



Нурисламова Т.В., Зорина А.С., Зайцева Н.В., Крылов А.А., Зверева Л.А.

Методы исследования содержания металлов и полициклических ароматических углеводородов в составе мелкодисперсных частиц, загрязняющих атмосферный воздух (обзор литературы)

ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения»
Роспотребнадзора, 614045, Пермь, Россия

РЕЗЮМЕ

Загрязнение атмосферного воздуха является глобальной мировой проблемой. Присутствие в нём токсичных соединений, в том числе металлов и полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), входящих в состав мелкодисперсных фракций взвешенных веществ, способствует росту заболеваемости населения.

Цель исследования – провести обзор представленных в научных публикациях современных методов отбора и определения содержания металлов и полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), входящих в состав мелкодисперсных частиц атмосферного воздуха.

Материалом для настоящего обзора послужили публикации из реферативных баз данных *Web of Science*, *PubMed*, *Scopus* и *eLIBRARY*, посвящённые исследованию содержания металлов и ПАУ в составе мелкодисперсных частиц атмосферного воздуха (22 публикации). Анализ показал, что для отбора проб металлов и ПАУ, входящих в состав разных фракций мелкодисперсных частиц, эффективнее использовать многокаскадные импакторы. При подготовке пробы к анализу используют, как правило, целый фильтр, который подвергают кислотному разложению или жидкостной экстракции для определения содержания металлов и ПАУ соответственно. В качестве метода анализа в большинстве случаев применяют масс-спектрометрию с индуктивно связанный плазмой для анализа металлов и газовую хроматографию с масс-спектрометрическим детектированием для анализа ПАУ.

Заключение. Анализ научно-методической литературы показал, что для отбора проб металлов и ПАУ, входящих в состав разных фракций мелкодисперсных частиц, эффективно использование многокаскадных импакторов. Металлы анализируют методами масс-спектрометрии с индуктивно связанный плазмой и оптической эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанный плазмой и обнаруживают на уровне нг и мкг. ПАУ анализируют методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием и обнаруживают на уровне нг и мкг. При этом время отбора образцов составляет 24 ч и более.

Ключевые слова: мелкодисперсные частицы; взвешенные вещества; атмосферный воздух; ПАУ; металлы

Для цитирования: Нурисламова Т.В., Зорина А.С., Зайцева Н.В., Крылов А.А., Зверева Л.А. Методы исследования содержания металлов и полициклических ароматических углеводородов в составе мелкодисперсных частиц, загрязняющих атмосферный воздух (обзор литературы). *Гигиена и санитария*. 2025; 104(9): 1223–1228. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-9-1223-1228> <https://elibrary.ru/etauid>

Для корреспонденции: Зорина Анастасия Сергеевна, e-mail: zorina@fcrisk.ru

Участие авторов: Нурисламова Т.В., Зорина А.С. – дизайн исследования, редактирование; Зайцева Н.В. – концепция и редактирование; Крылов А.А., Зверева Л.А. – сбор и анализ данных литературы, написание текста. **Все соавторы** – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех её частей.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование не имело финансовой поддержки.

Поступила: 03.04.2025 / Поступила после доработки: 02.06.2025 / Принята к печати: 19.09.2025 / Опубликована: 20.10.2025

Tatyana V. Nurislamova, Anastasia S. Zorina, Nina V. Zaitseva, Aleksey A. Krylov,
Lada A. Zvereva

Methods of investigating the content of metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in fine particles in the composition of fine particles polluting the ambient air (literature review)

Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation

ABSTRACT

Ambient air pollution is currently a global problem. The presence of various toxic compounds in ambient air, including metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) with fine suspended particles, contributes to the development and increase in population morbidity.

The aim of the study. To conduct a review of up-to-date methods for determining levels of metals and PAHs in fine particles polluting ambient air, which are currently available in scientific reports.

The material for this review was represented by data from Russian and foreign scientific literature published in the abstract databases *Web of Science*, *PubMed*, *Scopus* and *eLIBRARY* and devoted to investigating levels of metals and PAHs associated with fine particles in ambient air (twenty two reports).

Analysis of literary sources has shown that it is more efficient to use multi-cascade impactors for sampling metals and PAHs contained in different fractions of fine particles. To prepare a sample for analysis, a whole filter is usually used, which is subjected to acid decomposition or liquid extraction for analysis of metals and PAHs, respectively. As an analytical method, most studies use inductively coupled plasma mass spectrometry for metal analysis and gas chromatography with mass spectrometric detection for PAH analysis.

Conclusion. Analysis of scientific and methodological literature has shown that it is effective to use multi-stage impactors for taking metal and PAH samples, which are parts of different fractions of fine-dispersed particles. Metals are analyzed by inductively coupled plasma mass spectrometry and inductively coupled plasma

optical emission spectrometry at the ng and µg level. PAHs are analyzed using gas chromatography with massspectrometric detection and found at the ng and µg level. However, the sampling time is 24 hours or more.

Keywords: fine particles; suspended particles; ambient air; PAHs; metals

For citation: Nurislamova T.V., Zorina A.S., Zaitseva N.V., Krylov A.A., Zvereva L.A. Methods of investigating the content of metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in fine particles in the composition of fine particles polluting the ambient air (literature review). *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal.* 2025; 104(9): 1223–1228. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-9-1223-1228> <https://elibrary.ru/etauid> (In Russ.)

For correspondence: Anastasia S. Zorina, e-mail: zorina@fcrisk.ru

Contribution: Nurislamova T.V., Zorina A.S. – research design and editing; Zaitseva N.V. – concept and editing; Krylov A.A., Zvereva L.A. – literature data collection and analysis, text writing. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The study had no sponsorship.

