

НЕИНВАЗИВНЫЙ СПОСОБ ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И РИСКОВ ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ ЛЮДЕЙ ПО СОДЕРЖАНИЮ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОЛОСАХ

Т.Г. Крупнова¹, О.В. Ракова^{1*}, С.В. Гаврилкина²

¹Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

²Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Миасс, Россия

Эл. почта: rakovaov@susu.ru

Статья поступила в редакцию 01.09.2025; принята к печати 26.10.2025

Исследование посвящено проблемам здоровья населения, проживающего на антропогенно нарушенных территориях, загрязненных тяжелыми металлами (ТМ). Целью работы является выявление особенностей накопления ТМ (кадмия, меди, железа, марганца, свинца и цинка) в волосах населения Челябинской городской промышленной агломерации и изучение возможности использования волос для оценки загрязнения окружающей среды. Средние концентрации железа и меди в волосах превышали референсные значения. Выявлена значимая корреляция между содержанием ТМ в волосах и в пыли, собранной в помещениях, где проживали добровольцы, а также в картофеле, который употребляли в пищу участники исследования. Это обусловлено тем, что ТМ практически не изменяются в окружающей среде и могут мигрировать от источника загрязнения до организма человека через пыль и продукты питания.

Ключевые слова: тяжелые металлы, риски для здоровья, неинвазивные методы, кардиометаболический синдром

A NON-INVASIVE APPROACH TO ASSESSING ENVIRONMENTAL POLLUTION AND HUMAN HEALTH RISKS BASED ON THE CONTENT OF HEAVY METALS IN HAIR

T.G. Krupnova¹, O.V. Rakova^{1*}, S.V. Gavrilkina²

¹South-Urals State University, Chelyabinsk, Russia; ²South-Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoeology, Urals Branch of the Russian Academy of Sciences, Miass, Russia

E-mail: rakovaov@susu.ru

The present study addresses the health problems of people living in anthropogenically disturbed areas contaminated with heavy metals (HM). The aim of the work is to identify the characteristics of accumulation of HM (cadmium, copper, iron, manganese, lead and zinc) in the hair of people living in the Chelyabinsk urban industrial agglomeration and to assess the possibility of using hair for assessing environmental pollution. Average iron and copper concentrations in hair were above reference values. A significant correlation was found between HM content in hair and in dust collected in rooms where volunteers lived, as well as in potatoes consumed by the participants. This may be due to the fact that TMs are virtually unchanged in the environment and can migrate from pollution sources to humans through dust and food.

Keywords: heavy metals, health risks, noninvasive methods, cardiometabolic syndrome

Введение

Наиболее опасными загрязнителями современных городов являются тяжелые металлы (ТМ), которые считаются потенциально токсичными элементами [7]. Загрязнение окружающей среды ими увеличивает риски болезни Альцгеймера [7], сердечно-сосудистых заболеваний [13, 27, 46, 49], преддиабета, диабета и атеросклероза [19, 43, 44, 51], ведет к увеличению числа случаев аллергии у детей [25]. Описаны случаи окислительного стресса, вызванного ТМ в окружаю-

щей среде [28]. Существуют природные и антропогенные источники ТМ в городской среде [15, 20, 42, 53].

Особенно остро проблема загрязнения окружающей среды ТМ стоит в крупных промышленных городах Российской Федерации, к числу которых относится Челябинск. Согласно комплексному докладу о состоянии окружающей среды (<http://www.mineco174.ru>), превышение гигиенических нормативов в почвах Челябинской области характерно по свинцу, кадмию, никелю, мышьяку, марганцу, меди, хрому трехвалент-

ному и цинку. Инструментальные методы мониторинга состояния городской среды не могут дать полную информацию о воздействии ТМ на экосистемы и здоровье человека. Методы биоиндикации позволяют обнаружить и определить экологически значимые природные и антропогенные нагрузки на основе реакций на них живых организмов непосредственно в среде их обитания и широко используются в мониторинге загрязнения окружающей среды ТМ [10–12, 14, 29, 33, 35, 36, 40, 41].

