

Активность процессов перекисного окисления липидов и содержание металлов в сыворотке крови детей пубертатного возраста, проживающих на территориях с различной степенью антропогенной нагрузки

Ю.А. Тунакова¹, Р.И. Файзуллин², В.С. Валиев³

¹ Казанский национальный технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань, Россия;

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия;

³ Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан, Казань, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Процессы перекисного окисления липидов являются универсальным механизмом повреждения биологических мембран. Уровень образующегося в результате малонового диальдегида считается неспецифическим маркером адаптационных возможностей организма. Тесная взаимосвязь между соотношением ряда металлов и балансом окислительной и антиоксидантной систем позволит получить биологические маркеры качества жизни населения в урбоэкосистемах с высокой степенью антропогенной нагрузки (промышленно развитый город) в соотношении с территориями с малой степенью антропогенной нагрузки (сельская местность).

Цель. Определение возможной взаимосвязи между статусом урбанизированной среды, активностью процессов перекисного окисления липидов и содержанием металлов в крови детей в пубертатном возрасте. Выявление такой взаимосвязи необходимо для построения единой системы маркеров адаптационного резерва организма человека, проживающего в условиях различной интенсивности факторов воздействия.

Методы. В сыворотке крови 48 детей, проживающих в городах и сельской местности, методом атомно-абсорбционной спектроскопии определяли содержание железа (Fe), меди (Cu), цинка (Zn), стронция (Sr) и свинца (Pb). У детей фиксировали рост, вес и определяли площадь поверхности тела. Оценивали концентрацию малонового диальдегида в сыворотке крови потенциально здоровых детей в пубертатном возрасте по реакции с тиобарбитуровой кислотой. Распределение полученных значений малонового диальдегида и концентраций металлов оценивали статистически по группам исследования, корреляционные взаимосвязи — методом Спирмена. Для оценки значимости отдельных показателей провели дискриминантный анализ, использовали метод множественной регрессии.

Результаты. Не отмечено никаких значимых изменений концентраций Sr в контексте взаимосвязи с малоновым диальдегидом и с содержанием других металлов. Для Cu отмечены достаточно заметные корреляции с уровнями малонового диальдегида и с остальными металлами. Так, изменчивость концентраций Cu повторяет изменчивость концентраций Fe, но выражена значительно слабее. При построении модели множественной регрессии концентрации Cu вместе с Zn и площадью тела представляют наибольшую статистическую значимость. Методом дискриминантного анализа установлено, что содержание Pb обусловлено особенностями урбоэкосистемы, а активность процессов перекисного окисления липидов у детей может значительно меняться в зависимости от степени урбанизированности окружающей среды, статистически значимо возрастая в городских условиях.

Заключение. Установлена взаимосвязь между интенсивностью антропогенной нагрузки, активностью процессов перекисного окисления липидов и содержанием металлов в крови детей для оценки адаптационного резерва организма. Также установлена взаимосвязь между концентрациями малонового диальдегида и цинка, железа и меди в сыворотке крови. Отмечены более высокие концентрации малонового диальдегида в сыворотке крови детей, проживающих в городской среде с высокой антропогенной нагрузкой. Взаимосвязи между металлами и малоновым диальдегидом могут быть использованы для оценки адаптационного резерва организма человека.

Ключевые слова: маркер дезадаптации; перекисное окисление липидов; металлы; взаимосвязь.

КАК ЦИТИРОВАТЬ:

Тунакова Ю.А., Файзуллин Р.И., Валиев В.С. Активность процессов перекисного окисления липидов и содержание металлов в сыворотке крови детей пубертатного возраста, проживающих на территориях с различной степенью антропогенной нагрузки // Экология человека. 2025. Т. 32, № 10. С. XX–XX. DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco676892> EDN: MUSCHB

Рукопись поступила: 06.03.2025

Рукопись одобрена: 20.10.2025

Опубликована online: 27.10.2025

Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International License

© Эко-Вектор, 2025

Activity of Lipid Peroxidation Processes and Metal Content in Blood Serum of Pubertal Children Living in Areas With Different Degrees of Anthropogenic Load

Yulia A. Tunakova¹, Rashat I. Faizullin², Vsevolod S. Valiev³

¹ Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia;

² Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia;

³ Institute of Ecology and Subsoil Use of the Academy of Sciences of Republic of Tatarstan, Kazan, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Lipid peroxidation (LPO) is a universal mechanism of damage to biological membranes. The level of malonic dialdehyde (MDA) formed as a result is considered to be a nonspecific marker of adaptive capabilities of the organism. The close relationship between the ratio of a number of metals and the balance of oxidative and antioxidant systems will allow us to obtain biological markers of the quality of life of the population of large urban ecosystems in relation to low-urbanized areas.