Received: April 3, 2025 / Revised: June 2, 2025 / Accepted: September 19, 2025 / Published: October 20, 2025

Загрязнение атмосферного воздуха является глобальной мировой проблемой. Присутствие в атмосферном воздухе различных токсичных соединений, в том числе металлов и полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), входящих в состав мелкодисперсных фракций взвешенных веществ, способствует росту заболеваемости населения.

Мелкодисперсные фракции взвешенных частиц (PM) представляют собой широко распространённый загрязнитель атмосферного воздуха, состоящий из смеси взвешенных твёрдых частиц и аэрозолей [1]. К показателям, характеризующим PM и формирующем потенциальную опасность для здоровья, относятся массовая концентрация частиц диаметром менее 10 мкм (PM₁₀) и диаметром менее 2,5 мкм (PM_{2,5}). В PM_{2,5}, которые часто называют мелкодисперсными взвешенными частицами, входят и ультрамелкодисперсные частицы диаметром менее 0,1 мкм. К наиболее распространённым химическим компонентам PM относятся сульфаты, нитраты, другие неорганические ионы – натрия, калия, кальция, магния и хлорид-ионы, органический и элементарный углерод, металлы и полициклические ароматические углеводороды, в том числе бенз(а)пирен [2, 3].

Металлы и органические соединения, в том числе ПАУ, являются приоритетными загрязняющими веществами атмосферного воздуха, которые взаимосвязаны с мелкодисперсными фракциями PM и определены как одна из основных причин токсичности для человека вдыхаемых PM. Различные металлы (Zn, Ni, Mn, Cr, Cd, Co, Cu, Hg, Pb, Sb) могут вызывать образование активных форм кислорода и воспаление, оказывать негативное влияние на сердечно-сосудистую, эндокринную, респираторную, нервную и репродуктивную системы [4–6]. ПАУ образуются преимущественно в результате пиролитических процессов, особенно при неполном горении органических материалов во время производственных циклов. Многие ПАУ способны не только оказывать общетоксическое действие, но и вызывать обусловленные свойствами мутагенности и канцерогенности отдалённые последствия [7–9].

Исследования показали, что PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁ (частицы диаметром менее 1 мкм) имеют разные физико-химические свойства, определяемые размерами частиц и химическими составляющими, и, следовательно, различное поведение при дисперсии и попадании в организм [10]. Потенциально опасные соединения и элементы в большей степени представлены более мелкими частицами взвешенных веществ.

От размера частиц зависит их способность проникать в лёгкие. Широко известно, что чем меньше частица, тем глубже она может проникнуть в дыхательные пути. Естественные барьеры организма могут в определённой степени ограничивать поступление крупных частиц, таких как PM₁₀, поскольку они удаляются с помощью механизма мукоклинического клиренса [11]. Мелкодисперсные частицы диаметром менее 4 мкм (PM₄) представляют собой вдыхаемые частицы, способные достигать нересинтактных дыхательных путей лёгочной области, а более мелкие частицы проникают глубже в лёгкие до альвеол и лишь частично удаляются

альвеолярными макрофагами [1, 12]. Достигнув альвеол, частицы менее 1 мкм проходят через клеточную мембрану, попадают в кровоток и распространяются по всему организму [13]. Эти частицы могут накапливаться в печени, мозге и сердце [14, 15]. Мелкодисперсные частицы PM_{2,5} и PM₁₀ входят в число критериев загрязнения атмосферы, и их массовая концентрация регулируется стандартами качества окружающего воздуха во многих странах. В России СанПиН 1.2.3685–21* регулирует содержание в атмосферном воздухе PM_{2,5} и PM₁₀, при этом концентрации PM₁ не регламентируются [16].

По сравнению с PM_{2,5} и PM₁₀ химический состав PM₁ изучен в меньшей степени, в основном из-за проблем со сбором достаточного количества материала для химического анализа. Соотношение различных фракций мелкодисперсных частиц может сильно варьировать, но при этом PM₁ составляют большую часть PM_{2,5}. Так, исследования на разных территориях в разные сезоны показали, что в среднем PM₁ составляют 60–99,5% PM_{2,5} [17–20]. В связи с этим важно знать химический состав различных фракций PM, особенно самых мелких, для дальнейшего изучения их связи с рисками для здоровья, обусловленными токсичностью частиц. Основное внимание при определении металлов и ПАУ в атмосферном воздухе уделяется способу отбора проб, что весьма актуально при анализе содержания металлов и ПАУ, ассоциированных с мелкодисперсными частицами.

Цель исследования – выполнить обзор представленных в научных публикациях современных методов отбора и определения содержания металлов и ПАУ в составе мелкодисперсных частиц атмосферного воздуха.

Проведён анализ публикаций из реферативных баз данных Web of Science, PubMed, Scopus и eLIBRARY.RU за период с 2020 по 2025 г. Изучено 160 публикаций. Отбор статей осуществлялся по принципу наличия в них сведений об исследовании содержания металлов и ПАУ в мелкодисперсных частицах атмосферного воздуха, в том числе о способах отбора и пробоподготовки, а также данных о чувствительности и погрешности методик. Проанализировано 22 полнотекстовых материала, удовлетворяющих вышеуказанным критериям.

В настоящее время существует множество сорбентов, используемых в разных странах (Россия, Индия, Бразилия, Греция, Китай, Иран, Южная Корея, Италия, Польша, США), для отбора атмосферного воздуха при анализе металлов и ПАУ, входящих в состав мелкодисперсных фракций взвешенных веществ. К таким сорбентам относятся кварц [26–28, 30–34], политетрафторэтилен (ПТФЭ) [23, 25, 26, 29], стекловолокно [24], поликарбонат [21], боросиликатное стекло [22]. В качестве оборудования для сбора образцов пыли чаще всего используют пробоотборники со сменными насадками для разных фракций мелкодисперсных частиц [22, 25, 27–34].

* Санитарные правила и нормы СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (постановление Роспотребнадзора от 28.01.2021 г. № 2).