В настоящее время такие человеческие биосубстраты, как волосы, ногти, а также кровь, моча, слюна, рассматриваются в литературе как биомаркеры [6, 38, 39, 47, 50]. Показано, что содержание ТМ в них коррелирует с загрязнением питьевой воды [38, 47, 50], а также с содержанием потенциально токсичных элементов в пыли [8, 17, 21, 39, 45] и продуктах питания [17, 34]. Кроме того, доказано, что на содержание некоторых ТМ в биосубстратах влияет курение [18, 23, 26, 30], возраст [18], расовые и другие особенности человека [5]. Считается, что кратковременные и значительные по степени отклонения ТМ отражаются в их концентрациях в жидких средах организма, тогда как твердые ткани (волосы, ногти, кости) представляют элементный статус, формирующийся в течение длительного времени (месяцы, годы) [9]. Взаимосвязи между содержанием ТМ в биосубстратах и определенными заболеваниями не вызывают сомнений [31, 32, 37].

Реализуемая в системе социально-гигиенического мониторинга программа оценки влияния загрязнения среды обитания на здоровье населения может включать в себя анализ загрязнения почвы, пыли, волос и продуктов питания. В целом аналитические измерения содержания ТМ в указанных объектах позволяют получить объективную информацию о состоянии окружающей среды, однако анализ и оценка их содержания в биологических средах организма человека существенно дополняет информацию о риске для здоровья. При этом биологический мониторинг может быть и дополнительным инструментом оценки риска для здоровья населения, и рассматриваться в качестве самостоятельной региональной программы социально-гигиенического мониторинга.

Цели данной работы включают изучение загрязнения окружающей среды ТМ с использованием волос как неинвазивного биомаркера, а также изучение связи между содержанием ТМ в волосах и риском кардиозаболеваний. Исследования были проведены на территории Челябинской городской промышленной агломерации. Челябинск был выбран как типичный российский промышленный город, на территории которого расположено большое число крупнейших металлургических предприятий. Подобные исследования на территории Южного Урала были проведены впервые.

Материалы и методы

В исследовании приняли участие 300 человек (мужчины $n_{\text{м}} = 121$; женщины $n_{\text{ж}} = 179$) в возрасте от 18 до 72 лет, проживающие в городе Челябинск, Россия.

Программа исследования была одобрена Этическим комитетом ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения РФ. Все участники исследования заполнили информированное письменное согласие на участие в исследовании в соответствии с кодексом этики Всемирной медицинской ассоциации (Хельсинкской декларации) на проведение экспериментов с участием человека и публикацию полученных результатов. Права участников на неприкосновенность частной жизни имели первостепенное значение [48].

Личная информация, касающаяся участников, состояния их здоровья и организации питания собрана с использованием опросника. В опытную группу не брали людей с особенностями питания (вегетарианцы и лица, принимающие биодобавки или не употребляющие картофель). Наличие риска кардиометаболического синдрома (КМС), известного также как метаболический синдром, оценивалось согласно рекомендациям Ивановой и соавт. [22]. Учитывались следующие диагностические критерии: индекс массы тела (ИМТ, $\text{кг}/\text{м}^2$) > 30 ; артериальное давление (АД, мм рт. ст.): диастолическое ≥ 85 , систолическое ≥ 130 ; глюкоза натощак (Γ , $\text{ммоль}/\text{л}$) $\geq 5,6$; холестерин (X , $\text{ммоль}/\text{л}$) $\geq 5,2$. Достоверным КМС считался при наличии не менее чем трёх критериев.

Для анализа содержания ТМ у участника брали прядь волос у корней с затылка и помещали в пластиковые пакеты, которые маркировали тем же номером, что и опросники. Окрашенные и седые волосы не исключались из выборки исследования, но ставилась соответствующая пометка. Перед тем как начать растворение пробы, обрабатывали волосы ацетоном и промывали дистиллированной водой, высушивали до воздушно-сухого состояния.

Образцы бытовой пыли собирали в местах проживания участников с фильтров пылесосов, просеивали через сито диаметром 63 мкм, помещали в маркированные чистые полиэтиленовые пакеты.

