

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. 705–713. DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco676892> EDN: MUSCHB

Activity of Lipid Peroxidation Processes and Metal Lipid Peroxidation and Serum Metal Levels in Adolescents in Regions With Various Degrees of Man-Induced 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 is a universal mechanism of biological membrane damage. The resulting malondialdehyde levels are a non-specific marker of the body's adaptive capabilities. A strong correlation between the levels of some metals and the oxidant/antioxidant balance may provide biological markers of quality of life in urban ecosystems with high man-induced load (industrial cities) versus regions with low man-induced load (rural areas).

AIM: The work aimed to assess the potential association between the urbanized environment status, lipid peroxidation levels, and serum metal levels in adolescents. This association is essential for creating a unified systems of adaptive capability markers in regions with different levels of exposure.

METHODS: The levels of iron (Fe), copper (Cu), zinc (Zn), strontium (Sr), and lead (Pb) were assessed by atomic absorption spectroscopy in the serum of 48 adolescents residing in urban and rural areas. The height, body weight, and body surface area were measured. Serum malondialdehyde levels were assessed in apparently healthy adolescents using the thiobarbituric acid reaction. The significance of intergroup differences in malondialdehyde and metal levels was assessed, and Spearman correlation analysis was performed. The significance of individual parameters was assessed using multiple regression discriminant analysis.

RESULTS: There were no significant changes in Sr levels associated with the levels of malondialdehyde or other metals. Cu levels showed significant correlations with the levels of malondialdehyde and other metals. Changes in Cu levels, though less pronounced, were consistent with changes in Fe levels. A multiple regression model found that Cu levels, together with Zn levels and body surface area, were the most significant parameters. The discriminant analysis found that Pb levels are determined by the urban ecosystem characteristics, and lipid peroxidation activity in children may vary considerably depending on the urbanized environment status and increases significantly in urban areas.

CONCLUSION: An association has been found between the degree of man-induced load, lipid peroxidation activity, and serum metal levels in children, which enables assessing the body's adaptive capabilities. Furthermore, an association has been discovered between serum malondialdehyde levels and serum zinc, iron, and copper levels. Serum malondialdehyde levels are higher in children residing in urban areas with high man-induced load. Metal–malondialdehyde associations can be used to assess the body's adaptive capabilities.

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

To cite this article:

Tunakova YuA, Faizullin RI, Valiev VS. Activity of Lipid Peroxidation Processes and Metal Lipid Peroxidation and Serum Metal Levels in Adolescents in Regions With Various Degrees of Man-Induced Load. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2025;32(10):705–713. DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco676892>

EDN: MUSCHB

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco676892>

EDN: MUSCHB

居住在不同人为负荷区域的青春期儿童血清脂质过氧化过程活性与金属含量

Yulia A. Tunakova¹, Rashat I. Faizullin², Vsevolod S. Valiev³¹ 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

摘要

论证。脂质过氧化过程是损伤生物膜的普遍机制之一。其产物丙二醛水平被视为机体适应能力的非特异性标志物。若特定金属比例与氧化-抗氧化体系平衡之间存在紧密关联,则可获得用于比较高人为负荷(工业化城市)与低人为负荷(农村地区)区域居民生活质量的生物学标志物。

目的。确定城市环境状态、脂质过氧化过程活性与青春期儿童血清金属含量之间可能存在的关系。识别此类关系对于构建适用于不同暴露强度条件下人体适应储备的统一指标体系具有必要性。

方法。对居住在城市与农村地区的48名青春期儿童血清样本进行原子吸收光谱分析,测定铁(Fe)、铜(Cu)、锌(Zn)、锶(Sr)及铅(Pb)含量。记录受试者身高、体重及体表面积。丙二醛浓度在青春期潜在健康儿童的血清中采用硫代巴比妥酸反应法进行测定。分别按研究分组对丙二醛与金属浓度分布进行统计分析;相关性采用Spearman方法评估。为评估单项指标的显著性,使用判别分析和多元回归。