Представлены также многокаскадные импакторы для одновременного отбора нескольких фракций мелкодисперсных частиц [21, 23, 24, 26].

В изученных публикациях отражена технология подготовки проб воздуха к анализу. Для определения содержания металлов используется в основном микроволновое разложение с применением азотной кислоты (HNO_3) или смеси азотной кислоты с соляной (HCl), плавиковой (HF), хлорной (HClO_4) кислотами в различных вариациях. Для анализа содержания ПАУ в большинстве случаев использовалась жидкостная экстракция чистыми растворителями или смесью растворителей (дихлорметан, метанол, гексан, ацетон, толуол, ацетонитрил, эфир) в разных соотношениях с последующей ультразвуковой обработкой и высушиванием экстракта в потоке азота.

Для анализа металлов и ПАУ, ассоциированных с мелкодисперсными частицами, используются различные методы, основным из которых является спектрометрия: для анализа металлов – масс-спектрометрия с индуктивно связанный плазмой (ИСП-МС) и оптическая эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанный плазмой (ОЭС-ИСП); для анализа ПАУ – газовая хроматография с масс-спектрометрическим детектированием (ГХ-МС).

Авторы [21] собирали образцы воздуха на поликарбонатные фильтры при помощи четырехступенчатого каскадного импактора (ИКС-4). Продолжительность отбора составляла 72 ч, скорость отбора – 16 л/мин, объём отобранного воздуха – 122,256 м³. Импактор позволял отбирать фракции PM_{10} , PM_{10-5} , $\text{PM}_{5-2,5}$, $\text{PM}_{2,5}$, но для анализа содержания Al, Fe, As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn использовали только PM_{10} и $\text{PM}_{2,5}$. На этапе подготовки образцов к анализу к фильтрам добавляли 6 мл HNO_3 и 2 мл HF и подвергали микроволновому разложению в течение двух часов. После разложения экстракти фильтровали с помощью фильтра «синяя лента» и разбавляли дистиллированной водой до объёма 25 мл. Анализ Al и Fe проводился с использованием ОЭС-ИСП. Анализ As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb и Zn выполняли методом ИСП-МС, что позволило определить металлы на уровне нг/м³. Предел обнаружения для Al, Co, Zn составил 0,1 нг/м³; для As – 0,3 нг/м³; для Mn – 0,4 нг/м³; для Cd – 0,5 нг/м³; для Cr, Fe – 1,1 нг/м³; для Ni – 1,4 нг/м³; для Cu – 1,8 нг/м³; для Pb – 4,2 нг/м³. Степень извлечения металлов из образцов была достаточно высокой – в диапазоне 87–119%.

В исследовании [22] авторы собирали фракции PM_{10} и $\text{PM}_{2,5}$ атмосферного воздуха при помощи двух разных пробоотборников мелкодисперсных частиц (Envirotech). Для определения содержания частиц PM_{10} при отборе проб воздуха использовали бумажные фильтры, для частиц $\text{PM}_{2,5}$ – политетрафторэтиленовые. Продолжительность отбора в обоих случаях составляла 24 ч. Скорость отбора PM_{10} была в пределах 1,1–1,26 м³/мин; скорость отбора $\text{PM}_{2,5}$ составляла 16,7 л/мин, а объём отобранного воздуха – 26,4–30,24 м³ для PM_{10} и 0,4 м³ для $\text{PM}_{2,5}$. Для анализа Fe, Pb, Cd, Ni, Cu, Cr, Zn использовали четверть бумажного фильтра с PM_{10} и целый фильтр ПТФЭ с $\text{PM}_{2,5}$. К фильтрам добавляли 20 мл HNO_3 и 2 мл HClO_4 и подвергали их микроволновому разложению при температуре плюс 210 °C в течение 25 мин. После разложения фильтров растворяли, фильтраты с частицами PM_{10} и $\text{PM}_{2,5}$ разбавляли до 50 и 25 мл соответственно деионизированной водой и анализировали методом атомно-абсорбционной спектрометрии (AAC). Предел обнаружения составил 0,5; 10; 0,4; 9; 1; 3; 0,5 мг/м³ для Fe, Pb, Cd, Ni, Cu, Cr, Zn соответственно. Вероятно, чувствительность метода AAC и меньший объём отобранного воздуха не позволили достичь предела обнаружения на уровне нг/м³, как в предыдущем исследовании [21].

В работе [23] авторы отбирали пробы воздуха, содержащие фракции $\text{PM}_{10-1,8}$; $\text{PM}_{1,8-0,56}$; $\text{PM}_{0,56-0,1}$; $\text{PM}_{0,1}$, при помощи каскадного импактора (MSP MOUDI). В качестве сорбента для отбора атмосферного воздуха использовали ПТФЭ-фильтры. Продолжительность отбора составляла 24 ч, скорость отбора – 30 л/мин, объём отобранного воз-

духа – 43,2 м³. На этапе подготовки проб к анализу к фильтрам добавляли 8 мл HNO_3 , 10 мл дистиллированной воды и кипятили. После охлаждения добавляли 10 мл дихлорметана (ДХМ) и обрабатывали ультразвуком в течение 30 мин. Неорганическую фракцию отделяли, выпаривали и растворяли в 10 мл HNO_3 . Для анализа Ba, Ca, Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, V, Zn использовали метод ИСП-МС. Предел определения металлов находился в диапазоне от 0,018 до 12,1 мкг/л или от 18 до 12 100 мкг/м³, что не соответствует чувствительности применяемого метода. Такие результаты могли быть получены вследствие неправильно проведённой подготовки проб к анализу.

