

Оценка рисков для здоровья населения, связанных с загрязнением воздуха в помещениях металлами и металлоидами в составе $PM_{2,5}$, на основе одномоментного исследования

Т.Г. Крупнова¹, О.В. Ракова¹, С.В. Гаврилкина²

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия;

² Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии Уральского отделения Российской академии наук, Миасс, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Мелкодисперсные взвешенные частицы с аэродинамическим диаметром менее 2,5 мкм ($PM_{2,5}$) являются одними из наиболее опасных для здоровья человека загрязнителей атмосферного воздуха. Оценка рисков для здоровья населения, обусловленных загрязнением воздуха в помещениях частицами $PM_{2,5}$, содержащими потенциально токсичные металлы и металлоиды, в России ранее не проводилась.

Цель исследования. Изучить содержание $PM_{2,5}$ в воздухе помещений, исследовать содержание металлов и металлоидов в составе $PM_{2,5}$ и оценить риски для здоровья, обусловленные их ингаляционным воздействием в Челябинске.

Методы. Отбор проб осуществляли в аудиториях ($n=3$) и лабораториях ($n=3$) университета, комнатах общежития ($n=4$), а также в квартирах ($n=14$) на территории Челябинска в течение сезонов низкого загрязнения воздуха $PM_{2,5}$ (с ноября по март) и высокого загрязнения (с апреля по октябрь) в 2024–2025 гг. Пробы $PM_{2,5}$ отбирали с помощью каскадных импакторов на поликарбонатные фильтры. Концентрацию $PM_{2,5}$ в воздухе определяли путём деления прироста массы фильтра на объём прокаченного через пробоотборник воздуха. Концентрацию металлов и металлоидов (Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, and Zn) определяли на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой. Полученные результаты использовали для расчёта канцерогенного и неканцерогенного рисков.

Результаты. Различия между группами помещений были статистически незначимы как для сезона низких загрязнений ($p=0,287$), так и высоких ($p=0,966$), тогда как концентрации во время низкого и высокого сезонов загрязнений отличались на статистически значимом уровне ($p < 0,001$). Концентрации $PM_{2,5}$ в сезон низких загрязнений были заключены в интервале 5–31 мкг/м³, медиана — 16 мкг/м³. В сезон высоких загрязнений концентрации $PM_{2,5}$ были в интервале 13–59 мкг/м³, медиана — 32 мкг/м³. Оценка неканцерогенного риска показала, что воздействие на органы дыхания ($HI_{ОД}$) было сильнее, чем на нервную систему ($HI_{НС}$). Уровень неканцерогенного риска для взрослых был минимальным или оставался на допустимом уровне, а неканцерогенный риск для детей в зависимости от варианта экспозиции изменялся от высокого ($HI_{ОД}=6,42$) истораживающего ($HI_{ОД}$ от 3,10 до 3,75 и $HI_{НС}$ от 3,17 до 5,19) до допустимого. Канцерогенные риски для взрослых и детей при различных вариантах экспозиции были на допустимом уровне (общий риск — от $5,71 \times 10^{-6}$ до $4,66 \times 10^{-5}$).

Заключение. Обнаруженные высокий истораживающий уровни неканцерогенного риска для здоровья детей требуют разработки специальных мероприятий.

Ключевые слова: здоровье; канцерогенный риск; неканцерогенный риск; $PM_{2,5}$; металлы и металлоиды.

TITLE

КАЦИТИРОВАТЬ:

Крупнова Т.Г., Ракова О.В., Гаврилкина С.В. Оценка рисков для здоровья населения, связанных с загрязнением воздуха в помещениях металлами и металлоидами в составе $PM_{2,5}$, на основе одномоментного исследования // Экология человека. 2025. Т. 32, № 11. С. XX–XX. DOI: 10.17816/humeco693896 EDN: HTRHNK

Рукопись поступила: 21.10.2025

Рукопись одобрена: 17.11.2025

Опубликована online: 24.11.2025

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

Assessment of Human Health Risks Associated With Indoor Air Pollution by $PM_{2.5}$ Containing Metals and Metalloids Based on Cross-Sectional Study

Tatyana G. Krupnova¹, Olga V. Rakova¹, Svetlana V. Gavrilkina²

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia;

² South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology of the Urals Branch of the Russian Academy of Sciences, Miass, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Fine suspended particles with an aerodynamic diameter of less than $2.5 \mu m$ ($PM_{2.5}$) are among the most hazardous air pollutants. Assessment of the human health risks associated with indoor air pollution by $PM_{2.5}$ containing potentially toxic metals and metalloids (MM) has not been carried out before in Russia.

AIM: To study the $PM_{2.5}$ content in indoor air, to investigate the MM content within $PM_{2.5}$, and to assess the health risks associated with inhalation exposure of MM-containing $PM_{2.5}$ in a city of Chelyabinsk.

METHODS: Sampling was carried out in university classrooms ($n=3$) and laboratories ($n=3$), dormitory rooms ($n=4$), and apartments ($n=14$) in Chelyabinsk urban area during the low $PM_{2.5}$ air pollution (November to March) and high pollution seasons (April to October) in 2024–2025. $PM_{2.5}$ samples were collected using cascade impactors on polycarbonate filters (Sartorius, Germany). The $PM_{2.5}$ concentration in the air was determined by dividing the increase in filter mass by the volume of air pumped through the sampler. The concentration of MM (Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, and Zn) was determined using an inductively coupled plasma mass spectrometer. The obtained results were used to calculate the carcinogenic and non-carcinogenic risks.

