

© Сетко Н.П., Мустафин И.Т., 2021

УДК 616.314-089.23-53.2(470.56)

Особенности элементного баланса у детей с экологически детерминированной стоматологической заболеваемостью

Н.П. Сетко, И.Т. Мустафин

ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный медицинский университет» Минздрава России, ул. Советская, д. 6, г. Оренбург, 460000, Российская Федерация

Резюме: *Введение.* Необходимость оценки, предупреждения и коррекции элементно-зависимых заболеваний, повышения уровня безопасности, прогнозирования и снижения риска воздействия антропогенных загрязнителей в развитии стоматологической заболеваемости детского населения является актуальным и перспективным направлением современной гигиены. *Цель* – определить микроэлементное состояние зубной ткани у детей, имеющих стоматологическую заболеваемость в условиях воздействия различного уровня антропогенной нагрузки на организм. *Материалы и методы.* Для достижения этой цели в зубной ткани здоровых и кариозных молочных зубов, удаленных при санации, определено содержание 13 микроэлементов. Исследования проводились методом атомно-адсорбционной спектрофотометрии у детей 7–11 лет двух исследуемых групп. Первую группу составили 56 детей, проживающих на территории с существенно напряженным уровнем антропогенной нагрузки ($K_{\text{средн.}} = 1,17$ ед.) и высокой степенью распространенности кариеса (86,9 %), вторую группу – 68 детей, проживающих на территории с относительно напряженным уровнем ($K_{\text{средн. сумм.}} = 0,68$ ед.) и средним уровнем распространенности кариеса (77,1 %), согласно критериям ВОЗ. Результаты исследования. Полученные данные свидетельствуют о том, что уровень накопления токсичных микроэлементов в твердых тканях зубов детей 1-й группы был выше, чем у детей 2-й группы, в том числе свинца – в 2,6 раза, висмута – в 1,8 раза, кадмия – в 2,5 раза и стронция – в 1,2 раза. Установлено, что в кариозных зубах по сравнению со здоровыми зубами накопление свинца было в 3,04 раза выше, кадмия – в 1,2 раза, висмута – в 3,13 раза, а содержание стронция снижено в 2,5 раза. *Выводы.* Исследование выявило особенности взаимодействия эссенциальных химических элементов друг с другом в организме детей в виде антагонистических эффектов между кадмием и цинком, медью и марганцем и синергизмом в содержании в здоровых зубах меди, железа, никеля, цинка и кобальта, в основе механизма которых лежит конкуренция за связь с веществом-переносчиком и замещение одного элемента другим. Кроме того, выявлено, что изменения микроэлементного баланса в твердых тканях здоровых и кариозных зубов не носят однонаправленного характера, отражая сложные взаимодействия между организмом детей и антропогенными факторами. Доказано, что при развитии кариеса зубов на фоне накопления в твердых тканях токсичных микроэлементов происходит резкое снижение содержания эссенциальных микроэлементов. Исследование показало, что у детей, подвергающихся высокому уровню воздействия химических загрязнителей, твердые ткани зубов являются депонирующей средой для свинца, кадмия, висмута и стронция. Также показано, что у детей с экологически детерминированной стоматологической заболеваемостью установлены особенности развития дисбаланса биотических концентраций эссенциальных и накопление токсичных микроэлементов.

Ключевые слова: эссенциальные и токсичные микроэлементы, стоматологическая заболеваемость, антропогенное загрязнение, дети 7–11 лет.

Для цитирования: Сетко Н.П., Мустафин И.Т. Особенности элементного баланса у детей с экологически детерминированной стоматологической заболеваемостью // Здоровье населения и среда обитания. 2021. № 1 (334). С. 44–48. DOI: <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2021-334-1-44-48>

Информация об авторах:

✉ **Сетко** Нина Павловна – д.м.н., профессор, зав. кафедрой профилактической медицины; e-mail: nina.setko@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-6698-2164>.