AIM: determination of a possible relationship between the status of urbanized environment, activity of LPO processes and metal content in the blood of children at puberty. Identification of such a relationship is necessary for the construction of a unified system of markers of adaptation reserve of the human organism living in conditions of different intensity of exposure factors.

METHODS: The content of iron (Fe), copper (Cu), zinc (Zn), strontium (Sr) and lead (Pb) was determined in blood serum of 48 adolescent children living in urban and rural areas by atomic absorption spectroscopy. In children, height, weight and body surface area were recorded. The concentration of MDA in the serum of potentially healthy adolescent children at puberty was estimated by reaction with thiobarbituric acid. The distribution of the obtained MDA values and metal concentrations was evaluated statistically by study groups, correlations were evaluated by the Spearman method. Discriminant analysis and multiple regression method were used to assess the significance of individual indicators.

RESULTS: No significant changes in Sr concentrations were observed, both in the context of correlation with MDA and with the content of other metals. For Cu, rather noticeable correlations were noted both with MDA levels and with other metals. Thus, the variability of Cu concentrations repeats the variability of Fe concentrations, but is much weaker. When building a multiple regression model, Cu concentrations, together with Zn and body area, represent the greatest statistical significance. By the method of discriminant analysis it was established that Pb content is conditioned by the peculiarities of the urban ecosystem, and the activity of LPO processes in adolescent children can vary significantly depending on the degree of urbanization of the environment, statistically significantly increasing in urban conditions.

CONCLUSION: The relationship between the intensity of anthropogenic load, the activity of lipid peroxidation processes and the content of metals in the blood of adolescent children to assess the adaptation reserve of the organism has been established. The correlation between concentrations of malonic dialdehyde and zinc, iron and copper in blood serum was established. Higher concentrations of malonic dialdehyde in the blood serum of children living in the urban environment with high

anthropogenic load were noted. The relationships between metals and malonic dialdehyde can be used to assess the adaptation reserve of the human organism.

Keywords: maladaptation marker; lipid peroxidation; metals; relationship.

TO CITE THIS ARTICLE:

Tunakova YuA, Faizullin RI, Valiev VS. Activity of Lipid Peroxidation Processes and Metal Content in Blood Serum of Pubertal Children Living in Areas With Different Degrees of Anthropogenic Load. *Ekologiya cheloveka* (Human Ecology). 2025;32(10):XX–XX. DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco676892> EDN: MUSCHB

Received: 06.03.2025

Accepted: 20.10.2025

Published online: 27.10.2025

The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International License

© Eco-Vector, 2025

ОБОСНОВАНИЕ

Способность к адаптации является важнейшим свойством живых систем. Адаптация как приспособление организма к меняющимся условиям среды осуществляется системно и, в первую очередь, на клеточном уровне, поэтому адаптивный эффект реализуется, как правило, через мембранные системы клеток, а их состояние является стартовым звеном в цепи приспособительных реакций, при этом повреждающие эффекты неблагоприятных факторов неизбежно отражаются на целостности и устойчивости клеточных мембран, поэтому продукты окисления липидного слоя, попадая в плазму крови, формируют повышенный их уровень, легко оцениваемый в динамике [1].

В последние годы возрос интерес к поиску маркёров популяционной дезадаптации, в частности, к процессам перекисного окисления липидов (ПОЛ) как универсального механизма повреждения биологических мембран [2, 3]. При этом уровень образующегося в результате малонового диальдегида (МДА) считается неспецифическим маркёром адаптационных возможностей организма, а отмеченная многими исследователями [4–8] тесная взаимосвязь между соотношением ряда металлов и балансом окислительной и антиоксидантной систем открывает возможности к получению биологических маркёров для практической реализации моделей популяционного контроля качества жизни населения на территориях с высокой степенью антропогенной нагрузки.

Цель исследования. Определение возможной взаимосвязи между статусом урбанизированной среды, активностью процессов ПОЛ и содержанием металлов в крови детей в пубертатном возрасте. Выявление такой взаимосвязи необходимо для построения единой системы маркёров адаптационного резерва организма человека, проживающего в условиях различной интенсивности факторов воздействия.

МЕТОДЫ

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования служила сыворотка крови потенциально здоровых (не имеющих хронических заболеваний на момент обследования) детей в пубертатном возрасте (12–14 лет), проживающих на территориях с различной антропогенной нагруженностью урбоэкосистем: в городской среде (Казань) и в сельской местности (Высокогорский и Арский районы Республики Татарстан).