RESULTS: Differences between different indoor groups were not statistically significant for both low ($p=0.287$) and high ($p=0.966$) pollution seasons, while concentrations during low and high pollution seasons differed at a statistically significant level ($p<0.001$). $PM_{2.5}$ concentrations in the low pollution season were within the range of $5\text{--}31 \mu g/m^3$, median (Me)= $16 \mu g/m^3$. In the high pollution season, $PM_{2.5}$ concentrations were within the range of $13\text{--}59 \mu g/m^3$, Me= $32 \mu g/m^3$. The non-carcinogenic risk assessment showed that the impact on the respiratory system (HI_{OD}) was greater than that on the nervous system (HI_{NS}). The non-carcinogenic risk level for adults was minimal or remained at an acceptable level, while the non-carcinogenic risk for children, depending on the exposure scenario, ranged from high ($HI_{OD}=6.42$) and concern (HI_{OD} from 3.10 to 3.75 and HI_{NS} from 3.17 to 5.19) to acceptable. Carcinogenic risks for adults and children with different exposure options were at an acceptable level (TCR from 5.71×10^{-6} до 4.66×10^{-5}).

CONCLUSION: The high and alarming levels of non-carcinogenic risk to children's health require the development of special measures.

Keywords: health; carcinogenic risk; non-carcinogenic risk; $PM_{2.5}$; metals and metalloids.

TO CITE THIS ARTICLE:

Krupnova TG, Rakova OV, Gavrilkina SV. Assessment of Human Health Risks Associated With Indoor Air Pollution by $PM_{2.5}$ Containing Metals and Metalloids Based on Cross-Sectional Study. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2025;32(11):XX–XX. DOI: 10.17816/humeco693896 EDN: HTRHNK

Received: 21.10.2025

Accepted: 17.11.2025

Published online: 24.11.2025

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

© Eco-Vector, 2025

ОБОСНОВАНИЕ

Мелкодисперсные взвеси размером менее 10 и 2,5 мкм (PM_{10} и $PM_{2.5}$, от *англ.* particulate matter) являются одними из наиболее опасных загрязнителей воздуха [1, 2]. При этом частицы размером менее 2,5 мкм более опасны, так как легко преодолевают физиологические барьеры, могут достигать дистальных отделов лёгкого и оседать в бронхиолах и альвеолах, а при оседании в дыхательных путях $PM_{2.5}$ способны преодолевать клеточную мембрану, альвеолярную перегородку, проникать в системный кровоток и

головной мозг [3]. Примечательно, что до 2010 г. в Российской Федерации отсутствовал национальный стандарт по PM_{10} и $PM_{2,5}$ [2]. В 2010 г. были приняты нормативы для PM_{10} и $PM_{2,5}$, которые в настоящее время применяются в стране. В последнее время число исследований, посвящённых влиянию PM_{10} и $PM_{2,5}$ на заболеваемость, в мире резко возросло [4–6]. Американское онкологическое общество совместно с исследователями [7] собрало данные о выборке из 500 000 взрослых, проживающих в крупных городах. Их анализ показал, что общий уровень смертности, а также уровень смертности от сердечно-лёгочных заболеваний и рака лёгких увеличивался на 4, 6 и 8% соответственно на каждые 10 $мкг/м^3$ повышения уровня $PM_{2,5}$ с учётом курения, питания, употребления алкоголя, профессии и других факторов риска [7]. Кроме того, Американское онкологическое общество провело когортное исследование, в котором отслеживалось состояние здоровья 1,2 млн взрослых американцев в течение 26 лет (с 1982 по 2008 г.). Было показано, что уровень смертности от рака лёгких среди некурящего населения увеличивался на 15–27% при повышении концентрации $PM_{2,5}$ в воздухе на 10 $мкг/м^3$ [8]. Компоненты $PM_{2,5}$ отличаются для различных территорий и зависят от источников генерации, поэтому необходимо изучение воздействия загрязнения атмосферного воздуха, характерного для определённой местности. В крупных промышленных городах $PM_{2,5}$ содержат в своём составе различные металлы и металлоиды (ММ), которые относятся к потенциально токсичным элементам [9]. Загрязнение окружающей среды ММ увеличивает риск развития болезни Альцгеймера [10], сердечно-сосудистых заболеваний [11–13], преддиабета [14], диабета [14–16] и атеросклероза [14], а также приводит к росту случаев аллергии у детей [17].

Исследования загрязнения воздуха $PM_{2,5}$, содержащими в своём составе ММ, в Российской Федерации крайне лимитированы. Наша предыдущая работа [18] является первым и остаётся одним из немногих исследований на эту тему. Были изучены изменения содержания $PM_{2,5}$ и PM_{10} , а также ММ, ассоциированных с ними, в трёх точках на территории Челябинской городской агломерации в течение года и оценены риски для здоровья, связанные с загрязнением воздуха $PM_{2,5}$ и PM_{10} .

Хотя изучение загрязнения атмосферного воздуха крайне важно, но нужно учитывать, что в последние годы образ жизни людей изменился: всё больше людей остаются дома весь день либо проводят в помещениях значительную часть времени. По некоторым данным, городские жители до 90% своего времени находятся в помещениях [19]. Лишь небольшое количество исследований в мире посвящено изучению загрязнения воздуха $PM_{2,5}$ [20] и ассоциированных с ними ММ внутри помещений [21–23], а в России такие исследования пока не проводились. В настоящем исследовании для изучения был выбран российский промышленный город Челябинск. В предыдущих работах было показано, что вещества, содержащиеся в атмосферном воздухе, могут вызывать задержку развития организма, неблагоприятно влиять на дыхательную, пищеварительную, сердечно-сосудистую, центральную нервную системы, нарушать работу почек и печени [24].

Цель исследования. Анализ содержания $PM_{2,5}$ в воздухе помещений, ММ в составе $PM_{2,5}$ и оценка рисков для здоровья, обусловленных ингаляционным воздействием ММ-содержащих $PM_{2,5}$, в Челябинске.

МЕТОДЫ

ДИЗАЙН ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведено наблюдательное одноцентровое одномоментное исследование.

УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Челябинск — российский промышленный город. На его территории расположено несколько крупнейших предприятий чёрной и цветной металлургии — Челябинский металлургический комбинат, Челябинский цинковый завод, Челябинский электрометаллургический комбинат. В исследовании принимали участие добровольцы из числа студентов и сотрудников университета. При выполнении работы авторы неукоснительно следовали положениям Хельсинкской декларации (2013). Исследования проводили в лабораториях, аудиториях и общежитиях на территории университетского кампуса, а также отбор проб осуществляли в жилых комнатах в квартирах добровольцев, расположенных в различных локациях города. При этом аудитории и лаборатории выбирали те, в которых обычно проходили занятия у добровольцев, принимавших участие в исследовании.