结果。Sr含量的变化与丙二醛水平及其他金属无显著相关。Cu与丙二醛以及其他金属之间存在较为明显的相关性。Cu浓度的变异趋势与Fe相似,但表达程度明显较弱。在多元回归模型中,Cu与Zn及体表面积具有最高统计显著性。判别分析表明,Pb含量由城市生态系统特征所决定,而儿童脂质过氧化过程活性可随环境城市化程度显著变化,在城市条件下呈统计学显著升高。

结论。确认了人为负荷强度、脂质过氧化过程活性及儿童血清金属含量之间的关联,这些关系可用于评估机体适应储备。此外,丙二醛与锌、铁、铜之间也存在相关性。居住在高人为负荷城市环境的儿童血清丙二醛水平更高。金属与丙二醛之间的关系可作为人体适应储备评估的参考指标。

关键词: 失适应标志物; 脂质过氧化; 金属; 相关性。

引用本文:

Tunakova YuA, Faizullin RI, Valiev VS. 居住在不同人为负荷区域的青春期儿童血清脂质过氧化过程活性与金属含量. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2025;32(10):705–713. DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco676892> EDN: MUSCHB

收到: 06.03.2025

接受: 20.10.2025

发布日期: 27.10.2025

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 ноября 2024 по февраль 2025. 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 проводили.

Исследование 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 мкМ⁻¹·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 линейной 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:

Таблица 1. Результат исследования содержаний малонового диальдегида (мкмоль/л) и металлов (мг/л) в сыворотке крови ($M \pm SD$)

Table 1. Serum malondialdehyde ($\mu\text{mol/L}$) and metal (mg/L) levels ($M \pm SD$)

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

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.

12,70±0,89 года у девочек и 12,80±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 как на констатацию 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

Таблица 2. Корреляционная матрица Спирмена, отражающая взаимосвязи между различными показателями

Table 2. Spearman correlation matrix for associations between various parameters

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 линейной регрессии, объединяющей значения концентраций Zn, Cu и величину площади поверхности тела с уровнем значений малонового диальдегида в сыворотке крови

Table 3. Multiple linear regression parameters for associations between Zn levels, Cu levels, body surface area, and serum malondialdehyde levels

Параметры уравнения	Beta	Ошибка Beta	B	Ошибка B	Критерий t Стьюдента	Уровень значимости p
Свободный член	—	—	1,43511	0,227954	6,29560	<0,001
Zn	-0,626427	0,080363	-1,22925	0,157697	-7,79497	<0,001
Cu	0,354623	0,077370	0,43074	0,093977	4,58350	<0,001
Площадь тела	0,145617	0,071194	0,13051	0,063809	2,04535	0,047

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.