МАТЕРИАЛ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обследовано 48 человек. Распределение обследуемых по территории проживания и половому составу представлено следующим образом: 25 детей из города (11 мальчиков и 14 девочек; 44 и 56% соответственно); 23 — из сельской местности (9 мальчиков и 14 девочек; 39 и 61% соответственно). У детей фиксировали рост, вес и определяли площадь поверхности тела по R.D. Mosteller [9]. Исследования проводили с 2023 г. до летнего периода 2024 г. Для анализа использовали сыворотку крови.

При формировании групп учитывали следующие факторы: общая возрастная группа, разделение по полу (мальчики и девочки) и месту жительства (квартира в городе, частный сельский дом), обязательное отсутствие в анамнезе хронических заболеваний, полная семья. Исследование носило рекогносцировочный характер, поэтому подробного анкетирования не проводилось.

Проведение исследования одобрено локальным этическим комитетом Казанского (Приволжского) федерального университета (протокол № 50 от 26.09.2024).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАЛОНОВОГО ДИАЛЬДЕГИДА

В настоящем исследовании использовали общепринятый способ определения концентрации МДА по реакции с тиобарбитуровой кислотой (ТБК) [10, 11]. Растворение ТБК проводят в присутствии тритона X-100, препятствующего выпадению ТБК в осадок, для стабилизации триметинового комплекса добавляется трилон Б, а денатурированные сывороточные белки растворяются смесью этанола с хлороформом в соотношении 7:3 [12].

В основе метода лежит реакция между МДА и ТБК, которая при высокой температуре и в кислой среде протекает с образованием окрашенного в розовый цвет триметинового комплекса, содержащего одну молекулу МДА и две молекулы ТБК. Максимум поглощения комплекса приходится на 532 нм.

Рабочий раствор ТБК готовили путём растворения навески ТБК 864 мг в 100 мл смеси, содержащей 1 % раствора тритона X-100 и 8,2 М раствора этанола. Остальные растворы готовили на бидистиллированной воде.

К 1,5 мл сыворотки последовательно добавляли 0,5 мл 1 % раствора тритона X-100, 0,2 мл 0,6 М раствора HCl и 0,8 мл 0,06 М рабочего раствора ТБК. Смесь нагревали в кипящей водяной бане в течение 10 мин. Охлаждение проводили при 15 °C в течение 30 мин. Для стабилизации окраски добавляли 0,2 мл 5 М раствора трилона Б и доводили объём до 10 мл смесью этанола с хлороформом в соотношении 7:3. Оптическую плотность измеряли на спектрофотометре СФ-46 при 532 нм в стеклянной кювете шириной 1 см. Контролем служил холостой образец, в который вместо сыворотки добавляли бидистиллированную воду. В расчётах МДА использовали молярный коэффициент экстинкции, равный $0,156 \text{ мкм}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.

Расчёт концентрации МДА в сыворотке крови проводят по формуле:

$$C_{\text{МДА}} = \frac{(D_1 - D_2) \times U_2}{\epsilon \times L \times U_1},$$

где D_1 — оптическая плотность образца с сывороткой; D_2 — оптическая плотность контроля; U_1 — объём сыворотки, взятой на определение, 1,5 мл; U_2 — конечный объём смеси, 10 мл; L — длина кюветы, 1 см; $\epsilon=0,156$ — коэффициент молярной экстинкции комплекса МДА–ТБК в л/мкмоль/см. Результат представлен в мкмоль/л.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ МЕТАЛЛОВ

В полученной сыворотке крови методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе AAnalyst 400 (Perkin Elmer, США) определяли содержание железа (Fe), меди (Cu), цинка (Zn), стронция (Sr) и свинца (Pb).

Zn определяли по резонансной линии 213,9 нм с пределом обнаружения 1,5 мкг/л, Cu — 324,8 нм с пределом обнаружения 1 мкг/л, Fe — 248,3 нм с пределом обнаружения 5 мкг/л, Sr — 460,7 нм с пределом обнаружения 3 мкг/л, Pb — 283,3 нм с пределом обнаружения 7 мкг/л. Свинец определяли на безэлектродной высокочастотной лампе, остальные металлы — на лампах с полым катодом.