Мы провели две кампании по отбору проб с ноября по март и с апреля по октябрь 2024–2025 гг., что соответствовало сезонам низкого и высокого уровня загрязнения $PM_{2,5}$ соответственно. Как показано в предыдущем исследовании [18], концентрация PM_{10} и $PM_{2,5}$ в Челябинске ниже зимой, поскольку все городские и промышленные тепловые электростанции работают на газе, угольных электростанций нет, а снегопады и снежный покров способствуют очищению воздуха. Летом концентрация PM_{10} и $PM_{2,5}$ увеличивается из-за засушливого периода, кроме того, лесные пожары на Урале и в Сибири увеличивают загрязнение воздуха.

В данном исследовании 72-часовые пробы $PM_{2,5}$ собирали на 25-миллиметровые поликарбонатные фильтры (Sartorius, Германия) с размером пор 0,4 мкм. Пробы отбирали с помощью малообъемных каскадных импакторных пробоотборников (ИКС-4, Екатеринбург, Россия), которые работали непрерывно с расходом $16 \text{ л} \cdot \text{мин}^{-1}$. Мы последовательно собирали частицы размером 2,5 мкм и менее в каждом исследуемом помещении. Пробоотборники располагали на столе в комнате, где проводилась основная деятельность добровольцев (обычно в гостиной). В каждой локации осуществляли отбор двух параллельных проб. Во время отбора проб мы просили не курить в помещениях, не зажигать благовония, так как предыдущие исследования [25–27] показали, что в этих случаях значительно увеличивается концентрация ММ в пыли помещений и риски, связанные с этим загрязнением. Перед отбором проб во всех помещениях была проведена влажная уборка, окна на проветривание открывали по два раза в сутки, продолжительность проветривания составляла 1 ч.

КРИТЕРИИ СООТВЕТСТВИЯ (ОТБОРА)

В эксперименте принимали участие добровольцы из числа студентов и преподавателей университета, в их квартирах и комнатах общежитий осуществляли отбор проб. В эксперимент не включали участников, имеющих домашних питомцев, курящих в помещении, проживающих в квартирах, оборудованных системой кондиционирования воздуха и газовыми плитами.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЦЕЛЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Элементный анализ

Одиннадцать элементов (Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, и Zn) были проанализированы с помощью масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС, Agilent 7700x, Agilent Technologies Inc., США) в лаборатории Южно-Уральского научно-исследовательского центра минералогии и геоэкологии УрО РАН (Миасс). Вскрытие проб фильтров осуществляли методом последовательного растворения по методике, описанной ранее [18]. В данном исследовании анализировали концентрации элементов (0,0; 0,1; 0,5; 1,0 и 5,0 ppm) по стандартам Inorganic Ventures для оценки калибровочной кривой. Контроль качества (QA/QC) осуществляли с помощью холостых проб, дублирующих образцов и сертифицированных стандартных образцов. Для контроля качества использовали следующие сертифицированные стандартные образцы: ГСО 10413-2014 СО дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы (ВНИИА Россельхозакадемии, Россия), ГСО 7186-95 лессовой почвы (Бронницкая геолого-геохимическая экспедиция Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов, Россия) и ГСО 3486-86 алюмосиликатных рыхлых отложений (Институт геохимии им. В.В. Виноградова СО РАН, Россия). Пределы обнаружения ММ и относительное отклонение (%) результатов измерений концентрации ММ от паспортного значения ГСО для каждого из указанных ММ представлены в табл. 1.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕДУРЫ

Запланированный размер выборки

Размер выборки предварительно не рассчитывали.

Исследования проводили на территории университетского кампуса, были выбраны три лаборатории ($n=3$), три аудитории ($n=3$), комнаты в общежитиях ($n=4$), а также отбор проб осуществляли в жилых комнатах в квартирах ($n=14$). Размер выборки был ограничен техническими возможностями пробоотбора, наличием в лаборатории двух переносных пробоотборников и длительностью пробоотбора.

Статистические методы

Статистические расчёты проведены с помощью лицензионной программы SPSS 23.0 (США). Проверку данных на нормальность распределения осуществляли по критерию Колмогорова–Смирнова с коррекцией значимости Лиллиефорса. Для описания данных использовали следующие центральные тенденции и меры рассеяния: количество образцов в группе (n), среднее арифметическое (M), медиану (Me), процентиля (25, 50, 75, 95-й). Сравнение двух независимых выборок проводили с помощью непараметрического U -критерия Манна–Уитни, более двух независимых выборок — с использованием непараметрического H -критерия Краскела–Уоллиса.

ОЦЕНКА РИСКОВ

Расчёты уровней риска здоровью населения выполняли для ингаляционного пути поступления частиц $PM_{2,5}$, содержащих ММ, в соответствии с Руководством по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания (Р 2.1.10.3968–23)¹. Расчёты проводили

¹ Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания. Р 2.1.10.3968–23 (утв. Руководителем Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации

для концентраций ММ в частицах $PM_{2,5}$ на уровне медианы (Me) и 95-го перцентиля в высокий и низкий сезоны загрязнений. Расчёт средней суточной дозы произведён в соответствии со стандартными значениями факторов экспозиции при ингаляционном пути поступления химических веществ. Ингаляционная экспозиция составила $15,1 \text{ м}^3/\text{день}$ для взрослых и $8,7 \text{ м}^3/\text{день}$ для детей, продолжительность воздействия для канцерогенного и неканцерогенного риска — 30 и 6 лет соответственно для взрослых и детей. Масса взрослого человека принята за 70 кг, масса ребёнка — 15 кг. Рекомендуемые значения референтных уровней воздействия для хронического ингаляционного воздействия (референтные дозы, $\text{мг}/\text{м}^3$), факторов канцерогенного потенциала ($\text{мг}/(\text{кг} \cdot \text{день})^{-1}$), значения факторов экспозиции при ингаляционном пути поступления химических веществ получены в соответствии с рекомендациями, изложенными в Р2.1.10.3968–23.

