D. Relationship between selenium nutritional status and markers of low-grade chronic inflammation in obese women. *Biol. Trace Elem. Res.* 2023;201(2):663–676. doi: 10.1007/s12011-022-03209-3
58. Zhu Y., He B., Xiao Y., Chen Y. Iron metabolism and its association with dyslipidemia risk in children

and adolescents: a cross-sectional study. *Lipids Health Dis.* 2019;18(1):50. doi: 10.1186/s12944-019-0985-8

59. Doğan G., Andiran N., Çelik N., Uysal S. Iron parameters, pro-hepcidin and soluble transferrin receptor levels in obese children. *Minerva Pediatr.* 2020;72(3):175–181. doi: 10.23736/S0026-4946.16.04273-0

60. Giannini C., Polidori N., Saltarelli M.A., Chiarelli F., Basilico R., Mohn A. Increased hepcidin levels and non-alcoholic fatty liver disease in obese prepubertal children: a further piece to the complex puzzle of metabolic derangements. *J. Pediatr. Endocrinol. Metab.* 2021;35(1):39–47. doi: 10.1515/jpem-2021-0070

61. Suárez-Ortegón M.F., Echeverri I., Prats-Puig A., Bassols J., Carreras-Badosa G., López-Bermejo A., Fernández-Real J.M. Iron status and metabolically unhealthy obesity in prepubertal children. *Obesity (Silver Spring)*. 2019;27(4):636–644. doi: 10.1002/oby.22425

62. Wei S., Zhang W., Wang C., Cao Y., Li L. Increased hepcidin expression in adipose tissue as a primary cause of obesity-related inhibition of iron absorption. *J. Biol. Regul. Homeost. Agents*. 2019;33(4):1135–1141.

63. Aka S., Kilercik M., Arapoglu M., Semiz S. The hepcidin and 25-OH-vitamin D levels in obese children as a potential mediator of the iron status. *Clin. Lab.* 2021;67(5):1154. doi: 10.7754/Clin.Lab.2020.200813

64. Ortiz Pérez M., Vázquez López M.A., Ibáñez Alcalde M., Galera Martínez R., Martín González M.,

Lendínez Molinos F., Bonillo Perales A. Relationship between obesity and iron deficiency in healthy adolescents. *Child. Obes.* 2020;16(6):440–447. doi: 10.1089/chi.2019.0276

65. Лесная А.С., Даренская М.А., Рычкова Л.В., Семёнова Н.В., Никитина О.А., Гребенкина Л.А., Кравцова О.В., Прохорова Ж.В., Колесникова Л.И. Гендерные особенности биоэлементного статуса у подростков с ожирением, проживающих в Сибирском регионе. *Вопр. дет. диетол.* 2023;21(5):81–87. doi: 10.20953/1727-5784-2023-5-81-87

Lesnaya A.S., Darenskaya M.A., Rychkova L.V., Semenova N.V., Nikitina O.A., Grebenkina L.A., Kravtsova O.V., Prokhorova Zh.V., Kolesnikova L.I. Gender-related characteristics of bioelement status in Siberian adolescents with obesity. *Voprosy detskoy dietologii = Pediatric Nutrition*. 2023;21(5):81–87. [In Russian]. doi: 10.20953/1727-5784-2023-5-81-87

66. Лесная А.С., Семёнова Н.В., Даренская М.А., Рычкова Л.В., Балжирова Д.В., Колесникова Л.И. К вопросу о нитрозативном стрессе у подростков с экзогенно-конституциональным ожирением. *Вопр. дет. диетол.* 2023;21(6):85–90. doi: 10.20953/1727-5784-2023-6-85-90

Lesnaya A.S., Semenova N.V., Darenskaya M.A., Rychkova L.V., Balzhirova D.V., Kolesnikova L.I. Nitrosative stress in adolescents with exogenous constitutional obesity. *Voprosy detskoy dietologii = Pediatric Nutrition*. 2023;21(6):85–90. [In Russian]. doi: 10.20953/1727-5784-2023-6-85-90

Сведения об авторах:

Лесная Анастасия Сергеевна, к.б.н., ORCID: 0000-0003-1055-4608, e-mail: tasi121212@mail.ru

Даренская Марина Александровна, д.б.н., проф. РАН, ORCID: 0000-0003-3255-2013,

e-mail: marina_darenskaya@inbox.ru

Рычкова Любовь Владимировна, д.м.н., проф., чл.-корр. РАН, ORCID: 0000-0002-0117-2563,

e-mail: iphr@sbamsr.irk.ru

Семёнова Наталья Викторовна, д.б.н., ORCID: 0000-0002-6512-1335, e-mail: natkor_84@mail.ru

Прохорова Жанна Владимировна, к.б.н., ORCID: 0000-0001-8236-1747, e-mail: 79148772181@yandex.ru

Шевчук Валерия Александровна, ORCID: 0009-0001-7783-2468, e-mail: vbataeva9078@yandex.ru

Колесникова Любовь Ильинична, д.м.н., проф., акад. РАН, ORCID: 0000-0003-3354-2992,

e-mail: kolesnikova20121@mail.ru

Information about the authors:

Anastasiya S. Lesnaya, candidate of biological sciences, ORCID: 0000-0003-1055-4608, e-mail: tasi121212@mail.ru

Marina A. Darenskaya, doctor of biological sciences, professor of the RAS, ORCID: 0000-0003-3255-2013,

e-mail: marina_darenskaya@inbox.ru

Lyubov V. Rychkova, doctor of medical sciences, professor, corresponding member of RAS, ORCID: 0000-0003-

2910-0737, e-mail: iphr@sbamsr.irk.ru

Natalya V. Semenova, doctor of biological sciences, ORCID: 0000-0002-6512-1335, e-mail: natkor_84@mail.ru

Zhanna V. Prokhorova, candidate of biological sciences, ORCID: 0000-0001-8236-1747; e-mail: 79148772181@yandex.ru

Valeria A. Shevchuk, ORCID: 0009-0001-7783-2468, e-mail: vbataeva9078@yandex.ru

Lyubov I. Kolesnikova, doctor of medical sciences, professor, academician of the RAS, ORCID: 0000-0003-3354-

2992, e-mail: kolesnikova20121@mail.ru

Поступила в редакцию 12.03.2024

После доработки 24.04.2024

Принята к публикации 28.06.2024

Received 12.03.2024

Revision received 24.04.2024

Accepted 28.06.2024