Мустафин Ильнур Тимурович – соискатель кафедры профилактической медицины; e-mail: k_epidem.fpdo@orgma.ru; <https://orcid.org/0000-0006-9834-8642>.

Characteristics of Trace Element Balance in Children with Pollution-Related Dental Diseases

N.P. Setko, I.T. Mustafin

Orenburg State Medical University of the Russian Ministry of Health,
6 Sovetskaya Street, Orenburg, 460000, Russian Federation

Summary. *Introduction:* The necessity to assess, prevent and correct element-dependent diseases, increase the level of safety, predict and reduce the risk of exposures to industrial contaminants in the development of dental diseases in the child population is an important and promising area of modern hygiene. The *objective* of our study was to establish concentrations of trace elements in dental tissues of children exposed to various levels of industrial pollution. *Materials and methods:* We used atomic absorption spectrophotometry to measure 13 trace elements in extracted healthy and carious primary teeth in two groups of children aged 7–11. The first group consisted of 56 children living in the area with a significantly high level of anthropogenic burden ($C_{\text{averaged total}} = 1.17$ units) and a high prevalence of caries (86.9 %) while the second group consisted of 68 children living in the area with a relatively high level of anthropogenic burden ($C_{\text{averaged total}} = 0.68$ units) and a mean prevalence of caries (77.1 %) according to WHO criteria. *Results:* Our findings indicate that accumulation of toxic microelements in hard dental tissues of children in the first group was higher than in children of the second group: concentrations of lead, bismuth, cadmium and strontium were 2.6, 1.8, 2.5, and 1.2 times higher, respectively. We also observed higher accumulation of environmental toxicants in carious teeth compared to healthy ones. Thus, lead, cadmium and bismuth levels in carious teeth were 3.04, 1.2 and 3.13 times higher than in healthy teeth, respectively, while the level of strontium was, on the opposite, 2.5 times lower. *Conclusions:* The study revealed specific features of the interaction of essential trace elements in children in the form of antagonistic effects between cadmium and zinc, copper and manganese, and synergism in the content of copper, iron, nickel, zinc, and cobalt in healthy teeth, the mechanism of which is based on competition for a bond with a carrier substance and replacement of one element with another. In addition, we established that changes in the microelement balance in the hard tissues of healthy and carious teeth are not unidirectional in nature, thus reflecting complex interactions between the child's organism and anthropogenic factors. The results proved that accumulation of toxic trace elements in hard dental tissues promotes caries development and causes a sharp decrease in the content of essential trace elements, especially chromium, manganese, iron, and copper. The study showed that hard dental tissues are a depot for lead, cadmium, bismuth, and strontium in children environmentally exposed to high levels of industrial chemicals. Features of developing an imbalance of biotic concentrations of essential elements and accumulating toxic microelements in children with pollution-related tooth pathology were also established.

Keywords: essential and toxic microelements, dental diseases, environmental pollution, children aged 7–11.

For citation: Setko NP, Mustafin IT. Characteristics of trace element balance in children with pollution-related dental diseases. *Zdorov'e Naseleniya i Sreda Obitaniya*. 2020; (1(334)):44–48. (In Russian) DOI: <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2021-334-1-44-48>

Author information:

✉ **Nina P. Setko**, D.M.Sc., Professor, Head of the Department for Preventive Medicine; e-mail: nina.setko@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-6698-2164>.

Ilnur T. Mustafin, Applicant for Preventive Medicine; e-mail: k_epidem.fpdo@orgma.ru; <https://orcid.org/0000-0006-9834-8642>.

Введение. Необходимость оценки предупреждения и коррекции элементарно-зависимых заболеваний, повышения уровня безопасности, прогнозирования и снижения риска воздействия антропогенных загрязнителей в развитии стоматологической заболеваемости детского населения является актуальным и перспективным направлением современной гигиены.