Риск развития неканцерогенных эффектов рассчитывали как индексы опасности развития нарушения функций критических органов и систем k (HI_k).

Неканцерогенный риск хронического ингаляционного действия оценивали как минимальный при коэффициенте опасности (HQ) $\leq 0,1$ и $HI_k \leq 1,0$; допустимый (приемлемый) — при HQ от 0,11 до 1,0 и HI_k от 1,1 до 3,0;стораживающий — при HQ от 1,1 до 3,0 и HI_k от 3,1 до 6,0; высокий — при $HQ > 3,0$ и $HI_k > 6,0$. При оценке канцерогенного риска считали, что допустимым (приемлемым) уровнем риска принимается индивидуальный канцерогенный риск в течение всей жизни: $1,1 \times 10^{-6} \dots 1,0 \times 10^{-4}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Были получены средние концентрации за трое суток $PM_{2,5}$ (которые в дальнейшем сравнивали с предельно допустимыми среднесуточными концентрациями) в различных типах помещений: лаборатории, аудитории, комнаты общежитий и квартир. Поскольку выборки концентраций химических веществ не соответствовали нормальному распределению по критерию Колмогорова–Смирнова, то для оценки статистической значимости различий в четырёх различных группах помещений использовали непараметрический H -критерия Краскела–Уоллиса для независимых выборок. Различия в выборках были статистически незначимы как для сезона низких загрязнений ($p=0,287$), так и высоких ($p=0,966$), что позволило объединить выборки в одну. В табл. 2 представлены результаты статистической обработки данных о концентрации $PM_{2,5}$ в различные сезоны загрязнения.

Диапазон колебаний концентрации $PM_{2,5}$ в сезон высокого уровня загрязнения с апреля по октябрь был заключён в более широких пределах ($13\text{--}59 \text{ мкг}/\text{м}^3$), чем в сезон низких загрязнений с ноября по март ($5\text{--}31 \text{ мкг}/\text{м}^3$). Среднее арифметическое, медиана, 25, 50, 75 и 95-й перцентили также оказались заметно выше с апреля по октябрь, чем с ноября по март.

Поскольку обе выборки не соответствовали нормальному распределению по критерию Колмогорова–Смирнова, для оценки статистической значимости различий в различные сезоны использовали непараметрический U -критерий Манна–Уитни для независимых выборок. Различия между группами данных для различных сезонов загрязнения воздуха оказались статистически значимы на достаточно высоком уровне ($p < 0,001$). Это согласуется с ранее полученными данными для уровня загрязнения воздуха вне помещений [18]. То есть в исследуемых помещениях загрязняющие $PM_{2,5}$ поступают преимущественно снаружи, тем более что при выборе критерия отбора были заранее исключены такие внутренние источники загрязнения, как курение, благовония, приготовление пищи на газовой плите, а также была проведена предварительная влажная уборка помещений. То есть была смоделирована ситуация, позволяющая минимизировать вклад в уровни концентраций $PM_{2,5}$ внутренних источников загрязнения.

Проанализированы концентрации одиннадцати ММ (Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, и Zn), ассоциированных с $PM_{2,5}$. Результаты статистического анализа концентраций ММ в сезоны низких и высоких уровней загрязнения представлены в табл. 3 и 4. Для всех ММ среднее арифметическое, медиана, 25, 50, 75 и 95-й перцентили были выше с апреля по октябрь, чем с ноября по март. Полученные данные использовали для расчёта рисков, результаты представлены в табл. 5 и 6. HQ , обусловленные ингаляционным поступлением $PM_{2,5}$, по средней центильной тенденции (Me) являлись минимальными для взрослого населения и допустимыми для детей для всех ММ. Исключения составляли HQ , обусловленные марганцем и железом. При расчёте по 95-му перцентилю HQ были выше. Уровень неканцерогенного риска при хроническом ингаляционном воздействии $PM_{2,5}$, поступающих из воздуха помещений, рассчитывался для групп ММ, характеризующихся воздействием на одинаковые критические органы и системы. Выбранные в исследовании ММ в основном влияют на органы дыхания и нервную систему. As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni и Zn оказывают влияние на органы дыхания, а Al, As, Fe, Mn и Pb — на нервную систему, поэтому были рассчитаны HQ нарушения функции органов дыхания ($HI_{\text{ОД}}$) и нервной системы ($HI_{\text{НС}}$). Уровень неканцерогенного риска для взрослых был минимальным или

оставался на допустимом уровне ($HI_{од}$ от 0,83 до 2,39 и $HI_{нс}$ от 0,71 до 1,92). А неканцерогенный риск для детей в зависимости от варианта экспозиции изменялся от высокого ($HI_{од}=6,42$) и настораживающего ($HI_{од}$ от 3,10 до 3,75 и $HI_{нс}$ от 3,17 до 5,19) до допустимого ($HI_{од}=2,23$ и $HI_{нс}$ от 1,91 до 2,55). При этом во всех случаях воздействие на органы дыхания было сильнее, чем на нервную систему. Общий канцерогенный риск для всех категорий населения для всех случаев экспозиции составлял $5,71 \times 10^{-6} \dots 4,66 \times 10^{-5}$ и оценивался как допустимый (приемлемый). Суммарный канцерогенный риск при поступлении химических веществ ингаляционным путём формируется в основном за счёт мышьяка и хрома.