В качестве основного продукта питания был выбран картофель. Часто в предыдущих исследованиях в качестве потенциального источника ТМ выбирали морскую рыбу, однако проведенное нами предварительное анкетирование показало, что жители Челябинска употребляют рыбу реже двух раз в неделю, некоторые вообще не употребляют. Поэтому был выбран картофель, так как большинство участников предварительного анкетирования указали его как наиболее часто употребляемый продукт. Для анализа мы использовали либо картофель, выращенный на собственных садовых участках, либо, если испытуемые покупали

картофель, мы просили купить его в тех торговых точках и те сорта, которые предпочитали добровольцы. Неповрежденные клубни были тщательно промыты в пресной воде, очищены и нарезаны на дольки. Для сушки образцов использовали вакуумную сублимационную установку.

Навески волос, бытовой пыли и пищевого продукта отбирали в мерные чашечки Berghof, сделанные из фторопласта TFM, затем помещали чашечки в автоклавы и растворяли пробы в концентрированной азотной кислоте с помощью микроволновой системы пробоподготовки SPEEDWAVE FOUR (Berghof Products + Instruments GmbH, Германия) с использованием следующего режима: 5 мин повышение температуры до 200°C, 5 мин выдерживание при 200°C, затем охлаждение до 45°C. Полученные растворы переносили в полипропиленовые пробирки и промывали тефлоновые чашки и крышки трижды деионизированной водой с перенесением смыва в соответствующие пробирки. Далее растворы доводили до объема 15 мл деионизированной водой и тщательно перемешивали путем встряхивания в закрытых пробирках [3]. Концентрацию ТМ в пробах определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS, Agilent 7700x, Agilent Technologies Inc., США) в Центре коллективного пользования Южно-Уральского научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН (г. Миасс) в аккредитованной лаборатории. Градуировку масс-спектрометра проводили с использованием моноэлементных растворов ICP Standards Inorganic Ventures (США). Качество определения контролировали с помощью референсных образцов ГСО 9288-2009 (ФГУП «УНИИМ»), ГСО 10413-2014 (ФГБНУ

«ВНИИ агрохимии»), ГСО 8923-2007 (ФГБНУ Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН), ГСО 9570-2010 (Китайский национальный аналитический центр чугуна и стали, Пекин, Китай).

Статистическую обработку полученных результатов проводили с помощью программы IBM SPSS Statistics 27.0.

Результаты и обсуждение

Статистические параметры распределения содержания элементов в волосах человека на территории Челябинска и референсные значения (по Скальному с соавт. [4]) представлены в таблице 1.

Референсные данные по содержанию ТМ в волосах человека, полученные различными авторами и организациями, сильно различаются и зависят от региона проживания. В нашем исследовании мы опирались на данные коллектива А.В. Скального [4]. Полученные нами средние значения содержания свинца, марганца и кадмия в волосах участников человека оказались в пределах интервалов, задаваемых этими референсными данными (табл. 1). Более низкое содержание найдено для цинка (97% участников имели значения ниже предела, всего лишь у 3% выявлено превышение референсного значения). В организме человека нет «депо» цинка, поэтому он должен постоянно поступать из пищи. Следовательно, дефицит цинка чаще всего связан с недостатком питания. Цинк необходим для физического развития, что подтверждается в исследованиях, где у младенцев с дефицитом данного микроэлемента рост был замедлен [50].

Средние уровни железа и меди в волосах превышают референсные значения, особенно в случае железа

Табл. 1

Статистические параметры содержания ТМ (мг/кг) в волосах (n=300)

ТМ	Диапазон значений	Среднее	Референсный диапазон (РД) [4]	Доля проб за нижним пределом РД, %	Доля проб за верхним предел РД, %	Доля проб в пределах РД, %
Fe	4–92	33±16	11–25	4	54	42
Mn	0,10–1,25	0,44±0,31	0,31–1,29	49	0	51
Zn	2–272	28±22	145–206	97	3	0
Cu	1–56	15±8	9–14	8	38	54
Cd	0,01–0,11	0,05±0,03	0,02–0,13	15	0	85
Pb	0,02–1,58	0,50±0,32	0,38–1,67	37	0	63