Распространение латентных повреждений зубов детей в целом в связи с повышенным загрязнением окружающей среды сегодня является актуальной эколого-гигиенической проблемой [1]. Стабильность химического состава^{1,2}, является одним из важнейших и обязательных условий нормального функционирования организма [2, 3]. Внедрение новых технологий, рост промышленности, интенсификация сельского хозяйства, совершенствование диагностической и методической базы определяют необходимость изучения роли химических элементов в риске развития заболеваний под влиянием биогеохимических условий региона проживания [4, 5].

Отклонения в содержании микроэлементов, вызванные, среди прочего, воздействием комплекса антропогенных факторов, приводят к широкому спектру нарушений микроэлементного состава органов в виде недостатка, избытка или нарушения тканевого перераспределения микроэлементов. Поэтому выявление и оценка сдвигов в обмене микроэлементов являются неоспоримым доказательством того, что коррекция дисбаланса химических элементов — один из важнейших факторов профилактики заболеваний в рамках современной медицины.

Цель исследования — определить микроэлементное состояние зубной ткани у детей, имеющих стоматологическую заболеваемость,

в условиях воздействия различного уровня антропогенной нагрузки на организм.

Материалы и методы. Содержание микроэлементов в зубной ткани здоровых и кариозных молочных зубов, удаленных при санации, проведено у детей 7–11 лет двух исследуемых групп с соблюдением этических принципов Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации и наличием информированного согласия на обследование. Первую группу составили 56 детей, проживающих на территории с существенно напряженным уровнем антропогенной нагрузки ($K_{\text{усред.сумм.}} = 1,17$ ед.) и высокой степенью распространенности кариеса (86,9 %), вторую группу — 68 детей, проживающих на территории с относительно напряженным уровнем ($K_{\text{усред.сумм.}} = 0,68$ ед.) и средним уровнем распространенности кариеса (77,1 %), по критериям ВОЗ (1997). Содержание микроэлементов в зубной ткани проведено методом атомно-адсорбционной спектrophотометрии^{3,4}, с определением 13 элементов. Полученные результаты статистически обработаны с применением универсального пакета Statistica версия 6.0 в среде Windows XP. Для выявления статистически значимых различий в сравниваемых группах применяли параметрический метод Стьюдента с расчетом ошибки репрезентативности и t-коэффициента Стьюдента и непараметрический метод с определением критерия Манна — Уитни.

Результаты исследований. Анализ данных, представленных в табл. 1, свидетельствует о том, что в твердых тканях молочных зубов детей 1-й исследуемой группы, проживающих на территории с высоким уровнем антропогенной нагрузки, в сравнении с данными 2-й исследуемой

Таблица. Содержание микроэлементов в зубах детей исследуемых групп (мкг/г)
Table. Trace element concentrations in teeth of children in the groups under study (µg/g)

Микроэлементы / Trace elements	Исследуемые группы / Studied groups			
	1-я группа / Group 1		2-я группа / Group 2	
	здоровые зубы / healthy teeth	кариозные зубы / carious teeth	здоровые зубы / healthy teeth	кариозные зубы / carious teeth
Висмут / Bismuth	0,36 ± 0,06*	1,13 ± 0,30*	0,20 ± 0,02	0,61 ± 0,12
Железо / Iron	4,46 ± 0,82	1,58 ± 0,22*	4,93 ± 1,10	4,87 ± 0,96
Кадмий / Cadmium	0,10 ± 0,002*	0,12 ± 0,02*	0,04 ± 0,002	0,04 ± 0,002
Калий / Potassium	28,18 ± 6,82*	13,84 ± 6,84*	22,78 ± 8,12	29,22 ± 8,36
Кобальт / Cobalt	0,04 ± 0,001*	0,10 ± 0,01*	0,16 ± 0,06	0,22 ± 0,14
Литий / Lithium	7,99 ± 2,12*	3,45 ± 1,12*	6,40 ± 1,28	5,40 ± 2,46
Марганец / Manganese	1,05 ± 0,12	0,32 ± 0,06*	0,97 ± 0,46	0,70 ± 0,26
Медь / Copper	1,98 ± 0,20*	0,74 ± 0,06*	2,77 ± 0,86	1,66 ± 0,84
Натрий / Sodium	8,95 ± 3,68	0,85 ± 0,22*	10,45 ± 3,64	2,39 ± 0,88
Никель / Nickel	0,54 ± 0,03*	0,24 ± 0,03*	0,70 ± 0,12	1,33 ± 0,42
Свинец / Lead	0,23 ± 0,04*	0,70 ± 0,10*	0,19 ± 0,001	0,05 ± 0,001
Стронций / Strontium	12,26 ± 4,20*	4,98 ± 0,98*	10,28 ± 3,82	2,80 ± 0,14
Хром / Chromium	0,62 ± 0,01*	0,08 ± 0,002*	0,45 ± 0,22	0,24 ± 0,10
Цинк / Zinc	16,57 ± 3,20	8,32 ± 2,48*	17,60 ± 4,68	18,67 ± 6,45