Калибровочные растворы готовили соответствующим разведением государственного стандартного образца. Измерение концентраций Zn, Cu, Fe, Sr осуществляли непосредственно в сыворотке крови с предварительным разведением 1:2 бидистиллированной водой. Свинец определяли после осаждения белков. Для этого к 1,5 мл сыворотки крови добавляли 0,75 мл 1,5% раствора HCl и инкубировали в течение 1 ч при 37 °C. После гидролиза белков их осаждали 0,75 мл 20% трихлоруксусной кислотой и центрифугировали в течение 10 мин при 1500 об/мин, разведение при этом также составило 1:2. Надосадочную жидкость использовали для анализа [13]. Результат представлен в мг/л.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Распределение полученных значений МДА и концентраций металлов оценивали статистически (Statistica 6): по группам исследования рассчитывали средние значения (M) и стандартные отклонения (SD), статистическую значимость различий оценивали по U-критерию Манна–Уитни,

корреляционные взаимосвязи — методом Пирсона. Для оценки значимости отдельных показателей провели дискриминантный анализ, использовали метод множественной регрессии.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные результаты исследования уровней МДА и металлов в сыворотке крови представлены в табл. 1.

Содержание МДА по всем наблюдениям колебалось в пределах 0,629–1,995 мкмоль/л, составив в среднем $1,059 \pm 0,368$ мкмоль/л, Zn — в пределах 0,444–1,310 мг/л, в среднем — $0,787 \pm 0,187$ мг/л, Cu — в пределах 0,413–1,811 мг/л, в среднем — $0,921 \pm 0,303$ мг/л, Fe — в пределах 0,417–2,900 мг/л, в среднем — $1,434 \pm 0,647$ мг/л, Sr — в пределах 0,053–0,222 мг/л, в среднем — $0,117 \pm 0,050$ мг/л, Pb — в пределах 0,010–0,071 мг/л, в среднем $0,045 \pm 0,014$ мг/л.

Оценка нормальности распределения показала, что распределение рассматриваемых значений близко к нормальному (критерий Шапиро–Уилка для всех показателей $W > 0,9$).

Оценивая результаты, представленные в табл. 1, следует отметить более высокие значения концентраций МДА у детей, проживающих на территориях с высокой степенью антропогенной нагрузки, вне зависимости от пола. При этом общая тенденция такова, что у девочек всегда отмечались более высокие значения МДА по сравнению с мальчиками, однако статистически значимые различия были только среди городских детей.

По-видимому, одним из факторов повышения активности ПОЛ у девочек является их большая физиологическая зрелость, сопровождаемая увеличением площади тела ($1,53 \text{ м}^2$ против $1,42 \text{ м}^2$ у мальчиков), при этом отмечена корреляционная взаимосвязь между МДА и площадью тела ($r=0,32$; $p < 0,05$). Следует отметить, что средний возраст девочек и мальчиков был примерно одинаковым: $12,70 \pm 0,89$ года у девочек и $12,80 \pm 0,93$ года у мальчиков. Корреляционные взаимосвязи оценивали методом Спирмена (табл. 2).

Ещё одной интересной закономерностью является более низкое содержание Zn в группе детей, проживающих на территориях с высокой степенью антропогенной нагрузки, то есть при высоких уровнях МДА. Корреляционный анализ подтверждает эту взаимосвязь, отмечая наличие высокой статистически значимой отрицательной корреляции между концентрациями Zn и содержанием МДА в сыворотке крови (см. табл. 2).

При этом именно для девочек характерны низкие концентрации Zn и более высокие концентрации Fe при высоких значениях МДА. Таким образом, низкие значения концентрации Zn, сопровождающиеся высоким уровнем сывороточного Fe, возможно, также являются фактором повышения активности ПОЛ. Относительно небольшая выборка обследуемых не даёт возможности однозначно интерпретировать качество полученных взаимосвязей, в связи с чем мы указываем на них в качестве констатации статистических закономерностей в конкретном наборе данных.

Обобщённая картина изменчивости концентраций МДА в сыворотке крови в зависимости от участка исследования, пола подростков и концентраций Zn в крови представлена на рис. 1. На рисунке следует обратить внимание на более выраженное снижение МДА при увеличении концентраций Zn у городских детей.

Другой важной особенностью является повышенное содержание Pb в сыворотке крови детей, проживающих на территориях с высокой степенью антропогенной нагрузки, статистически более высокое, чем в крови детей, проживающих в сельской местности (см. табл. 1). Кроме того, отмечена высокая прямая корреляционная взаимосвязь между концентрациями этого металла и МДА, а также высокая обратная корреляция с концентрациями Zn, что позволяет рассматривать высокие уровни Pb в качестве одного из элементов активации ПОЛ. Так как статистически значимых различий по содержанию Pb между мальчиками и девочками отмечено не было, можно предположить, что содержание этого металла обусловлено только особенностями формирующейся на территории проживания урбоэкосистемы.