Табл. 2

Коэффициенты корреляций Спирмена между содержанием ТМ в волосах, риском КМС, содержанием ТМ в пыли помещений и в картофеле (n=300)

Фактор	Содержание ТМ в волосах					
	Fe	Mn	Zn	Cu	Cd	Pb
Риск КМС	0,087	0,099	0,424***	0,352***	0,139*	0,387***
Пыль	0,148*	0,378***	0,397***	0,346***	0,221***	0,243**
Картофель	0,109	0,324***	0,277***	0,114*	0,317***	0,499***

*p<0,05; **p<0,01; ***p<0,001

– у 54% участников, у остальных 46% его уровень был в пределах нормы или чуть ниже (табл. 1). Следует иметь в виду, что железо может попадать в волосы не только из внутренних источников, но и извне, например, с водой с высоким содержанием железа. Кроме того, на концентрацию всех микроэлементов в волосах, в том числе и железа, оказывает влияние применение красок, шампуней и других косметических средств. Концентрация железа в волосах не зависит от возраста и пола [50].

Таким образом, люди, проживающие в Челябинске в значительной степени подвержены воздействию таких элементов, как железо и медь.

Для выявления связи между концентрацией ТМ в волосах участников и кардиометаболическим синдромом, а также содержанием ТМ в окружающей среде (бытовой пыли) и продуктах питания (картофель) был проведен корреляционный анализ. Результаты представлены в таблице 2.

Анализ результатов исследования показал статистически значимую связь между риском возникновением КМС и содержанием меди, цинка, кадмия и свинца в волосах человека. В наибольшей степени на риски возникновения группы связанных с КМС состояний, включающих болезни сердца, инсульт и диабет, влияет содержание в волосах цинка, меди и свинца. Токсичность свинца хорошо известна [1]. Установлена его связь с сердечно-сосудистыми заболеваниями (например, гипертонией, атеросклерозом) [43]. То, что она является важным фактором развития КМС, указывает на необходимость мониторинга свинца в городской среде и вызывает настороженность. Микроэлементы медь и цинк необходимы для многих функций организма [52]. Однако в избытке они токсичны [2]. Антропогенное загрязнение в городах в городах может привести к опасному нарушению баланса цинка и меди в организме. Дисбаланс в соотношении Zn/Cu приводит к сердечно-сосудистому риску [24].

Уровни все металлов в волосах значимо коррелируют с их содержанием в пыли. Это говорит о высокой биодоступности металлов, содержащихся в пыли помещений города Челябинска и о ее опасности. Также для всех металлов, кроме железа, обнаружена значимая корреляция между содержанием в волосах и картофеле, т.е. есть прямая связь между содержанием ТМ в

волосах и в продуктах питания. Полученные данные свидетельствуют о том, что на кардиометаболическое здоровье городского населения негативно влияет хроническое, кумулятивное воздействие ТМ, поступающих из непосредственного окружения людей (воздух/пыль и продукты питания). Интересно, что железо в этом смысле является исключением, возможно потому, что уровень железа в организме регулируется более жестко (например, путем контроля всасывания в кишечнике) по сравнению с другими металлами [16]. Поэтому потребление железа с пищей оказывает меньшее прямое влияние на состояние волос. В целом прослеживается путь от загрязнения окружающей среды (пыль и почва как потенциальный источник металлов в картофеле) до воздействия на организм человека (при вдыхании и употреблении с пищей), что приводит к негативным последствиям для здоровья. Исследование показало возможность использовать анализ ТМ в волосах в качестве инструмента мониторинга загрязнения окружающей среды и оценки рисков для общественного здоровья.