ОБСУЖДЕНИЕ

Диапазоны концентраций $PM_{2,5}$ и ММ в их составе, собранных внутри помещений, были выше результатов исследований содержания $PM_{2,5}$ в атмосферном воздухе Челябинска (табл. 7). Это обусловлено наличием внутренних источников загрязнения (пыление текстиля, отделочных материалов стен, полов и потолков и т.д.) и накоплением загрязнений внутри помещений. Однако концентрации $PM_{2,5}$ и ММ, ассоциированных с ними, были выше с апреля по ноябрь, что согласуется с ранее полученными данными для уровня загрязнения воздуха вне помещений [18]. То есть в исследуемых помещениях загрязняющие $PM_{2,5}$ поступают преимущественно снаружи, тем более что при выборе критериев отбора были заранее исключены такие внутренние источники загрязнения, как курение, благовония, приготовление пищи на газовой плите, и была проведена предварительная влажная уборка помещений. То есть смоделирована ситуация, позволяющая минимизировать вклад в уровни концентрации $PM_{2,5}$ внутренних источников загрязнения. Таким образом, в ситуации минимизации внутренних источников происходит накопление загрязнений, поступивших внутрь помещения снаружи. По-видимому, это является причиной того, что в сезон высоких загрязнений для 40% проб зафиксировано превышение предельно допустимых среднесуточных концентраций для $PM_{2,5}$ (35 мкг/м³), в сезон низких загрязнений превышений не наблюдали.

Полученные результаты по оценке возможного неканцерогенного риска, обусловленного попаданием $PM_{2,5}$, содержащих в своём составе ММ, для здоровья детей свидетельствуют о неприемлемом уровне загрязнения при экспозиции на уровне как медианы, так и 95-го перцентиля в большинстве случаев. Хотя в предыдущих исследованиях, проведённых на севере Китая в портовом городе [20] и сельской местности [21], риски от загрязнения ММ-содержащими $PM_{2,5}$, собранными внутри помещений, были выше минимальных значений, однако они не превышали допустимый уровень в городе и настораживающий в сельской местности, где объективно больше источников загрязнения внутри помещений. В нашем исследовании неканцерогенные риски для здоровья детей были значительно выше, описанных в литературе.

Для взрослого населения риск определяется во всех случаях как допустимый. Наибольшие значения индекса опасности наблюдаются в Челябинске в период с апреля по октябрь. Отсутствие превышений гигиенических нормативов по содержанию ММ, обладающих канцерогенными свойствами, также не исключает негативного влияния на здоровье в виде отдалённых последствий (в частности, развития злокачественных новообразований у населения).

ОГРАНИЧЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящем исследовании использовалась небольшая выборка, так как это первый опыт. В связи с этим были исключены очевидные внутренние источники загрязнения воздуха в помещениях ММ [25]. В будущем планируется оценить, как повышают риски курение в помещениях, домашние питомцы, окна, выходящие на оживлённую автомагистраль, а также локализация вблизи промышленного предприятия, использование в помещении различных отделочных материалов и текстиля [26]. В работе оценивали только ингаляционные риски и не учитывали биодоступность элементов [28], в последующих исследованиях будут оценены риски от перорального поступления и через кожу с учётом биодоступности ММ. Также при расчёте рисков не учитывали время, проводимое на улице, так как участники исследования при предварительном анкетировании ответили, что в течение суток проводят в помещениях от 80% и больше времени, однако для большей точности при дальнейшей работе в данном направлении авторы планируют замерять и учитывать в расчётах концентрации $PM_{2,5}$ в городском атмосферном воздухе, как это рекомендуется в Р2.1.10.3968–23.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе впервые для российского города было оценено содержание ММ-содержащих $PM_{2,5}$ и оценены риски для здоровья, обусловленные ингаляционным воздействием данных поллютантов. В дальнейшем планируется расширение объёма выборки, учёт биодоступности ММ, а также других путей поступления $PM_{2,5}$ в организм. В ходе исследования выявлены высокий и настораживающий уровни неканцерогенного риска для здоровья детей, ассоциированные с загрязнением воздуха в помещениях Челябинска.

Поскольку исследование выявило угрозу для здоровья детей, которую нельзя игнорировать, мы рекомендуем проведение более масштабного исследования на территории города, в том числе с участием контролирующих органов. Также необходимо установить на одном из стационарных постов контроля состояния атмосферного воздуха в Челябинске импактор для сбора и последующего определения массовых концентраций $PM_{2.5}$. Таким образом, городским властям рекомендуется усилить контроль за содержанием $PM_{2.5}$ в атмосферном воздухе и разработать специальные мероприятия по снижению рисков. Основные рекомендации для населения включают проведение как можно более частой влажной уборки помещений.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Т.Г. Крупнова — концепция и дизайн исследования, написание и редактирование текста рукописи, интерпретация данных; О.В. Ракова — отбор образцов, обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, анализ экспериментальных данных, подготовка и написание текста статьи; С.В. Гаврилкина — сбор и анализ образцов, описание материалов и методов, анализ результатов исследования, статистический анализ данных. 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.

Благодарность. Благодарим лабораторию Южно-Уральского научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН за помощь в проведении аналитических работ.

Этическая экспертиза. Проведение исследования одобрено локальным этическим комитетом ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный медицинский университет» Минздрава России (протокол № 4 от 10.05.2024).

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

Источники финансирования. Исследование поддержано грантом Российского научного фонда, проект 25-27-00030 (<https://rscf.ru/en/project/25-27-00030/>).

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

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

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

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

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

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: All authors approved the manuscript (the version for publication), and also agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring proper consideration and resolution of questions related to the accuracy and integrity of any part of it.

Acknowledgments: We would like to thank the laboratory of the South Ural Scientific Center of Mineralogy and Geoecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences for their assistance in carrying out analytical work.

Ethics approval: The study was approved by the local Ethics Committee of the South Ural State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Protocol No. 4 dated 05/10/2024).

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

Funding sources: The research was supported by a grant from the Russian Science Foundation, project 25-27-00030 (<https://rscf.ru/en/project/25-27-00030/>).