При построении модели множественной регрессии с пошаговым включением признаков (Forward stepwise) значения Cu вместе с Zn и площадью тела представляют наибольшую статистическую значимость (табл. 3).

Из табл. 3 следует, что нормализованные весовые коэффициенты (Beta) значений Cu превышают даже показатель площади тела при сопоставимой ошибке, в большей степени уравнивая в модели влияние изменчивости Zn.

Для оценки классифицирующего вклада тех или иных показателей при сопоставлении их распределения между двумя группами обследуемых с территорий с различной степенью антропогенной нагрузки использовали дискриминантный анализ, который в режиме пошагового

включения признаков позволил выделить два главных показателя, наиболее сильно влияющих на классификацию наблюдений (их отнесение к той или иной урбоэкосистеме): значения МДА и Pb (табл. 4).

Значения именно этих показателей способны с высокой долей вероятности указать, к какой территории проживания относится то или иное наблюдение. Соответственно, подтверждается предположение о том, что содержание Pb обусловлено особенностями урбоэкосистемы, а активность процессов ПОЛ у детей может значительно меняться в зависимости от степени урбанизированности окружающей среды, статистически значимо возрастающая в условиях урбоэкосистем с высокой степенью антропогенной нагрузки.

ОБСУЖДЕНИЕ

Совершенно неактивным металлом в контексте взаимосвязи с МДА и в связи с содержанием других металлов является Sr. Не отмечено никаких значимых изменений его концентраций. В то же время для Cu отмечены достаточно заметные корреляции как с уровнями МДА, так и со многими металлами, хотя статистически значимых различий средних значений концентраций в разных группах отмечено не было. Общая тенденция такова, что изменчивость концентраций Cu повторяет изменчивость Fe, но выражена значительно слабее. Возможно, это обусловлено сочетанием известного антагонизма Cu и Zn с синергизмом Cu и Fe, в результате чего формируется сложная картина взаимосвязей, трудно интерпретируемая на небольших рядах наблюдений.

Отмеченная закономерность более низкого содержания цинка в сыворотке крови девочек по сравнению с мальчиками, возможно, связана с особенностями развития женского и мужского организмов. Например, с участием цинка в половом созревании мальчиков [14], а также с участием меди и цинка в функционировании супероксиддисмутазы, при этом медь и цинк находятся в конкурентных отношениях, что сказывается на активности супероксиддисмутазы [15]. По всей видимости, такая чувствительность антиоксидантных систем организма к содержанию отдельных металлов требует более критичной оценки роли продуктов ПОЛ, в частности МДА, в качестве маркеров окислительного стресса.

Проведённое исследование позволяет отметить наличие взаимосвязи между концентрациями МДА и некоторых металлов (Zn, Fe, Cu) в сыворотке крови. Отмечены более высокие концентрации МДА в сыворотке крови детей, проживающих на территориях с высокой степенью антропогенной нагрузки, по сравнению с проживающими в сельской местности ($p < 0,01$).

Факторами повышения активности ПОЛ у подростков являются относительно более высокие значения площади поверхности тела, относительно низкие концентрации Zn и более высокие концентрации Cu и Fe в сыворотке крови, а также проживание в городской урбоэкосистеме при повышенных концентрациях свинца в сыворотке крови. Взаимосвязь активности процессов ПОЛ с уровнем содержания металлов особенно ярко проявляется в группе детей, проживающих на территориях с высокой степенью антропогенной нагрузки, при этом у девочек пубертатного возраста отмеченные тенденции выражены ещё сильнее, что позволяет рассматривать их как целевую группу при проведении скрининговых исследований оксидативного стресса популяции в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования выявлен ряд закономерностей, позволяющих актуализировать важные взаимосвязи между металлами и МДА в рамках общей системы маркеров адаптационного резерва организма человека, проживающего в условиях различной интенсивности факторов воздействия.

В связи с относительно небольшой аналитической выборкой полноценное обобщение результатов представляется затруднительным. Однако наличие выраженных статистически значимых различий между группами исследования констатирует определённую детерминированность наблюдаемых характеристик и предполагает наличие закономерностей в явлениях, что актуализирует проведение в будущем более масштабного и репрезентативного исследования.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Ю.А. Тунакова — подготовка протокола исследования, подготовка первого варианта статьи; В.С. Валиев — сбор и анализ данных, статистический анализ, интерпретация результатов; Р.И. Файзуллин — подготовка обзора литературы, правки текста; все авторы — утверждение окончательной редакции статьи. Все авторы одобрили рукопись (версию для

публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Проведение исследования одобрено локальным этическим комитетом Казанского (Приволжского) федерального университета (протокол № 50 от 24.09.2024).