Заключение

Показано, что анализ волос человека является практичным способом оценки воздействия тяжёлых металлов на здоровье людей, проживающих на антропогенно нарушенных территориях, каковым является крупный промышленный центр. В волосах людей, проживающих в городе Челябинске, были обнаружены повышенные концентрации ТМ, таких как медь и железо, превышающие установленные референсные значения. Корреляционный анализ выявил статистически значимые связи между риском возникновением КМС и содержанием некоторых ТМ в волосах, а также между содержанием ТМ в пыли и картофеле и в волосах участников. Это можно объяснить тем, что токсичные металлы сохраняются в окружающей среде и могут мигрировать от источника в организм человека. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности изучения уровней ТМ в других биосубстратах, например в ногтях.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00030, <https://rscf.ru/project/25-27-00030>

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Григорьева АА, Миронова ГЕ. Токсическое воздействие свинца на организм человека (обзор литературы). Гигиена и санитария. 2025;104(6):778-80.
2. Копач АЕ, Федорив ОЕ, Мельник НА. Эффекты влияния меди и цинка на живые организмы (обзор литературы). Гигиена и санитария. 2021;100(2):172-7.

3. Рафикова ЮС, Семенова ИН, Хасанова РФ, Суяндукров ЯТ. Уровни содержания кадмия и свинца в волосах населения зауральской зоны Республики Башкортостан. *Экология человека*. 2020;1:17-24.
4. Скальный АВ. Референсные значения концентрации химических элементов в волосах, полученные методом ИСПАЭС (АНО Центр биотической медицины). *Микроэлементы в медицине*. 2003;4(1):55-6.
5. Скальный АВ, Скальная МГ, Лакарова ЕВ, Ломакин ЮВ, Шарипов МВ. Методы исследования элементного состава организма: теоретические и прикладные аспекты. *Микроэлементы в медицине*. 2012;13(3):14-8.
6. Шилов ВВ, Маркова ОЛ, Кузнецов АВ. Биомониторинг воздействия вредных химических веществ на основе современных биомаркеров. Обзор литературы. *Гигиена и санитария*. 2019;98(6):591-6.
8. Ali MU, Liu G, Yousaf B, Ullah H, Abbas Q, Munir MAM, Irshad S. Biomonitoring and health risks assessment of trace elements in various age- and gender-groups exposed to road dust in habitable urban-industrial areas of Hefei, China. *Environ Poll*. 2019;244:809-17.
9. Alissa EM, Ferns GA. Heavy metal poisoning and cardiovascular disease. *J Toxicol*. 2011;870125. doi: 10.1155/2011/870125.
10. Amini H, Hoodaji M, Najafi P. Evaluation of some tree species for heavy metal biomonitoring and pollution tolerance index in Isfahan urban zone. *Afr J Biotechnol*. 2011;10(84):19547-50.
11. Aničić Urošević M, Vuković G, Vasić P, Jakšić T, Nikolić D, Krivanj S, Popović A. Environmental implication indices from elemental characterisations of collocated topsoil and moss samples. *Ecol Indic*. 2018;90:529-39.
12. Bargagli R, Monaci F, Borghini F, Bravi F, Agnorelli C. Mosses and lichens as biomonitors of trace metals. A comparison study on *Hypnum cupressiforme* and *Parmelia caperata* in a former mining district in Italy. *Environ Poll*. 2022;116(2):279-87.
13. Bell DSH. Riceabetes: Is the association of type 2 diabetes with rice intake due to a high carbohydrate intake or due to exposure to excess inorganic arsenic? *J Postgrad Med*. 2015;127(8):781-2.
14. Bolshunova T, Rikhvanov L, Mezhibor A, Zhorniyak L, Baranovskaya N, Eremina E. Biogeochemical characteristics of epiphytic lichen *lobaria pulmonaria* of the Barguzin nature reserve (The republic of Buryatia, Russia). *J Environ Eng Landsc Manag*. 2018;26(2):120-7.
15. Chen X, Xia X, Zhao Y, Zhang P. Heavy metal concentrations in roadside soils and correlation with urban traffic in Beijing, China. *J Hazard Mater*. 2010;181(1-3):640-6.
16. Ems T, St Lucia K, Huecker MR. *Biochemistry of Iron Absorption*. StatPearls Publishing; 2022.
17. Eqani SAMAS, Tanveer ZI, Qiaoqiao C, Cincinelli A, Saqib Z, Mulla SI, Ali N, Katsoyiannis IA, Shafqat MN, Shen H. Occurrence of selected elements (Ti, Sr, Ba, V, Ga, Sn, Tl, and Sb) in deposited dust and human hair samples: implications for human health in Pakistan. *Environ Sci Poll Res*. 2018;25(13):12234-45.
18. Franceschini N, Fry RC, Balakrishnan P, Navas-Acien A, Oliver-Williams C, Howard AG, Cole SA, Haack K, Lange EM, Howard BV, Best LG, Francesconi KA, Goessler W, Umans JG, Tellez-Plaza M. Cadmium body burden and increased blood pressure in middle-aged American Indians: the Strong Heart Study. *J Hum Hypertens*. 2017;31(3):225-30.
19. Grau-Perez M, Zhao J, Pierce B, Francesconi KA, Goessler W, Zhu Y, An Q, Umans J, Best L, Cole