S.L.Q. De Souza и соавт. [24] отбирали пробы воздуха, содержащие фракции $\text{PM}_{18-1,8}$, $\text{PM}_{1,8-1}$, $\text{PM}_{1-0,32}$, $\text{PM}_{0,32-0,056}$, на стекловолоконные фильтры также при помощи каскадного импактора (MSP MOUDI). Продолжительность отбора составляла 120 ч, скорость отбора – 30 л/мин, объём отобранного воздуха – 216 м³. На этапе подготовки проб к анализу к фильтрам добавляли 5 мл HNO_3 , 2 мл HCl , 10 мл сверхчистой воды и нагревали в течение 2 ч при температуре плюс 95 °C. После разложения фильтров раствор фильтровали, фильтраты разбавляли до 20 мл сверхчистой водой и анализировали методом ОЭС-ИСП. При этом степень извлечения металлов из образцов составляла 81–124%. Предел определения был 0,463 мкг/м³ для Cd, Co, Cu, Mn, Cr, Ni, V; 6,019 мкг/м³ для Pb; 0,926 мкг/м³ для Fe; 1,852 мкг/м³ для Mo. Можно предположить, что подготовка проб к анализу не была достаточно эффективной, поскольку в аналогичном исследовании [21] авторы использовали тот же метод, объём отобранного воздуха был примерно вдвое меньше, а предел обнаружения при этом находился на уровне нг/м³.

В работе [25] образцы воздуха, содержащие частицы $\text{PM}_{2,5}$ и PM_1 , отбирали на ПТФЭ-фильтры при помощи пробоотборников с низким расходом воздуха (ENCO PM). Продолжительность отбора составляла 24 ч, скорость отбора – 38,3 л/мин, объём отобранного воздуха – 55,152 м³. Для подготовки пробы к анализу брали половину фильтра, добавляли 10 мл ультрачистой воды и обрабатывали ультразвуком в течение 30 мин. После экстракции раствор фильтровали и подкисляли до 2% HNO_3 . Содержание элементов As, Cd, Cr, Cu, Fe, Pb, Mn, Ni, V, Zn в пробе определяли при помощи ИСП-МС. Предел определения при этом варьировал от 0,000002 до 0,0001 мкг/м³.

Yang M. и соавт. [26] отбирали пробы атмосферного воздуха для анализа металлов и ПАУ одновременно. Для анализа содержания металлов и ПАУ собирали образцы атмосферного воздуха на ПТФЭ-фильтры и кварцевые фильтры соответственно. Отбор проб проводили при помощи каскадного импактора большого объёма (HVCI) со сбором фракций PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$, PM_1 , $\text{PM}_{0,2}$. Продолжительность отбора составляла: для дневной пробы – 53 ч 40 мин, для ночной пробы – 60 ч 58 мин. При этом объёмы отобранного воздуха (2800 м³ для дневной пробы и 3225 м³ для ночной) были наибольшими среди всех, обнаруженных нами по литературным источникам. Для анализа металлов образцы элюировали кислотной смесью: 5,55% HNO_3 , 16,55% HCl , 77,9% сверхчистой воды. Для определения содержания металлов в образцах применяли метод ИСП-МС. Предел обнаружения составил 0,005 нг для Be, Co, Y, Tl, U; 0,1 нг для Cd; 1 нг для Mg, Al, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Se, Sr, Sn, Sb, Ba, Ce, Pb; 5 нг для Na, Si, K, Ca, что соотносится с результатами работы [21]. При этом невозможно оценить чувствительность предлагаемой методики, поскольку неизвестно, представлен ли предел обнаружения для экстракта или для объёма отобранного воздуха. При анализе ПАУ к фильтрам добавляли смесь дихлорметана с метанолом (97 : 3) и многократно высушивали в потоке азота. Высушенный образец растворяли в 300 мкл н-гексана. Анализ содержания ПАУ проводили методом ГХ-МС, что позволило обнаружить ПАУ на уровне нг/м³. Предел обнаружения составил 1,49 нг/м³ для нафталина, 3,16 нг/м³ для аценафтиена,

2,51 нг/м³ для аценафтилена, 5,02 нг/м³ для флуорена, 2,7 нг/м³ для фенантрена, 1,77 нг/м³ для антрацена, 5,4 нг/м³ для флуорантена, 3,26 нг/м³ для пирена, 1,98 нг/м³ для бенз(а)антрацена, 2,33 нг/м³ для хризена, 8 нг/м³ для бенз(б)флуорантена, 4,74 нг/м³ для бенз(к)флуорантена, 9,58 нг/м³ для бенз(ж)флуорантена, 1,82 нг/м³ для бенз(е)пирена, 8,47 нг/м³ для бенз(а)пирена, 2,88 нг/м³ для индено(1,2,3-cd)пирена, 1,81 нг/м³ для дibenз(а,г)антрацена, 4,09 нг/м³ бенз(г,х,и)перилена.

J. Fu и соавт. [27] для отбора проб мелкодисперсных частиц атмосферного воздуха PM_{2,5} использовали кварцевые фильтры. Пробы отбирали при помощи пробоотборника с высоким расходом воздуха (Wuhan Tianhong Intelligent Instrument Factory). Продолжительность отбора составляла 24 ч, скорость – 350 л/мин, объём отобранного воздуха – 504 м³. Для анализа использовали половину фильтра, который дважды экстрагировали 15 мл ацетонитрила (АцН); экстракты объединяли и высушивали до 0,5 мл в потоке азота. При этом степень экстракции находилась в диапазоне от 58,8 до 83,5%. Для анализа содержания нафтилина, аценафтилена, аценафтилена, флуорена, фенантрена, антрацена, флуорантена, пирена, бенз(а)антрацена, бенз(к)флуорантена, бенз(б)флуорантена, индено(1,2,3-cd)пирена, бенз(а)пирена, хризена, дibenз(а,г)антрацена, бенз(г,х,и)перилена использовали высокоеффективную жидкостную хроматографию с флуориметрическим детектором (ВЭЖХ-ФЛД). Предел обнаружения и предел определения составили 0,4–3 и 16–11,9 нг/м³ соответственно. Очевидно, такая подготовка проб к анализу была достаточно эффективна, что позволило определить ПАУ на уровне нг/м³ методом ВЭЖХ-ФЛД.