Примечание: * $p \leq 0,05$ при сравнении данных детей 1-й и 2-й группы.

Note: * $p \leq 0.05$ when comparing the data on children of the first and second groups.

¹ Оберлис Д., Харланд Б., Скальный А. Биологическая роль макро- и микроэлементов у человека и животных. СПб.: Наука, 2008. 542 с.

² Скальный А.В., Грабеллис А.Р., Скальная М.Г. и др. Химические элементы в гигиене и медицине окружающей среды. М., 2019. 339 с.

³ МР 4096–86 «Методические рекомендации по спектрохимическому определению тяжелых металлов в объектах окружающей среды, полимерах и биологическом материале».

⁴ МУК 4.1.763–4.1.779–99 «Определение химических соединений в биологических средах. Сборник методических указаний».

группы уровень накопления свинца был выше в 2,6 раза, висмута — в 1,8 раза, кадмия — в 2,5 раза, а также потенциально токсичного стронция — в 1,2 раза, что является признаком экологической детерминации стоматологической заболеваемости.

Сравнительный анализ содержания эссенциальных микроэлементов в организме детей двух исследуемых групп показал, что в удаленных здоровых зубах детей, имеющих стоматологическую заболеваемость и проживающих на территории с высоким уровнем антропогенной нагрузки (1-я группа), выявлен дисбаланс в содержании эссенциальных микроэлементов. Это проявилось в увеличении содержания марганца на 8,2 %, хрома — на 37,8 %, лития — на 24,8 % и снижении содержания цинка на 5,9 %, никеля — на 22,9 %, кобальта — на 75 %, меди — на 28,5 %, железа — на 9,5 %, что объясняется явлениями синергизма и антагонизма [6–9]. При этом в зубах установлен синергизм содержания между кадмием и цинком, медью, железом, никелем, кобальтом и антагонизм между уровнями содержания меди и марганца, оказывающих влияние на костную ткань и, вероятно, усиливающих риск развития кариеса зубов [10, 11].

Проведенный сравнительный анализ содержания микроэлементов в кариозных и здоровых молочных зубах у детей исследуемых групп показал, что накопление токсичных микроэлементов в кариозных зубах достоверно превышало их количество в здоровых зубах у детей 1-й группы, подвергавшихся высокому уровню антропогенного воздействия. Так, содержание в кариозных зубах у детей 1-й исследуемой группы токсичных микроэлементов превышало в 3,1 раза и составляло $0,70 \pm 0,10$ мкг/г и $0,23 \pm 0,04$ мкг/г ($p \leq 0,05$), висмута — в 3,13 раза ($1,13 \pm 0,30$ мкг/г и $0,36 \pm 0,06$ мкг/г, $p \leq 0,05$), кадмия — в 1,2 раза ($0,12 \pm 0,02$ мкг/г

и $0,10 \pm 0,01$ мкг/г ($p \leq 0,05$) соответственно (рис. 1). У детей 2-й группы, проживающих на территории со средним уровнем антропогенного воздействия, в кариозных зубах отличалось накопление только висмута ($0,61 \pm 0,06$ мкг/г и $0,20 \pm 0,041$ мкг/г, $p \leq 0,05$).