Общий список литературы / Reference List

1. Grigorieva AA, Mironova GE. [Toxic effects of lead on the human body (literature review)]. *Hygiene and Sanitation*. 2025;104(6):778–780. (In Russ).
2. Kopach AYe, Fedoriv OYe, Melnyk NA. [Effects of the influence of copper and zinc on living organisms (literature review)]. *Gigiyena i Sanitariya*. 2021;100(2):172-7. (In Russ).
3. Rafikova YuS., Semenova IN, Khasanova RF, Suyundukov YaT. [Cadmium and lead concentrations in human hair in the Trans-Urals Region of Bashkortostan Republic]. *Ekologiya Cheloveka*. 2020;1:17-24. (In Russ).
4. Skalny AV. [Reference values of the concentrations of chemical elements in hair obtained by the ICP-AES method (ANO Center for Biotic Medicine)]. *Mikroelementy v Meditsyne*. 2003;4(1):55-6. (In Russ).
5. Skalny AV, Skalnaya MG, Lakarova YeV, Lomakin YuV, Sharipov MV. [Methods of studying the elemental composition of an organism: theoretical and applied aspects]. *Mikroelementy v Meditsyne*. 2012;13(3):14-8. (In Russ).
6. Shilov VV, Markova OL, Kuznetsov AV. [Biomonitoring of the influence of harmful chemicals using modern biomarkers. Literature review]. *Gigiyena i Sanitariya*. 2019;98(6):591-6. (In Russ).
7. Ali MU, Liu G, Yousaf B, Ullah H, Abbas Q, Munir MA. A systematic review on global pollution status of particulate matter-associated potential toxic elements and health perspectives in urban environment. *Environ Geochem Health*. 2019;41:1131-62.