В работе [28] для отбора проб мелкодисперсных частиц атмосферного воздуха PM_{2,5} использовали пробоотборник с высоким расходом воздуха (Wuhan Tianhong Company). Образцы воздуха собирали на кварцевые фильтры. Продолжительность отбора составляла 24 ч, скорость отбора – 1000 л/мин, объём отобранного воздуха – 1440 м³. Для подготовки проб к анализу использовали половину фильтра, который экстрагировали 33 мл смеси гексана с ацетоном (1 : 1). Во время экстракции создавали давление до 14 МПа и нагревали до плюс 120 °С в течение 6 мин. Затем температуру и давление поддерживали постоянными в течение 5 мин, после чего элюировали ДХМ с дополнительной продувкой азотом в течение 90 с. Цикл экстракции для каждого образца повторяли два раза. Два экстракта из каждого образца объединяли, высушивали сульфатом натрия, выпаривали на роторном испарителе при температуре плюс 35 °С и растворяли высущенные экстракты в гексане. Степень экстракции составила 87–118%. Анализ содержания 9-нитроантрацена, 1-нитропирена, 2-нитрофлуорена проводили методом ГХ-МС. Предел обнаружения составил 0,0192–0,513 пг/м³, что является самым низким пределом обнаружения, полученным при анализе ПАУ в атмосферном воздухе.

Авторы [29] отбирали образцы воздуха, содержащие фракции PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁, для анализа на содержание ПАУ (нафтилина, аценафтилена, аценафтилена, флуорена, фенантрена, антрацена, флуорантена, пирена, бенз(а)антрацена, бенз(к)флуорантена, бенз(б)флуорантена, индено(1,2,3-cd)пирена, бенз(а)пирена, хризена, дibenз(а,г)антрацена, бенз(г,х,и)перилена) на ПТФЭ-фильтры при помощи пробоотборника с малым расходом воздуха (FRM OMNITM Air Sampler). Продолжительность отбора составляла 24 ч, скорость отбора – 5 л/мин, объём отобранного воздуха – 7,2 м³. Для анализа на содержание ПАУ использовали четверть фильтра, добавляли 4 мл смеси метанола с дихлорметаном (1 : 1), экстрагировали ультразвуком в течение 30 мин, концентрировали до 0,5 мл и растворяли в 30 мл гексана. Экстракт выпаривали до 0,1 мл и анализировали методом ГХ-МС. Степень экстракции составила 74–109%, предел обнаружения – 0,12 нг, но при этом невозможно оценить чувствительность предлагаемой методики, поскольку непонятно, представлен ли предел обнаружения для экстракта или для объёма отобранного воздуха.

В работе [30] авторы отбирали образцы мелкодисперсных частиц атмосферного воздуха, содержащие частицы PM_{2,5}, на кварцевые фильтры при помощи пробоотборника со средним расходом воздуха (TH-150A, Wuhan Tianhong Instruments). Продолжительность отбора составляла 24 ч, скорость отбора – 100 л/мин, объём отобранного воздуха – 144 м³. Затем к отобранным фильтрам добавляли 15 мл смеси эфира с гексаном (1 : 9), экстрагировали ультразвуком в течение 1 ч и концентрировали до 1 мл. Для анализа содержания тех же ПАУ, что и в работе [29], использовали метод ГХ-МС. Это позволило установить предел обнаружения в диапазоне 0,03–0,08 нг/м³.

S. Ju и соавт. [31] отбирали образцы атмосферного воздуха, содержащие частицы PM₁₀, на кварцевые фильтры при помощи пробоотборника с большим расходом воздуха (Kimoto) для анализа содержания тех же ПАУ, что и в работе [29]. Продолжительность отбора составляла 24 ч, скорость отбора – 700 л/мин, объём отобранного воздуха – 1008 м³. Фильтры экстрагировали смесью дихлорметана с метанолом (3 : 1) под ультразвуком в течение 30 мин, концентрировали до 10 мл в потоке азота. Экстракты фильтровали и разбавляли в 10 раз диметилсульфоксидом (ДМСО). Образцы анализировали при помощи метода ГХ-МС. Предел обнаружения составил 0,02–0,051 нг. Аналогично работе [29] невозможно оценить чувствительность предлагаемой методики, поскольку непонятно, представлен ли предел обнаружения для экстракта или для объёма отобранного воздуха.

В работе [32] авторы объединяли два кварцевых фильтра, отобранные за два дня, при помощи пробоотборника с малым расходом воздуха для PM_{2,5} (Skypost PM, TCR-TECORA Instruments). Продолжительность отбора на один фильтр составляла 24 ч, скорость отбора – 38,3 л/мин, объём отобранного воздуха – 55 м³. К объединённым фильтрам добавляли 15 мл смеси гексана с дихлорметаном (1 : 9), экстрагировали ультразвуком в течение 1 ч, концентрировали до 1 мл. Степень экстракции составила 72–90%. Для анализа содержания тех же ПАУ, что и в работе [29], использовали метод ГХ-МС. Предел обнаружения составил 0,002–0,016 нг/м³.

В работе [33] частицы PM_{2,5}, содержащиеся в атмосферном воздухе, отбирали на кварцевые фильтры при помощи пробоотборника с высоким расходом воздуха (DH-80, Digitel). Продолжительность отбора составляла 24 ч. Для анализа использовали 3 см² фильтра, которые экстрагировали в течение 4 ч дихлорметаном, экстракт высушивали досуха и растворяли 1 мл АцН. Для анализа бенз(а)антрацена, бенз(к)флуорантена, бенз(ж)флуорантена, бенз(б)флуорантена, индено(1,2,3-cd)пирена, бенз(а)пирена, хризена, дibenз(а,г)антрацена, бенз(г,х,и)перилена использовали метод ВЭЖХ с флуориметрическим и диодноматричным детекторами одновременно. Предел обнаружения составил 50 мг, предел определения – 0,4 мг для бенз(ж)флуорантена и 0,1 мг для остальных ПАУ. Аналогично работам [29, 31] невозможно оценить чувствительность предлагаемой методики, поскольку непонятно, представлен ли предел обнаружения для экстракта или для объёма отобранного воздуха.