Важно акцентировать внимание на том, что содержание стронция в кариозных зубах детей обеих исследуемых групп по сравнению с данными о здоровых зубах было снижено в 2,5 раза у детей 1-й группы и в 3,7 раза у детей 2-й группы. Полученный научный факт, вероятно, объясняется тем, что, попадая в организм, стронций, вследствие сходства с кальцием (Ca^{2+}) по радиусу атома, энергии ионизации, координационному числу, способен замещать его в костной ткани и тем самым накапливаться в ней. При кариесе за счет разрушения костной ткани снижается и содержание стронция в твердых тканях кариозных зубов [12].

Анализ данных, представленных в табл. 1, свидетельствует о том, что в кариозных зубах у детей 1-й группы по сравнению с данными 2-й группы было снижено содержание цинка на 55,4 %, никеля — на 82 %, кобальта — на 54,5 %, меди — на 55,4 %, железа — на 67,6 %, марганца — на 54,3 %, хрома — на 66,7 %, лития — на 36,1 %, калия — на 52,6 % и натрия — на 64,4 %.

Значительный научный интерес представляют полученные данные об особенностях содержания эссенциальных микроэлементов в здоровых и кариозных зубах и стоматологической заболеваемости детей, проживающих в условиях антропогенного воздействия, так как позволяют определить коррекцию повреждения зубов. Доказано, что в кариозных зубах происходит снижение цинка на 49,8 %, никеля — на 55,6 %, меди — на 62,6 %, железа — на 64,6 %, марганца — на 69,5 %, хрома — на 87,1 %, лития — на 56,8 %, калия — на 50,9 %. На этом

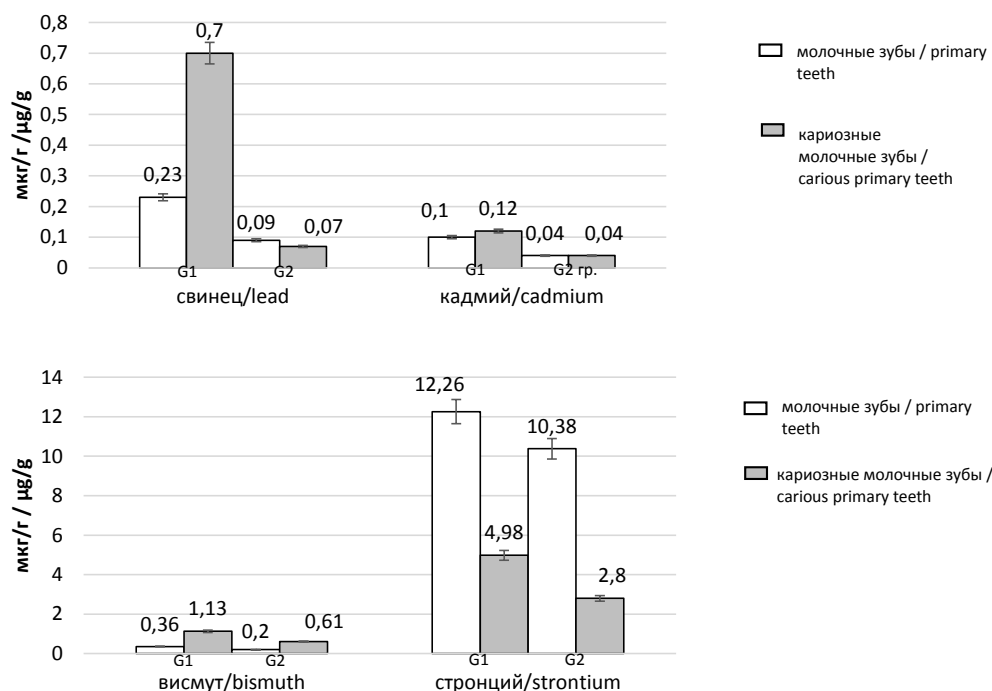


Рис. 1. Содержание токсичных микроэлементов в твердых тканях зубов у детей исследуемых групп
Fig. 1. Concentrations of toxic microelements in dental hard tissues of children in both groups

фоне выявлено повышенное содержание кобальта на 150 %, которое, вероятно, связано с химическим сходством кобальта с марганцем по радиусу атома, энергии ионизации и координационному числу, вследствие чего кобальт способен замещать марганец (рис. 2).