- SA, Navas-Acien A, Tellez-Plaza M. Urinary metals and leukocyte telomere length in American Indian communities: The Strong Heart and the Strong Heart Family Study. *Environ Pollut.* 2019;246:311-8.
20. Hou S, Zheng N, Tang L, Ji X, Li Y, Hua X. Pollution characteristics, sources, and health risk assessment of human exposure to Cu, Zn, Cd and Pb pollution in urban street dust across China between 2009 and 2018. *Environ Int.* 2019;128:430-7.
 21. Huang L, Liu L, Zhang T, Zhao D, Li H, Sun H, Kinney PL, Pitiranggon M, Chillrud S, Ma LQ, Navas-Acien A, Bi J, Yan B. An interventional study of rice for reducing cadmium exposure in a Chinese industrial town. *Environ Int.* 2019;122:301-9.
 22. Ivanova ES, Shuvalova OP, Eltsova LS, Komov VT, Kornilova AI. Cardiometabolic risk factors and mercury content in hair of women from a territory distant from mercury-rich geochemical zones (Cherepovets city, Northwest Russia). *Environ Geochem Health.* 2021;43(11):4589-99.
 23. Kaplan B, Sussan T, Rule A, Moon K, Grau-Perez M, Olmedo P, Chen R, Carkoglu A, Levshin V, Wang L, Watson C, Blount B, Calafat AM, Jarrett J, Caldwell K, Wang Y, Breysse P, Strickland P, Cohen J, Biswal S, Navas-Acien A. Waterpipe tobacco smoke: Characterization of toxicants and exposure biomarkers in a cross-sectional study of waterpipe employees. *Environ Int.* 2019;127:495-502.
 24. Kerkadi A, Raïq H, Prince MS, Bader L, Soltani A, Agouni A. A cross-sectional analysis of zinc and copper levels and their relationship to cardiovascular disease risk markers in Qatar biobank participants. *Front Cardiovasc Med.* 2024;10:1305588. doi:10.3389/fcvm.2023.1305588.
 25. Lee J, Lee S, Bae G. A review of the association between air pollutant exposure and allergic diseases in children *Atmos. Pollut Res.* 2014;5:616-29.
 26. Lewington S, Clarke R, Qizilbash N, Peto R, Collins R. Age-specific relevance of usual blood pressure to vascular mortality: A meta-analysis of individual data for one million adults in 61 prospective studies. *Lancet.* 2002;360(9349):1903-13.
 27. Longnecker MP, Daniels JL Environmental contaminants as etiologic factors for diabetes. *Environ Health Perspect.* 2001;109(6):871-6.
 28. Ma M, Li S, Jin H, Zhang Y, Xu J, Chen D, Kuimin C, Yuan Z, Xiao C. Characteristics and oxidative stress on rats and traffic policemen of ambient fine particulate matter from Shenyang. *Sci Total Environ.* 2015;526:110-5.
 29. Mazur Z, Radziemska M, Fronczyk J, Jeznach J. Heavy metal accumulation in bioindicators of pollution in urban areas of northeastern Poland. *Fresenius Environ Bull.* 2015;24(1A):16-223.
 30. Memon ZM, Yilmaz E, Shah AM, Sahin U, Kazi TG, Devrajani BR, Soylak M. Trace elements in blood samples of smoker and nonsmoker active pulmonary tuberculosis patients from Jamshoro, Pakistan. *Environ Sci Poll Res.* 2017;24(34):26513-20.
 31. Mordukhovich I, Wright RO, Hu H, Amarasiwardena C, Baccarelli A, Litonjua A, Sparrow D, Vokonas P, Schwartz J. Associations of toenail arsenic, cadmium, mercury, manganese, and lead with blood pressure in the normative aging study. *Environ Health Perspect.* 2012;120(1):98-104.
 32. Olmedo P, Grau-Perez M, Fretts A, Tellez-Plaza M, Gil F, Yeh F, Umans JG, Francesconi KA, Goessler W, Franceschini N, Lee ET, Best LG, Cole SA, Howard BV, Navas-Acien A. Dietary determinants of cadmium exposure in the Strong Heart Family Study. *Food Chem Toxicol.* 2017;100:239-46.
 33. Pająk M, Halecki W, Gąsiorek M. Accumulative response of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and silver birch (*Betula pendula* Roth) to heavy metals enhanced by Pb-Zn ore mining and processing plants: Explicitly spatial considerations of ordinary kriging based on a GIS approach. *Chemosphere.* 2017;168:851-9.
 34. Pappas RS. Toxic elements in tobacco and in cigarette smoke: Inflammation and sensitization. *Metallomics.* 2011;3(11):1181-98.
 35. Pata IMC, Bălan CD, Pata SM, Macoveanu M. Passive biomonitoring of atmospheric pollution with heavy metals using native epigeic moss. *Environ Eng Manag J.* 2009;8(5):1281-6.
 36. Pata IMC, Pata SM, Macoveanu M. Biomonitoring of atmospheric pollution of Fe and Zn using native epigeic mosses. *Environ Eng Manag J.* 2010;9(9):1217-25.
 37. Peters JL, Perlstein TS, Perry MJ, McNeely E, Weuve J. Cadmium exposure in association with history of stroke and heart failure. *Environ Res.* 2010;110(2):199-206.
 38. Rehman U, Khan S, Muhammad S. Associations of potentially toxic elements (PTEs) in drinking water and human biomarkers: a case study from five districts of Pakistan. *Environ Sci Poll Res.* 2018;25(28):27912-23.
 39. Rodrigues JLG, Bandeira MJ, Araújo CFS, Dos Santos NR, Anjos ALS, Koin NL, Pereira LC, Oliveira SSP, Mergler D, Menezes-Filho JA. Manganese and lead levels in settled dust in elementary schools are correlated with biomarkers of exposure in school-aged children. *Environ Poll.* 2018;236:1004-13.
 40. Safari M, Ramavandi B, Sanati AM, Sorial GA, Hashemi S, Tahmasebi S. Potential of trees leaf/bark to control atmospheric metals in a gas and petrochemical zone. *J Environ Manag.* 2018;222:12-20.