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

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

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

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Vahlsing C, Smith KR. Global review of national ambient air quality standards for PM(10) and SO(2) (24h). *Air Qual Atmos Health*. 2012;(5):393–399. doi: 10.1007/s11869-010-0131-2
2. Revich BA. Fine suspended particulates in ambient air and their health effects in megalopolises. *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*. 2018;29(3):53–78. doi: 10.21513/0207-2564-2018-3-53-78 EDN: YRXUVF
3. Barskova LS, Vitkina TI, Veremchuk LV, Gvozdenko TA. Assessment of the influence of the composition of atmospheric microparticles on redox homeostasis of alveolar macrophages. *Hygiene and Sanitation*. 2022;101(9):1004–1010. doi: 10.47470/0016-9900-2022-101-9-1004-1010 EDN: ADUQKY
4. Burnett R, Chen H, Szyszkowicz M, et al. Global estimates of mortality associated with longterm exposure to outdoor fine particulate matter. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2018;115(38):9592–9597. doi: 10.1073/pnas.1803222115
5. Altieri KE, Keen SL. Public health benefits of reducing exposure to ambient fine particulate matter in South Africa. *Sci Total Environ*. 2019;(684):610–620. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.3552
6. Meo SA, Salih MA, Al-Hussain F, et al. Environmental pollutants PM2.5, PM10, carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO₂), sulfur dioxide (SO₂), and ozone (O₃) impair human cognitive functions. *Eur Rev Med Pharmacol Sci*. 2024;28(2):789–796. doi: 10.26355/eurev_202401_35079
7. Pope CA 3rd, Burnett RT, Thun MJ, et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Journal of the American Medical Association*. 2002;287(9):1132–1141. doi: 10.1001/jama.287.9.1132
8. Turner MC, Krewski D, Pope CA 3rd, et al. Long-term ambient fine particulate matter air pollution and lung cancer in a large cohort of never-smokers. *Am J Respir Crit Care Med*. 2011;184(12):1374–1381. doi: 10.1164/rccm.201106-1011OC
9. Ali MU, Liu G, Yousaf B, et al. 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):1131–1162. doi: 10.1007/s10653-018-0203-z
10. Yang YW, Liou SH, Hsueh YM, et al. Risk of Alzheimer's disease with metal concentrations in whole blood and urine: A case-control study using propensity score matching. *Toxicology and Applied Pharmacology*. 2018;356:8–14. doi: 10.1016/j.taap.2018.07.015
11. Tellez-Plaza M, Guallar E, Navas-Acien A. Environmental metals and cardiovascular disease. *BMJ*. 2018;362:k3435. doi: 10.1136/bmj.k3435
12. Zhang Y, Xu C, Fu Z, et al. Associations between total mercury and methyl mercury exposure and cardiovascular risk factors in US adolescents. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2018;25(7):6265–6272. doi: 10.1007/s11356-017-0905-2
13. Grau-Perez M, Zhao J, Pierce B, et al. Urinary metals and leukocyte telomere length in American Indian communities: The Strong Heart and the Strong Heart Family Study. *Environ Pollut*. 2019;(246):311–318. doi: 10.1016/j.envpol.2018.12.010
14. Velmurugan G, Swaminathan K, Veerasekar G, et al. Metals in urine in relation to the prevalence of pre-diabetes, diabetes and atherosclerosis in rural India. *Occup Environ Med*. 2018;75(9):661–667. doi: 10.1136/oemed-2018-104996
15. Longnecker MP, Daniels JL. Environmental contaminants as etiologic factors for diabetes. *Environ Health Perspect*. 2001;109 Suppl 6(Suppl 6):871–876. doi: 10.1289/ehp.01109s6871
16. 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? *Postgrad Med*. 2015;127(8):781–782. doi: 10.1080/00325481.2015.1098518
17. Lee J, Lee S, Bae G. A review of the association between air pollutant exposure and allergic diseases in children. *Atmospheric Pollution Research*. 2014;5(4):616–629. doi: 10.5094/APR.2014.071
18. Krupnova TG, Rakova OV, Bondarenko KA, et al. Elemental composition of PM_{2.5} and PM₁₀ and health risks assessment in the industrial districts of Chelyabinsk, South Ural Region, Russia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18(23):12354. doi:10.3390/ijerph182312354
19. Klepeis NE, Nelson WS, Ott WR, et al. The national human activity pattern survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *J Expo Anal Environ Epidemiol*. 2001;11(3):231–252. doi: 10.1038/sj.jea.7500165
20. Fang B, Zeng H, Zhang L, et al. Toxic metals in outdoor/indoor airborne PM_{2.5} in port city of Northern, China: Characteristics, sources, and personal exposure risk assessment. *Environ Pollut*. 2021;279:116937. doi: 10.1016/j.envpol.2021.116937

21. Liu J, Chen H, Qiao S, Zhang Y. Indoor/outdoor relationships of PM_{2.5}-associated toxic metals/metalloids at a rural residence in North China: sources and probabilistic health risks. *Atmospheric Pollution Research*. 2023;14(5):101753. doi: 10.1016/j.apr.2023.101753
22. Jung CC. Investigation of source and infiltration of toxic metals in indoor PM_{2.5} using Pb isotopes during a season of high pollution in an urban area. *Environ Geochem Health*. 2023;46(1):7. doi: 10.1007/s10653-023-01801-7
23. Jung CC, Chung YJ, Chiang TY, et al. Evaluating the representativeness of atmospheric PM_{2.5} data for indoor exposure: insights from concentrations, chemical compositions, and sources. *Environ Pollut*. 2025;375:126350. doi: 10.1016/j.envpol.2025.126350
24. Dolgushina NA, Kuvshinova IA. Air pollution and noncancerogenic risks assessment in industrial cities of Chelyabinsk region. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2019;26(6):17–22. doi: 10.33396/1728-0869-2019-6-17-22 EDN: AHPZTI
25. Krupnova TG, Mashkova IV, Scalev ED, et al. Concentrations of metal(loid)s in outdoor and indoor dust from Russian City. *International Journal of Geomate*. 2018;15(52):30–37. doi: 10.21660/2018.52.8197 EDN: BLHCBN
26. Krupnova TG, Rakova OV, Mashkova IV, et al. Health risk assessment of metal(loid)s exposure via indoor dust from urban area in Chelyabinsk, Russia. *International Journal of Geomate*. 2019;16(55):1–7. doi: 10.21660/2019.55.16501 EDN: OBLWPP
27. Lee SC, Li WM, Ao CH. Investigation of indoor air quality at residential homes in Hong Kong-case study. *Atmospheric Environment*. 2002;36(2):225–237. doi: 10.1016/S1352-2310(01)00435-6
28. Polezer G, Oliveira A, Potgieter-Vermaak S, et al. The influence that different urban development models has on PM_{2.5} elemental and bioaccessible profiles. *Sci Rep*. 2019;9(1):14846. doi: 10.1038/s41598-019-51340-4