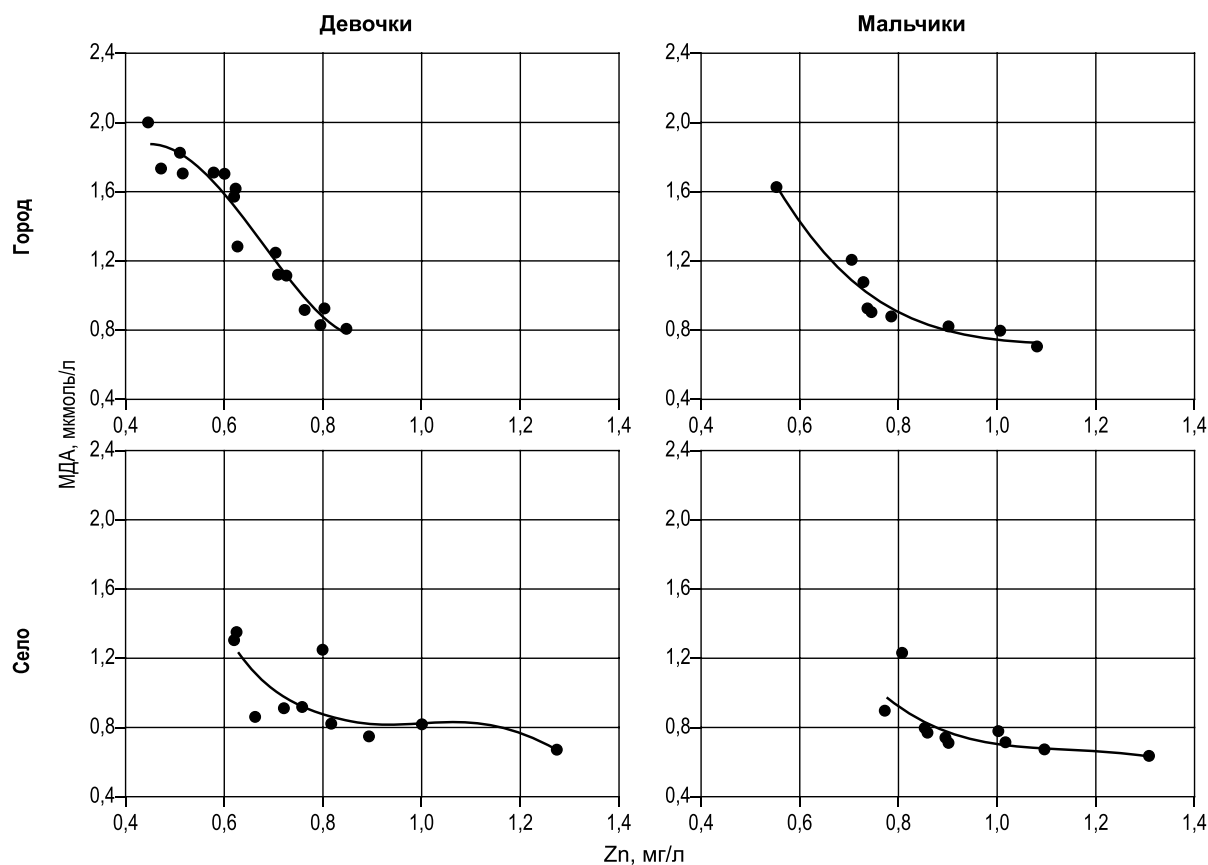


Рис 1. Изменчивость концентраций малонового диальдегида (МДА) в сыворотке крови подростков в разных экспериментальных группах в зависимости от содержания цинка.
Fig. 1. Variability of serum malondialdehyde (MDA) levels in adolescents in different study groups depending on zinc levels.

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 возрастая 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.

Таблица 4. Главные классифицирующие показатели, выделенные дискриминантным анализом
Table 4. Primary classifying parameters identified by the discriminant analysis

Показатель (n=48)	Лямбда Уилкса	Критерий F-remove	Уровень значимости p	Коэффициент детерминации R ²
Малоновый диальдегид	0,747561	3,768241	0,049	0,253051
Pb	0,747254	3,748199	0,049	0,253051

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

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 маркёров 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 маркёров 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; Р.И. Файзуллин — подготовка обзора литературы, правки текста; В.С. Валиев — сбор и анализ данных, статистический анализ, интерпретация результатов. 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).

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 использовались.

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: methodology, writing—original draft; R.I. Faizullin: investigation, writing—review & editing; V.S. Valiev: investigation, formal analysis. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

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

Funding sources: The study was conducted as part of a state assignment; research were supported by the Ministry of Education and Science of Russia under agreement No. 075-03-2025-335 of January 16, 2025, topic No. FZSU-2023-0005 (registration 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 science 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/NEJM19871023171717
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

ОБ АВТОРАХ

* **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

Файзуллин Рашат Искандарович, канд. мед. наук, доцент;
ORCID: 0000-0001-6033-6356;
eLibrary SPIN: 4818-6504;
e-mail: RIFajzullin@kpfu.ru

Валиев Всеволод Сергеевич;
ORCID: 0000-0002-8848-5326;
eLibrary SPIN: 6871-9839;
e-mail: podrost@mail.ru

AUTHORS' INFO

* **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

Rashat I. Faizullin, MD, Cand. Sci. (Medicine), Associate Professor;
ORCID: 0000-0001-6033-6356;
eLibrary SPIN: 4818-6504;
e-mail: RIFajzullin@kpfu.ru

Vsevolod S. Valiev;
ORCID: 0000-0002-8848-5326;
eLibrary SPIN: 6871-9839;
e-mail: podrost@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author