Согласие на публикацию. Все участники исследования добровольно подписали форму информированного согласия до включения в исследование.

Источники финансирования. Исследование выполнено в рамках реализации темы государственного задания, научные исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках исполнения обязательств по соглашению номер № 075-03-2025-335 от 16.01.2025 г., тема № FZSU-2023-0005 (рег. № 123030100016-5).

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: Yu.A. Tunakova: preparation of the study protocol, text edits; R.I. Faizullin: preparation of the literature review, preparation of the first version of the article; V.S. Valiev: data collection and analysis, statistical analysis, interpretation of results; all authors — approval of the final version of the article. All authors approved the manuscript (the version for publication), and also agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring proper consideration and resolution of questions related to the accuracy and integrity of any part of it.

Ethics approval: The study was approved by the local Ethics Committee of Kazan (Volga Region) Federal University (Protocol No. 50 dated 09/24/2024).

Consent for publication: All participants provided written informed consent prior to inclusion in the study.

Funding sources: The research was carried out within the framework of the implementation of the topic of the state assignment Scientific research was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of Russia within the framework of the fulfillment of obligations under the Agreement No. 075-03-2025-335, dated January 16, 2025, topic number FZSU-2023-0005 (reg. number 123030100016-5).

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously published material (text, images, or data) was used in this work.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work, as no new data was collected or created.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Deryugina AV, Koryagin AS, Kopylova SV, Talamanova MN. *Methods of studying stress and adaptation reactions of the organism by blood system indicators*. Nizhny Novgorod: Izdatel'stvo Nizhegorodskogo gosuniversiteta; 2010. 25 p. (In Russ.)
URL: <https://studfile.net/preview/5243809/>

2. Gawel S, Wardas M, Niedworok E, Wardas P. Dialdehyd malonowy (MDA) jako wskaźnik procesów peroksydacji lipidów w organizmie [Malondialdehyde (MDA) as a lipid peroxidation marker]. *Wiad Lek.* 2004;57(9-10):453–455. Polish.
3. Taha SAY, Shokeir AA, Mortada WI, et al. Effect of copper and zinc ions on biochemical and molecular characteristics of calcium oxalate renal stones: a controlled clinical study. *Biol Trace Elem Res.* 2024;202(2):410–422. doi: 10.1007/s12011-023-03686-0
4. Samet JM, Chen H, Pennington ER, Bromberg PA. Non-redox cycling mechanisms of oxidative stress induced by PM metals. *Free Radic Biol Med.* 2020;151:26–37. doi: 10.1016/j.freeradbiomed.2019.12.027
5. Chebieb I, Medjati ND, Harek Y, et al. Imbalance of plasma copper and zinc levels and the association between the Cu/Zn ratio and lipid peroxidation in Algerian bipolar patients. *Biol Trace Elem Res.* 2024;202(6):2450–2456. doi: 10.1007/s12011-023-03858-y
6. Spirlandeli AL, Deminice R, Jordao AA. Plasma malondialdehyde as biomarker of lipid peroxidation: effects of acute exercise. *Int J Sports Med.* 2014;35(1):14–18. doi: 10.1055/s-0033-1345132
7. Tucker PS, Dalbo VJ, Han T, Kingsley MI. Clinical and research markers of oxidative stress in chronic kidney disease. *Biomarkers.* 2013;18(2):103–115. doi: 10.3109/1354750X.2012.749302
8. Sun M, Yan G, Sun S, et al. Malondialdehyde and zinc may relate to severity of microvascular complications in diabetes: a preliminary study on older adults with type 2 diabetes mellitus in Northeast China. *Clin Interv Aging.* 2024;19:1141–1151. doi: 10.2147/CIA.S464615
9. Mosteller RD. Simplified calculation of body-surface area. *N Engl J Med.* 1987;317(17):1098. doi: 10.1056/NEJM198710223171717
10. Janero DR. Malondialdehyde and thiobarbituric acid-reactivity as diagnostic indices of lipid peroxidation and peroxidative tissue injury. *Free Radic Biol Med.* 1990;9(6):515–540. doi: 10.1016/0891-5849(90)90131-2
11. Ko KM, Godin DV. Ferric ion-induced lipid peroxidation in erythrocyte membranes: effects of phytic acid and butylated hydroxytoluene. *Mol Cell Biochem.* 1990;95(2):125–131. doi: 10.1007/BF00219970
12. Patent RUS № 2112241 / 27.05.1998. Rogozhin VV, Kuriljuk TT, Kershengolts BM. *Method for determining malonic dialdehyde concentration by using thiobarbituric acid.* Available from: <https://patentimages.storage.googleapis.com/41/e4/e7/075ccde56f4a5b/RU2112241C1.pdf> EDN: KXWDOC
13. Khavezov I, Tsalev D. *Atomic absorption analysis.* Leningrad: Khimiya; 1983. 144 p. (In Russ.) URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001160547>
14. Prasad AS, Mantzoros CS, Beck FW, et al. Zinc status and serum testosterone levels of healthy adults. *Nutrition.* 1996;12(5):344–348. doi: 10.1016/s0899-9007(96)80058-x
15. Elchuri S, Oberley TD, Qi W, et al. CuZnSOD deficiency leads to persistent and widespread oxidative damage and hepatocarcinogenesis later in life. *Oncogene.* 2005;24(3):367–380. doi: 10.1038/sj.onc.1208207