41. Sawidis T, Breuste J, Mitrovic M, Pavlovic P, Tsigaridas K. Trees as bioindicator of heavy metal pollution in three European cities. *Environ Poll.* 2011;159(12):3560-70.
42. Shukla S, Mbingwa G, Khanna S, Dalal J, Sankhyan D, Malik A, Badhwar N. Environment and health hazards due to military metal pollution: A review. *Environ Nanotechnol Monit Manag.* 2023;20:100857. doi:10.1016/j.enmm.2023.100857.
43. Tellez-Plaza M, Guallar E, Navas-Acien A. Environmental metals and cardiovascular disease. *Brit Med J.* 2018;362:3435. doi:10.1136/bmj.k3435.
44. Tibuakuu M, Jones MR, Navas-Acien A, Zhao D, Guallar E, Gassett AJ, Sheppard L, Budoff MJ, Kaufman JD, Michos ED. Exposure to ambient air pollution and calcification of the mitral annulus and aortic valve: The multi-ethnic study of atherosclerosis (MESA). *Environ Health.* 2017;16(1):133. doi:10.1186/s12940-017-0346-x.
45. Ubaid Ali M, Liu G, Yousaf B, Ullah H, Irshad S, Ahmed R, Hussain M, Rashid A. Evaluation of floor-wise pollution status and deposition behavior of potentially toxic elements and nanoparticles in air conditioner dust during urbanistic development. *J Hazard Mater.* 2019;365:186-95.
46. Velmurugan G, Swaminathan K, Veerasekar G, Purnell JQ, Mohanraj S, Dhivakar M, Avula AK, Cherian M, Palaniswami NG, Alexander T, Pradeep T. Metals in urine in relation to the prevalence of pre-diabetes, diabetes and atherosclerosis in rural India. *Occup Environ Med.* 2018;75(9):661-7.
47. Welch B, Smit E, Cardenas A, Hystad P, Kile ML. Trends in urinary arsenic among the U.S. population by drinking water source: Results from the National Health and Nutritional Examinations Survey 2003–2014. *Environ Res.* 2018;162:8-17.
48. Williams JR. *Medical Ethics Manual*. 3rd ed. Ferney-Voltaire (France): World Medical Association; 2015.
49. Yang YW, Liou SH, Hsueh YM, Lyu WS, Liu CS, Liu HJ, Chung MC, Hung PH, Chung CJ. Risk of Alzheimer's disease with metal concentrations in whole blood and urine: A case-control study using propensity score matching. *Toxicol Appl Pharmacol.* 2018;356:8-14.
50. Zhang T, Ruan J, Zhang B, Lu S, Gao C, Huang L, Bai X, Xie L, Gui M, Qiu RL. Heavy metals in human urine, foods and drinking water from an e-waste dismantling area: Identification of exposure sources and metal-induced health risk. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2019;169:707-13.
51. Zhang Y, Xu C, Fu Z, Shu Y, Zhang J, Lu C, Mo X. Associations between total mercury and methyl mercury exposure and cardiovascular risk factors in US adolescents. *Environ Sci Pollut Res.* 2018;25(7):6265-72.
52. Zhang Z, Zhao S, Wu H, Qin W, Zhang T, Wang Y, Tang Y, Qi S, Cao Y, Gao X. Cross-sectional study: Relationship between serum trace elements and hypertension. *J Trace Elem Med Biol.* 2022;69:126893. doi:10.1016/j.jtemb.2021.126893.
53. Zhao LS, Hu GR, Yan Y, Yu RL, Cui JY, Wang XM, Yan Y. Source apportionment of heavy metals in urban road dust in a continental city of eastern China: Using Pb and Sr isotopes combined with multivariate statistical analysis. *Atmos Environ.* 2019;201:201-11.