Дисбаланс в содержании эссенциальных микроэлементов у детей, проживающих на территориях с относительно невысоким антропогенным воздействием, характеризовался снижением меди на 40,1 %, железа — лишь на 1,2 %, марганца — на 27,8 %, хрома — на 46,7 %, лития — на 15,6 % и увеличением цинка на 6,1 %, никеля — на 90 %, кобальта — на 37,5 % и калия — на 28,3 %.

Обсуждение. Выявленные изменения микроэлементного баланса в твердых тканях зубов детей, подвергающихся различным уровням антропогенного воздействия, не носят однонаправленного характера и отражают сложные взаимодействия между организмом и окружающей средой, а установленный даже незначительный дисбаланс элементного состава организма может быть предиктором развития экологически обусловленных заболеваний [13, 14]. Доказано, что в твердых тканях зубов накапливаются токсичные микроэлементы, уровень которых был значительно выше у детей со стоматологическими болезнями и проживающих в условиях воздействия высокого уровня антропогенных загрязнителей. В механизме взаимодействия эссенциальных микроэлементов у детей с экологически детерминированной стоматологической заболеваемостью установлен антагонизм между медью и марганцем, кадмием и цинком, свинцом и цинком, влияющих на костный обмен, и синергизм между медью и железом, никелем, цинком и кобальтом.

Дисбаланс жизненно необходимых элементов, установленный в твердых тканях молочных зубов детей 1-й группы, проживающих на территориях с высоким уровнем антропогенного загрязнения, характеризовался снижением содержания цинка, никеля, кобальта, меди, железа и повышенным содержанием марганца, хрома и лития. Снижение содержания цинка в

твердых тканях зубов, вероятно, с одной стороны, обусловлено значительным его использованием в процессах регенерации костной ткани, а с другой стороны, вступлением в антагонизм со свинцом и кадмием в связи с накоплением последних в твердых тканях зубов. На этом фоне происходит нарушение регуляции железа, меди и кобальта. Снижение содержания железа обусловлено, вероятно, его активным участием в окислительных процессах посредством десятков железосодержащих ферментов, а насыщение клеток и тканей происходит с помощью белка трансферрина, который способен переносить ионы трехвалентного железа [15]. Медь, имеющая большое значение для поддержания нормальной структуры костей, эластичности стенок кровеносных сосудов, вероятно, у детей 1-й группы востребована в большем количестве, как и кобальт, который активно участвует в ферментативных процессах и образовании гормонов щитовидной железы, угнетает обмен йода и тем самым увеличивает риск развития кариеса зубов. Поэтому значительный интерес представляют данные сравнительного анализа содержания элементов в кариозных и здоровых зубах у детей, подвергающихся антропогенному воздействию. Доказано, что в кариозных зубах в значительно больших количествах, чем в здоровых, накапливаются токсичные элементы свинец, кадмий, висмут, стронций и снижается содержание эссенциальных микроэлементов за счет изоморфного замещения частиц одного элемента в узлах кристаллической решетки частицами другого элемента⁵. Элементный баланс у детей, проживающих на территориях антропогенного загрязнения, зависит от количественных и качественных характеристик загрязнителей и особенностей изоморфного замещения элементов в организме. При этом в биосредах может быть минеральное увеличение или уменьшение микроэлементов или норма за счет возможности замещения одного элемента другим².