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / AUTHORS' INFO

* Автор, ответственный за переписку	* Corresponding author
* Тунакова Юлия Алексеевна , д-р хим. наук, профессор; адрес: Россия, 421001, Казань, ул. Четаева, д. 18; ORCID: 0000-0002-8826-8639; eLibrary SPIN: 5247-9698; e-mail: juliaprof@mail.ru	* Yulia A. Tunakova , Dr. Sci. (Chemistry), Professor; address: 18 Chetaeva st, Kazan, Russia, 421001; ORCID: 0000-0002-8826-8639; eLibrary SPIN: 5247-9698; e-mail: juliaprof@mail.ru
Файзуллин Рашат Искандарович , канд. мед. наук, доцент; ORCID: 0000-0001-6033-6356; eLibrary SPIN: 4818-6504; e-mail: RIFajzullin@kpfu.ru	Rashat I. Faizullin , MD, Cand. Sci. (Medicine), Assistant Professor; ORCID: 0000-0001-6033-6356; eLibrary SPIN: 4818-6504; e-mail: RIFajzullin@kpfu.ru
Валиев Всеволод Сергеевич , старший научный сотрудник; ORCID: 0000-0002-8848-5326;	Vsevolod S. Valiev , senior research associate; ORCID: 0000-0002-8848-5326; eLibrary SPIN: 6871-9839;

ТАБЛИЦЫ

Таблица 1. Результат исследования содержаний малонового диальдегида (мкмоль/л) и металлов (мг/л) в сыворотке крови (M±SD)**Table 1.** Result of MDA (μmol/L) and metals (mg/L) content in serum (M±SD)

Группа исследования	Малоновый диальдегид	Zn	Cu	Fe	Sr	Pb
Городская территория						
Девочки	1,371±0,395*	0,645±0,123	1,064±0,400	1,759±0,522 ¹	0,112±0,049	0,053±0,013
Мальчики	0,993±0,282	0,808±0,164*	0,876±0,168	1,283±0,441	0,117±0,040	0,049±0,013
Вся группа	1,235±0,398**	0,704±0,157	0,996±0,343	1,588±0,601	0,114±0,045	0,052±0,012 ²
Сельская территория						
Девочки	0,933±0,230	0,820±0,181	0,882±0,214	1,524±0,761*	0,125±0,062	0,039±0,011
Мальчики	0,797±0,162	0,938±0,161	0,790±0,252	0,983±0,415	0,117±0,051	0,036±0,014
Вся группа	0,868±0,208	0,877±0,178**	0,838±0,232	1,266±0,666	0,121±0,056	0,037±0,012

Примечание. * Статистически значимые ($p < 0,05$) более высокие значения при внутригрупповом сравнении мальчиков и девочек; ** статистически значимые ($p < 0,01$) более высокие значения при межгрупповом сравнении жителей городской и сельской местности.

Таблица 2. Корреляционная матрица Спирмена, отражающая взаимосвязи между различными показателями**Table 2.** Correlation matrix reflecting interrelations between different indicators

Переменные	Площадь тела	Малоновый диальдегид	Zn	Fe	Cu	Sr	Pb
Площадь тела	1,00	0,23	-0,28	0,12	0,07	0,11	0,28
Малоновый диальдегид	0,23	1,00	-0,94	0,59	0,42	0,04	0,70
Zn	-0,28	-0,94	1,00	-0,59	-0,31	-0,05	-0,67
Fe	0,12	0,59	-0,59	1,00	0,32	0,14	0,32
Cu	0,07	0,42	-0,31	0,32	1,00	0,21	0,28
Sr	0,11	0,04	-0,05	0,14	0,21	1,00	0,12
Pb	0,28	0,70	-0,67	0,32	0,28	0,12	1,00

Примечание. Выделены полужирным статистически значимые коэффициенты, $p < 0,05$.