В работе [34] образцы воздуха, содержащие частицы PM_{2,5}, собирали на кварцевые фильтры при помощи пробоотборника со средним расходом воздуха (Model TH-150A). Продолжительность отбора составляла 24 ч, скорость отбора – 100 л/мин, объём отобранного воздуха – 144 м³. Фильтры дважды экстрагировали 10 мл смеси гексана с дихлорметаном (1 : 1) 15 мин при температуре плюс 100 °С. Экстракт высушивали до 1 мл и анализировали на содержание нафтилина, бифенила, аценафтилена, аценафтилена, флуорена, фенантрена, антрацена, флуорантена, пирена, бенз(а)антрацена, бенз(к)флуорантена, бенз(б)флуорантена, индено(1,2,3-cd)пирена, бенз(ж)пирена, бенз(а)пирена, хризена, дibenз(а,г)антрацена, бенз(г,х,и)перилена, коронена при помощи метода ГХ-МС. Степень извлечения ПАУ составила 57–105%. Предел обнаружения находился в диапазоне 0,0001–0,01 мкг/м³, что не соответствует чувствительности применяемого метода.

Анализ данных о распределении металлов по содержанию в различных фракциях мелкодисперсных частиц свидетельствует о том, что металлы представлены либо в PM_{10} , либо в PM_1 [12, 22, 26, 35–37]. В исследовании [38] авторы разделили металлы, содержащиеся в разных фракциях мелкодисперсных частиц. Показано, что Na, Mg, Al, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Sr, Zr, Ba, U представлены в составе частиц диаметром $> 1,78$ мкм; As и Se – в составе частиц диаметром менее 1 мкм; K, V, Ni, Cu, Zn, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, W, Pb, Th одинаково представлены как в составе крупных, так и более мелких частиц. Tian Y. и соавт. также показали, что Co, Cr, Ni, Fe, Mn, Cu в целом больше представлены в PM_{10} , в то время как As, Cd и Pb – в $PM_{2,5}$ [39].

Противоречивость имеющихся данных объясняется тем, что состав мелкодисперсных частиц зависит от специфики источника загрязнения, и это доказано многими исследованиями. Так, в работе [40] показано, что металлы, образующиеся в результате переработки электронных отходов, как правило, присутствуют в составе более крупных частиц (PM_{10-100}), тогда как металлы, отобранные в атмосферном воздухе жилых районов, чаще обнаруживаются в составе более мелких частиц ($PM_{2,5}$ и $PM_{2,5-10}$).

Авторы всех исследований, отражавших распределение ПАУ на разных фракциях мелкодисперсных частиц, со-

шлись во мнении, что ПАУ в большей степени представлены на более мелких фракциях, особенно на частицах с аэродинамическим диаметром 1 мкм и менее [26, 39, 41, 42]. F. Jahedi и соавт. также показали, что по мере уменьшения размера PM доля ПАУ с пятью–шестью кольцами в общем количестве ПАУ увеличивается [29].

Заключение

Таким образом, анализ литературных источников показал, что оптимальными методами отбора и определения содержания металлов и ПАУ, входящих в состав мелкодисперсных частиц атмосферного воздуха, являются:

- многокаскадные импакторы, так как они позволяют отбирать одновременно несколько фракций мелкодисперсных частиц;
- метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой для анализа содержания металлов, поскольку он позволяет обнаруживать металлы, входящие в состав мелкодисперсных фракций взвешенных веществ, на уровне нг/м³;
- метод газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием для анализа содержания ПАУ, так как он позволяет обнаруживать металлы, входящие в состав мелкодисперсных фракций взвешенных веществ, на уровне нг/м³ и пг/м³.

Литература (п.п. 1–15, 17–42 см. References)

16. Зайцева Н.В., Клейн С.В., Четверкина К.В., Андришунас А.М., Цинкер М.Ю. Об уровне безопасного содержания микроразмерных твёрдых частиц $PM_{1,0}$ в атмосферном воздухе. *Гигиена и санитария*. 2024; 103(11): 1434–40. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-11-1434-1440> <https://elibrary.ru/hipitl>