Таким образом, полученные данные об особенностях элементного баланса у детей в условиях экспозиции химических факторов

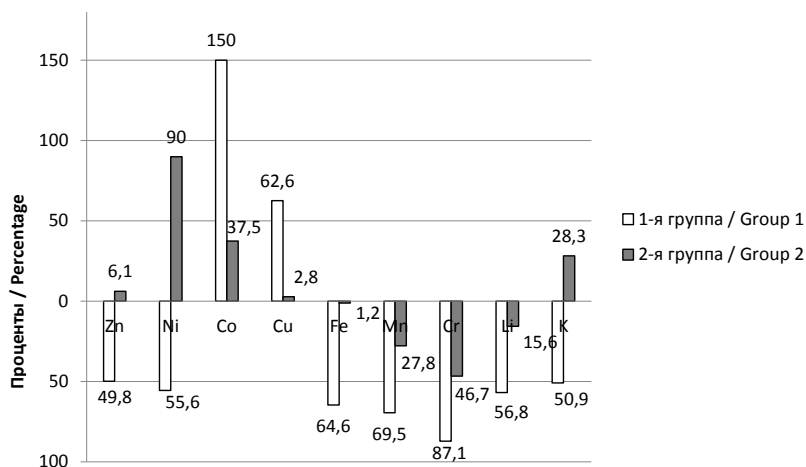


Рис. 2. Процентное отклонение в содержании эссенциальных микроэлементов в кариозных зубах относительно здоровых зубов у детей исследуемых групп
Fig. 2. The percent deviation in the content of essential trace elements in carious teeth relative to healthy teeth in children of both groups

⁵ Токсикологическая химия. Метаболизм и анализ токсикантов. Под ред. проф. Н.И. Калетиной. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2008. 236 с.

среды обитания могут являться маркерами развития экологически детерминированной стоматологической заболеваемости.

Выводы:

1. У детей, подвергающихся высокому уровню воздействия химических загрязнителей, твердые ткани зубов являются депонирующей средой для свинца, кадмия, висмута и стронция.

2. У детей с экологически детерминированной стоматологической заболеваемостью установлены особенности развития дисбаланса биотических концентраций эссенциальных и накопление токсичных микроэлементов.

Информация о вкладе авторов: Сетко Н.П. — разрабатывает дизайн исследования, обзор публикаций по теме статьи; Мустафин И.Т. — сбор и обработка материала, написание текста статьи.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

(пп. 1, 6–8, 10, 12, 14–16 см. References)