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

* Автор, ответственный за переписку	* Corresponding author
* Крупнова Татьяна Георгиевна , канд. хим. наук, доцент; адрес: Россия, 454080, Челябинск, пр-кт Ленина, д. 76; ORCID: 0000-0003-0862-710X; eLibrary SPIN: 3000-8535; e-mail: krupnovatg@susu.ru.	* Tatyana G. Krupnova , Cand. Sci. (Chemistry), Assistant Professor; address: 76 Lenin ave, Chelyabinsk, Russia, 454080; ORCID: 0000-0003-0862-710X; eLibrary SPIN: 3000-8535; e-mail: krupnovatg@susu.ru.
Ракова Ольга Викторовна , канд. хим. наук; ORCID: 0000-0002-5788-5933; eLibrary SPIN: 6508-1984; e-mail: rakovaov@susu.ru	Olga V. Rakova , Cand. Sci. (Chemistry); ORCID: 0000-0002-5788-5933; eLibrary SPIN: 6508-1984; e-mail: rakovaov@susu.ru
Гаврилкина Светлана Викторовна , канд. геол.-минерал. наук; ORCID: 0000-0002-9892-226X; eLibrary SPIN: 4626-8291; e-mail: gidrosv@mail.ru	Svetlana V. Gavrilkina , Cand. Sci. (Geology and Mineralogy); ORCID: 0000-0002-9892-226X; eLibrary SPIN: 4626-8291; e-mail: gidrosv@mail.ru

ТАБЛИЦЫ

Таблица 1. Пределы обнаружения металлов и металлоидов и относительное отклонение их концентрации от паспортного значения государственных стандартных образцов

Table 1. Detection limits (ng/m³) of MM and relative deviation (%) of the results of MM concentration measurements from the State standard certified value

Металлы и металлоиды	Пределы обнаружения, нг/м ³	Относительное отклонение, %
Al	0,1	97
As	0,3	98
Cd	0,5	109
Co	0,1	98
Cr	1,1	87
Cu	1,8	110
Fe	1,1	105
Mn	0,4	95

Ni	1,4	89
Pb	4,2	119
Zn	0,1	107

Таблица 2. Концентрации $PM_{2,5}$ в различные сезоны загрязнения воздуха, $мкг/м^3$

Table 2. $PM_{2,5}$ concentrations ($μg/m^3$) in different air pollution seasons

Статистический показатель	Сезон низкого уровня загрязнения воздуха $PM_{2,5}$	Сезон высокого уровня загрязнения воздуха $PM_{2,5}$
Количество образцов	24	24
Диапазон значений	5–31	13–59
Среднее арифметическое	16,3	32,4
Медиана	16,5	32,0
Процентили (25)	8,5	25,3
Процентили (50)	16,5	32,0
Процентили (75)	23,5	35,0
Процентили (95)	30,8	58,5

Таблица 3. Содержание металлов и металлоидов в $PM_{2,5}$ при низком уровне загрязнения воздуха, $нг/м^3$

Table 3. MM content in $PM_{2,5}$ at a low level of air pollution, (ng/m^3)

Металлы и металлоиды	Диапазон значений	Ср.арифм.	Me	P 25	P 50	P 75	P 95
Al	110,0–450,0	269,4	266,5	221,8	266,5	322,5	439,5
As	2,5–10,4	4,8	4,2	3,3	4,2	5,4	10,2
Cd	0,53–5,68	1,69	1,35	0,93	1,35	1,76	5,36
Co	0,8–3,1	1,8	1,8	1,5	1,8	2,1	3,1
Cr	2,5–8,8	4,3	3,6	3,1	3,6	5,7	8,4
Cu	4,0–25,2	10,8	9,9	7,5	9,8	13,1	23,5
Fe	244,0–1149,0	653,1	603,5	552,0	603,5	820,0	1077,3
Mn	126,0–357,0	183,1	171,5	147,8	171,5	215,5	331,3
Ni	2,6–7,5	4,9	4,9	4,1	4,9	5,6	7,5
Pb	13,3–60,7	29,8	27,2	20,6	27,2	37,0	58,9
Zn	37,0–204,0	90,7	79,5	61,3	79,5	110,5	196,5

Примечание. Ср.арифм. — среднее арифметическое; Me — медиана; P 25 — 25-й процентиль; P 50 — 50-й процентиль; P 75 — 75-й процентиль; P 95 — 95-й процентиль.

Таблица 4. Содержание металлов и металлоидов в $PM_{2,5}$ при высоком уровне загрязнения воздуха, $нг/м^3$

Table 4. MM content in $PM_{2,5}$ at high levels of air pollution, (ng/m^3)

Металлы и металлоиды	Диапазон значений	Ср.арифм.	Me	P 25	P 50	P 75	P 95
Al	202,8–540,0	344,133	339,6	287,1	339,6	396,9	527,4
As	3,3–13,5	6,532	6,045	4,355	6,045	7,513	13,293
Cd	0,77–7,95	2,9858	2,359	1,6765	2,359	4,504	7,504
Co	1,4–7,7	3,548	3,145	2,55	3,145	3,953	7,625
Cr	3,8–18,7	6,977	5,7	4,95	5,7	8,888	17,325
Cu	11,0–37,8	17,444	16,175	12,3	16,175	19,825	35,213
Fe	540,0–1669,6	917,083	856,8	693,3	856,8	1033,5	1597,9
Mn	151,2–476,4	253,083	214,8	188,1	214,8	290,1	470,4
Ni	6,1–14,5	8,766	8,33	7,31	8,33	9,648	14,033
Pb	20,6–72,8	39,565	36,96	29,61	36,96	48,15	70,68
Zn	51,8–285,6	143,6	133,0	93,5	133,0	183,7	285,2

Примечание. Ср.арифм. — среднее арифметическое; Me — медиана; P 25 — 25-й процентиль; P 50 — 50-й процентиль; P 75 — 75-й процентиль; P 95 — 95-й процентиль.