References

1. Fatima S., Mishra S.K., Kumar U., Ahlawat A., Dabodiya T.S., Khosla D. Role of morphology and chemical composition of PM for particle deposition in human respiratory system: A case study over megacity – Delhi. *Urban Climate*. 2023; 47: 101344. <https://doi.org/10.1016/j.ulclim.2022.101344>
2. Veld M.I., Alastuey A., Pandolfi M., Amato F., Pérez N., Reche C., et al. Compositional changes of $PM_{2,5}$ in NE Spain during 2009–2018: a trend analysis of the chemical composition and source apportionment. *Sci. Total. Environ.* 2021; 795: 148728. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148728>
3. Gupta A.D., Soni A., Gupta T. Synergistic cancer risk assessment from PM_1 bound metals and PAHs in the Indo-Gangetic region. *Sustain. Chem. Environ.* 2023; 1: 100002. <https://doi.org/10.1016/j.scnv.2023.100002>
4. Isinkalarlar O., Isinkalarlar K., Nguyen T.N.T. Spatial distribution, pollution level and human health risk assessment of heavy metals in urban street dust at neighbourhood scale. *Int. J. Biometeorol.* 2024; 68(10): 2055–67. <https://doi.org/10.1007/s00484-024-02729-y>
5. Balali-Mood M., Naseri K., Tahergorabi Z., Khazdair M.R., Sadeghi M. Toxic mechanisms of five heavy metals: mercury, lead, chromium, cadmium, and arsenic. *Front. Pharmacol.* 2021; 12: 643972. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.643972>
6. Wang H.Z., Cai L.M., Wang Q.S., Hu G.H., Chen L.G. A comprehensive exploration of risk assessment and source quantification of potentially toxic elements in road dust: A case study from a large Cu smelter in central China. *CATENA*. 2021; 196: 104930. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104930>
7. Yang L., Zhang H., Zhang X., Xing W., Wang Y., Bai P., et al. Exposure to atmospheric particulate matter-bound polycyclic aromatic hydrocarbons and their health effects: a review. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2021; 18(4): 2177. <https://doi.org/10.3390/ijerph18042177>
8. Krzyszczak A., Czech B. Occurrence and toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons derivatives in environmental matrices. *Sci. Total. Environ.* 2021; 788: 147738. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147738>
9. Arif I., Adams M.D., Johnson M.T.J. A meta-analysis of the carcinogenic effects of particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environ. Pollut.* 2024; 351: 123941. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123941>
10. Cherian D., Hyun K.Y., Jaegoo H., Choi J.H. Assessing the distributional characteristics of PM_{10} , $PM_{2,5}$, and PM_1 exposure profile produced and propagated from a construction activity. *J. Clean. Prod.* 2020; 276: 124335. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124335>
11. Anderson J.O., Thundiyil J.G., Stolbach A. Clearing the air: a review of the effects of particulate matter air pollution on human health. *J. Med. Toxicol.* 2012; 8(2): 166–75. <https://doi.org/10.1007/s13181-011-0203-1>
12. Gou G., Zhang D., Wang Y. Characteristics of heavy metals in size-fractionated atmospheric particulate matters and associated health risk assessment based on the respiratory deposition. *Environ. Geochem. Health*. 2021; 43(1): 285–99. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00706-z>
13. Moreno-Rios A.L., Tejeda-Benitez L.P., Bustillo-Lecompte C.F. Sources, characteristics, toxicity, and control of ultrafine particles: An overview. *Geosci. Front.* 2022; 13(1): 101147. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101147>
14. Geiser M., Kreyling W.G. Deposition and biokinetics of inhaled nanoparticles. *Part. Fibre Toxicol.* 2010; 7: 2. <https://doi.org/10.1186/1743-8977-7-2>
15. Liu N.M., Miyashita L., Maher B.A., McPhail G., Jones C.J.P., Barratt B., et al. Evidence for the presence of air pollution nanoparticles in placental tissue cells. *Sci. Total. Environ.* 2021; 751: 142235. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142235>
16. Zaitseva N.V., Kleyn S.V., Chetverkina K.V., Andriushunas A.M., Tsinker M.Yu. On the safe levels of micro-sized particles $PM_{1,0}$ in ambient air. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2024; 103(11): 1434–40. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-11-1434-1440> <https://elibrary.ru/hipitl> (in Russian)
17. Slachtova H., Tomasek I., Polaufova P., Hellebrandova L., Splichalova A., Tomaskova H. An assessment of PM_1 levels based on indicative PM_1 measurements and relationships with PM_{10} and $PM_{2,5}$ concentrations, for the analysis of hospital admissions and mortality in the Moravian region. *Med. Pr.* 2021; 72(3): 249–58. <https://doi.org/10.13075/mp.5893.01078>
18. Constantin J.G., Londonio A., Bajano H., Smichowski P., Gomez D.R. Plasma-based technique applied to the determination of 21 elements in ten size fractions of atmospheric aerosols. *Microchem. J.* 2021; 160B: 105736. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.105736>
19. Mecca D., Boanini C., Vaccaro V., Gallione D., Mastromatteo N., Clerico M. Spatial variation, temporal evolution, and source direction apportionment of PM_1 , $PM_{2,5}$, and PM_{10} : 3-year assessment in Turin (Po Valley). *Environ. Monit. Assess.* 2024; 196(1): 1251. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13446-9>
20. Ilci F., Li M., Germard J. Detailed physicochemical characterization of the ambient fine and ultrafine particulate mixture at a construction site. *Aerosol Sci. Eng.* 2021; 5: 344–56. <https://doi.org/10.1007/s41810-021-00108-3>
21. Krupnova T.G., Rakova O.V., Bondarenko K.A., Saifullin A.F., Popova D.A., Potgieter-Vermaak S., et al. Elemental composition of $PM_{2,5}$ and PM_{10} and health risks assessment in the industrial districts of Chelyabinsk, South Ural region, Russia. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2021; 18(23): 12354. <https://doi.org/10.3390/ijerph182312354>
22. Kumari S., Jain M.K., Elumalai S.P. Assessment of pollution and health risks of heavy metals in particulate matter and road dust along the road network of Dhanbad, India. *J. Health Pollut.* 2021; 11(29): 210305. <https://doi.org/10.5696/2156-9614-11.29.210305>
23. Silveira R.S., Correa S.M., Neto N.M. Possible influence of shipping emissions on metals in size-segregated particulate matter in Guanabara Bay (Rio de Janeiro, Brazil). *Environ. Monit. Assess.* 2022; 194(11): 828. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10517-7>
24. De Souza S.L.Q., Martins E.M., Correa S.M., da Silva J.L., de Castro R.R., de Souza Assed F. Determination of trace elements in the nanometer, ultrafine, fine, and coarse particulate matters in air areas affected by light vehicular emissions in the city of Rio de Janeiro. *Environ. Monit. Assess.* 2021; 193(2): 92. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08891-9>
25. Frydas I.S., Kermenidou M., Tsavos O., Salifoglou A., Sarigiannis D.A. Unraveling the blood transcriptome after real-life exposure of Wistar-rats to