Таблица 3. Параметры множественной регрессии, объединяющей значения концентраций Zn, Cu и величину площади поверхности тела с уровнем значений малонового диальдегида в сыворотке крови**Table 3.** Parameters of multiple regression combining Zn, Cu concentrations and body surface area with serum MDA levels

Параметры уравнения	Beta	Ошибка Beta	B	Ошибка B	Критерий t Стьюдента	Уровень значимости p
Свободный член	—	—	1,43511	0,227954	6,29560	0,000000
Zn	-0,626427	0,080363	-1,22925	0,157697	-7,79497	0,000000
Cu	0,354623	0,077370	0,43074	0,093977	4,58350	0,000038
Площадь тела	0,145617	0,071194	0,13051	0,063809	2,04535	0,046828

Примечание. Коэффициент корреляции $R=0,89$; коэффициент детерминации $R^2=0,79$; критерий $F=57,483$; уровень значимости $p < 0,001$; Beta — нормализованные весовые коэффициенты; B — абсолютные весовые коэффициенты.

Таблица 4. Главные классифицирующие показатели, выделенные дискриминантным анализом**Table 4.** Main classifying indicators highlighted by discriminant analysis

Параметры ($n=48$)	Лямбда Уилкса	Критерий F -remove	Уровень значимости p	Коэффициент детерминации R^2
Малоновый диальдегид	0,747561	3,768241	0,048513	0,253051
Pb	0,747254	3,748199	0,049161	0,253051

Примечание. Критерий $F=10,118$; уровень значимости $p < 0,0002$.

РИСУНКИ

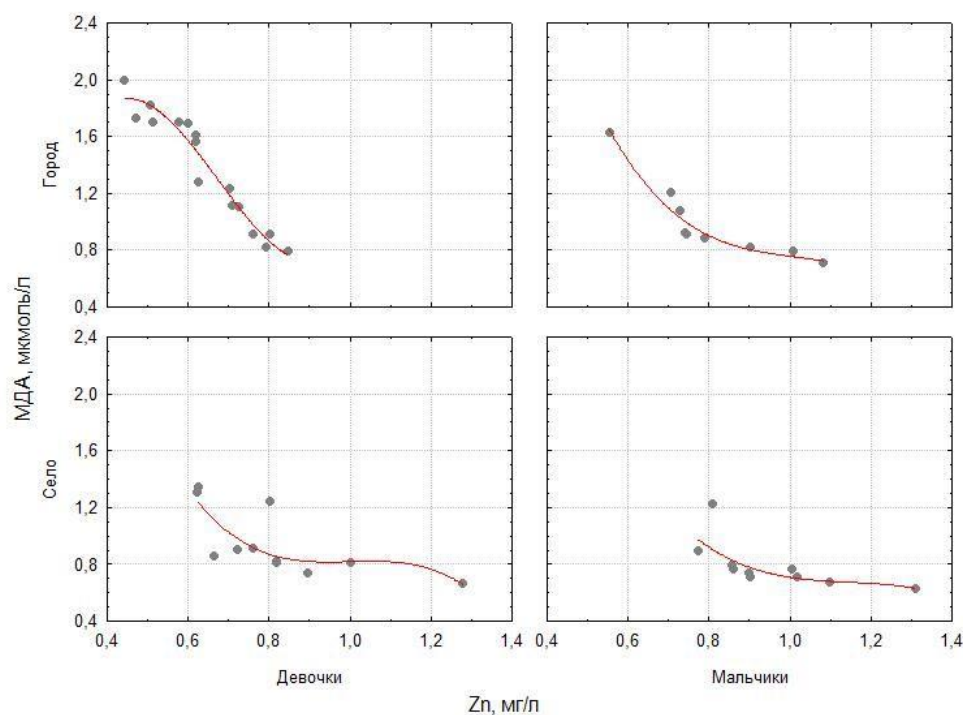


Рис 1. Изменчивость концентраций малонового диальдегида (МДА) в сыворотке крови подростков в разных экспериментальных группах в зависимости от содержания цинка.

Fig. 1. Variability of MDA concentrations in adolescent serum in different experimental groups according to zinc content.