- Нефёдова Е.С. Изучение микроэлементного состава зубов детского населения г. Оренбурга // Молодые ученые — гигиене детей и подростков: Материалы IV научно-практической конференции. М., 2013. С. 64–66.
- Матчин А.А., Сетко Н.П., Нефёдова Е.С. Стоматологическое здоровье и биоаккумуляция микроэлементов в волосах и зубах детей // Вестник Оренбургского государственного университета. 2013. № 12 (161). С. 144–149.
- Фрумин Г.Т. Загрязнение атмосферного воздуха в крупных городах России и риск здоровью // Экологическая химия. 2002. Т. 11. № 2. С. 73–77.
- Корогод Н.П., Моталова А.С. Определение уровня содержания тяжелых металлов в волосах детей промышленного города на примере города Экибастуза // Экологические проблемы региона и пути их решения: Материалы национальной научно-практической конференции с международным участием, проводимой в рамках Сибирского экологического форума «Эко-BOOM» (13–15 октября 2016 г.). Омск: ЛИТЕРА, 2016. С. 150–155.
- Барашков Г.К., Зайцева Л.И. Использование законов межэлементных взаимодействий для понимания механизмов некоторых заболеваний человека // Биомедицинская химия. 2008. Т. 54. № 3. С. 266–277.
- Захарова И.Н., Творогова Т.М., Воробьева А.С. и др. Микроэлементоз как фактор формирования остеопении у подростков // Педиатрия им. Г.Н. Сперанского. 2012. Т. 91. № 1. С. 66–75.
- Луговая Е.А., Степанова Е.М. Структура элементного дисбаланса в организме жителей г. Магадана // Здоровье населения и среда обитания. 2015. № 2 (263). С. 4–6.
- Orenburg. In: *Young scientists — to hygiene of children and adolescents: Proceedings of the Fourth Scientific and Practical Conference*. Moscow, 2013. Pp. 64–66. (In Russian).
- Matchin AA, Setko NP, Nefedova ES. Dental health of children in areas of various anthropogenic pollution. *Vestnik Orenburgskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2013; (12(161)):144–149. (In Russian).
- Frumin GT. [Ambient air pollution in large cities of Russia and health risk.] *Ekologicheskaya Khimiya*. 2002; 11(2):73–77. (In Russian).
- Korogod NP, Motalova AS. Determination of the content of heavy metals in hair of children industrial city on an example of cities Ekibastuz. In: *Environmental problems of the region and ways to solve them: Proceedings of the national scientific and practical conference with international participation held within the framework of the Siberian Eco-BOOM Environmental Forum, October 13–15, 2016*. Omsk: LITERA Publ., 2016. Pp. 150–155. (In Russian).
- Kręzel A, Maret W. The functions of metamorphic metallothioneins in zinc and copper metabolism. *Int J Mol Sci*. 2017; 18(6):E1237. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms18061237>
- Zhang S, Niu Q, Gao H, et al. Excessive apoptosis and defective autophagy contribute to developmental testicular toxicity induced by fluoride. *Environ Pollut*. 2016; 212:97–104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.01.059>
- Zogzas CE, Mukhopadhyay S. Inherited disorders of manganese metabolism. In: Aschner M, Costa L, editors. *Neurotoxicity of metals. Advances in Neurobiology*. Springer, Cham, 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-60189-2_3
- Barashkov GK, Zajceva LI. Using the laws of inter-element interactions to understand the mechanisms of some human diseases. *Biomeditsinskaya Khimiya*. 2008; 54(3):266–277. (In Russian).
- Vilahrur N, Vahter M, Broberg K. The epigenetic effects of prenatal cadmium exposure. *Curr Environ Health Rpt*. 2015; 2:195–203. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40572-015-0049-9>
- Zakharova IN, Tvorogova TM, Vorobyova AS, et al. [Trace element homeostasis as a factor in the formation of osteopenia in adolescents.] *Pediatrriya*. 2012; 91(1):66–75. (In Russian).
- Romagnoli C, Zonfrati R, Galli G, et al. The effect of strontium chloride on human periodontal ligament stem cells. *Clin Cases Miner Bone Metab*. 2017; 14(3):283–293. DOI: <https://doi.org/10.11138/ccmbm/2017.14.3.283>
- Lugovaya EA, Stepanova EM. Structure of elemental disbalance observed in organism of residents of Magadan town. *Zdorov'e Naseleniya i Sreda Obitaniya*. 2015; (2(263)):4–6. (In Russian).
- Colvin RA, Lai B, Holmes WR, et al. Understanding metal homeostasis in primary cultured neurons. Studies using single neuron subcellular and quantitative metallomics. *Metallomics*. 2015; 7(7):1111–23. DOI: <https://doi.org/10.1039/c5mt00084j>
- Burk RF, Hill KE, Motley AK. Selenoprotein metabolism and function: evidence for more than one function for selenoprotein P. *J Nutr*. 2003; 133(5(Suppl 1)):1517S–20S. DOI: <https://doi.org/10.1093/jn/133.5.1517S>
- Fleming RE, Sly WS. Mechanisms of iron accumulation in hereditary hemochromatosis. *Annu Rev Physiol*. 2002; 64:663–80. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.physiol.64.081501.155838>

References

- Vo TT, Wu CZ, Lee IT. Potential effects of noxious chemical-containing fine particulate matter on oral health through reactive oxygen species-mediated oxidative stress: Promising clues. *Biochem Pharmacol*. 2020; 182:114286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2020.114286>
- Nefedova ES. The study of the microelement composition of teeth in the child population of the city of