Таблица 5. Коэффициенты опасности, обусловленные ингаляционным поступлением $PM_{2,5}$, и индексы опасности с учётом одностороннего действия металлов и металлоидов на критические органы и ткани

Table 5. Hazard coefficients (HQ) due to inhalation intake of $PM_{2,5}$, and hazard indices (HI) taking into account the unidirectional action of MM on critical organs and tissues

Металлы и металлоиды	Низкий уровень загрязнения воздуха $PM_{2,5}$				Высокий уровень загрязнения воздуха $PM_{2,5}$			
	Me		P 95		Me		P 95	
	HQ взрослые	HQ дети	HQ взрослые	HQ дети	HQ взрослые	HQ дети	HQ взрослые	HQ дети
Al	0,006	0,015	0,009	0,022	0,007	0,019	0,011	0,030
As	0,030	0,080	0,073	0,170	0,043	0,115	0,094	0,253

Cd	0,007	0,019	0,029	0,067	0,013	0,034	0,040	0,107
Co	0,032	0,086	0,055	0,129	0,056	0,150	0,135	0,363
Cr	0,004	0,010	0,009	0,021	0,006	0,016	0,018	0,050
Cu	0,052	0,141	0,125	0,293	0,086	0,231	0,187	0,504
Fe	0,292	0,785	0,521	1,223	0,414	1,114	0,773	2,077
Mn	0,365	0,981	0,705	1,655	0,457	1,229	1,001	2,691
Ni	0,037	0,099	0,057	0,133	0,063	0,170	0,107	0,287
Pb	0,019	0,052	0,042	0,098	0,026	0,070	0,050	0,135
Zn	0,009	0,025	0,023	0,055	0,016	0,042	0,034	0,091
HI _{Од}	0,83	2,23	1,60	3,75	1,15	3,10	2,39	6,42
HI _{НС}	0,71	1,91	1,35	3,17	0,95	2,55	1,93	5,19

Примечание. Ме — медиана; P 95 — 95-й процентиль; HQ — коэффициент опасности; HI_{Од} — индекс опасности по влиянию на органы дыхания; HI_{НС} — индекс опасности по на нервную систему.

Таблица 6. Уровень канцерогенного риска для резидентного населения

Table 6. The level of carcinogenic risk for the resident population

Металлы и металлоиды	Низкий уровень загрязнения воздуха PM _{2,5}				Высокий уровень загрязнения воздуха PM _{2,5}			
	Ме		P 95		Ме		P 95	
	CR взрослые	CR дети	CR взрослые	CR дети	CR взрослые	CR дети	CR взрослые	CR дети
As	2,29×10 ⁻⁶	1,24×10 ⁻⁶	5,59×10 ⁻⁶	2,63×10 ⁻⁶	3,31×10 ⁻⁶	1,78×10 ⁻⁶	7,27×10 ⁻⁶	3,91×10 ⁻⁶
Cd	3,88×10 ⁻⁷	2,09×10 ⁻⁷	1,54×10 ⁻⁶	7,23×10 ⁻⁷	6,77×10 ⁻⁷	3,64×10 ⁻⁷	2,15×10 ⁻⁶	1,16×10 ⁻⁶
Co	8,04×10 ⁻⁷	4,32×10 ⁻⁷	1,38×10 ⁻⁶	6,51×10 ⁻⁷	1,41×10 ⁻⁶	7,56×10 ⁻⁷	3,41×10 ⁻⁶	1,83×10 ⁻⁶
Cr	6,89×10 ⁻⁶	3,71×10 ⁻⁶	1,59×10 ⁻⁵	7,51×10 ⁻⁶	1,09×10 ⁻⁵	5,87×10 ⁻⁶	3,32×10 ⁻⁵	1,78×10 ⁻⁵
Ni	1,85×10 ⁻⁷	9,99×10 ⁻⁸	2,85×10 ⁻⁷	1,34×10 ⁻⁷	3,19×10 ⁻⁷	1,72×10 ⁻⁷	5,37×10 ⁻⁷	2,89×10 ⁻⁷
Pb	5,21×10 ⁻⁸	2,81×10 ⁻⁸	1,13×10 ⁻⁷	5,32×10 ⁻⁸	7,07×10 ⁻⁸	3,81×10 ⁻⁸	1,35×10 ⁻⁷	7,28×10 ⁻⁸
TCR	1,06×10 ⁻⁵	5,71×10 ⁻⁶	2,49×10 ⁻⁵	1,17×10 ⁻⁵	1,66×10 ⁻⁵	8,98×10 ⁻⁶	4,66×10 ⁻⁵	2,51×10 ⁻⁵

Примечание. Ме — медиана; P 95 — 95-й процентиль; CR — индивидуальный канцерогенный риск; TCR — общий риск.

Таблица 7. Сравнение диапазонов концентраций PM_{2,5} (мкг/м³) и металлов и металлоидов (нг/м³) на открытом воздухе и в помещениях, указанных в предыдущих и данном исследовании

Table 7. Comparison between ranges of PM_{2,5} (µg/m³) and MM (ng/m³) of outdoor and indoor concentrations reported in previous and this study

Параметры	Диапазоны концентраций	
	снаружи	внутри
PM _{2,5} (среднесуточная)	5–56	5–59
As	1,4–9,2	4,8–6,5
Cd	0,6–1,0	1,7–3,0
Co	0,2–0,4	1,8–3,5
Cr	1,5–3,5	4,3–7,0
Cu	5,7–11,0	10,7–17,4
Fe	417,0–493,0	653,0–917,0
Mn	21,0–35,0	183,0–253,0
Ni	1,4–3,4	4,9–8,7
Pb	11,0–27,0	29,8–39,6
Zn	115,0–147,0	90,7–143,6
Источники	[18]	Настоящее исследование