- PM_{2.5}, PM₁ and water-soluble metals in the ambient air. *Toxicol. Rep.* 2020; 7: 1469–79. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2020.10.014>
26. Yang M., Zeng H.X., Wang X.F., Hakkarainen H., Leskinen A., Komppula M., et al. Sources, chemical components, and toxicological responses of size segregated urban air PM samples in high air pollution season in Guangzhou, China. *Sci. Total. Environ.* 2023; 865: 161092. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161092>
27. Fu J., Ji J., Luo L., Li X., Zhuang X., Ma Y., et al. Temporal and spatial distributions, source identification, and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} from 2016 to 2021 in Shenzhen, China. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2023; 30(47): 103788–800. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29686-0>
28. Gao P., Deng F., Chen W.S., Zhong Y.J., Cai X.L., Ma W.M., et al. Health risk assessment of inhalation exposure to airborne particle-bound nitrated polycyclic aromatic hydrocarbons in urban and suburban areas of South China. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2022; 19(23): 15536. <https://doi.org/10.3390/ijerph192315536>
29. Jahedi F., Rad H.D., Goudarzi G., Birgani Y.T., Babaei A.A., Angali K.A. Polycyclic aromatic hydrocarbons in PM₁, PM_{2.5} and PM₁₀ atmospheric particles: identification, sources, temporal and spatial variations. *J. Environ. Health Sci. Eng.* 2021; 19(1): 851–66. <https://doi.org/10.1007/s40201-021-00652-7>
30. Jiang Q., Zhang X., Liu T., Shi J., Gu X., Xiao J., et al. Assessment of the temporal variability and health risk of atmospheric particle-phase polycyclic aromatic hydrocarbons in a northeastern city in China. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2022; 29(43): 64536–46. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20378-9>
31. Ju S., Lim L., Jiao H.Y., Choi S., Jun J.Y., Ki Y.J., et al. Oxygenated polycyclic aromatic hydrocarbons from ambient particulate matter induce electrophysiological instability in cardiomyocytes. *Part. Fibre Toxicol.* 2020; 17(1): 25. <https://doi.org/10.1186/s12989-020-00351-5>
32. Pietrogrande M.C., Bacco D., Demaria G., Russo M., Scotti F., Trentini A. Polycyclic aromatic hydrocarbons and their oxygenated derivatives in urban aerosol: levels, chemical profiles, and contribution to PM_{2.5} oxidative potential. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2022; 29(36): 54391–406. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16858-z>
33. Rudziński K.J., Sarang K., Nestorowicz K., Asztemborska M., Żyfka-Zagrodziska E., Skotak K., et al. Winter source of PM_{2.5} pollution in Podkowa Lesna, a Central-European Garden town (Mazovia, Poland). *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2022; 29(56): 84504–20. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21673-1>
34. Gao X., Wang Z., Sun X., Gao W., Jiang W., Wang X., et al. Characteristics, source apportionment and health risks of indoor and outdoor fine particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons in Jinan, North China. *PeerJ.* 2024; 12: e18553. <https://doi.org/10.7717/peerj.18553>
35. Ou J., Zheng L., Tang Q., Liu M., Zhang S. Source analysis of heavy metals in atmospheric particulate matter in a mining city. *Environ. Geochem. Health.* 2021; 44(3): 979–91. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00983-2>
36. Wang Y., Li F., Liu Y., Deng X., Yu H., Li J., et al. Risk assessment and source analysis of atmospheric heavy metals exposure in spring of Tianjin, China. *Aerosol Sci. Eng.* 2022; 7: 87–95. <https://doi.org/10.1007/s41810-022-00164-3>
37. Saxena P., Kumar A., Mahanta S.S.K., Sreekanth B., Patel D.K., Kumari A., et al. Chemical characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} combusted firecracker particles during Diwali of Lucknow City, India: air-quality deterioration and health implications. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2022; 29(58): 88269–87. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21906-3>
38. Tehrani M.W., Fortner E.C., Robinson E.S., Chiger A.A., Sheu R., Werden B.S., et al. Characterizing metals in particulate pollution in communities at the fence-line of heavy industry: combining mobile monitoring and size-resolved filter measurements. *Environ. Sci. Process. Impacts.* 2023; 25(9): 1491–504. <https://doi.org/10.1039/d3em00142c>
39. Tian Y., Jia B., Zhao P., Song D., Huang F., Feng Y. Size distribution, meteorological influence and uncertainty for source-specific risks: PM_{2.5} and PM₁₀-bound PAHs and heavy metals in a Chinese megacity during 2011–2021. *Environ. Pollut.* 2022; 312: 120004. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120004>
40. Wu Y., Li G., An T. Toxic metals in particulate matter and health risks in an e-waste dismantling park and its surrounding areas: analysis of three PM size groups. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2022; 19(22): 15383. <https://doi.org/10.3390/ijerph192215383>
41. Yu Q., Ding X., He Q., Yang W., Zhu M., Li S., et al. Nationwide increase of polycyclic aromatic hydrocarbons in ultrafine particles during winter over China revealed by size-segregated measurements. *Atmos. Chem. Phys.* 2020; 20(23): 14581–95. <https://doi.org/10.5194/acp-20-14581-2020>
42. Rodriguez-Maroto J.J., García-Alonso S., Rojas E., Sanz D., Ibarra I., Pérez-Pastor R., et al. Characterization of PAHs bound to ambient ultrafine particles around runways at an international airport. *Chemosphere.* 2024; 352: 141440. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141440>

Сведения об авторах

- Нурисламова Татьяна Валентиновна**, доктор биол. наук, зав. отд. химико-аналитических методов исследования ФБУН «ФНЦ МПТ УРЗН», 614045, Пермь, Россия. E-mail: nurtat@fcrisk.ru
- Зорина Анастасия Сергеевна**, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. – зав. лаб. методов анализа наноматериалов и мелкодисперсных частиц ФБУН «ФНЦ МПТ УРЗН», 614045, Пермь, Россия. E-mail: zorina@fcrisk.ru
- Зайцева Нина Владимировна**, доктор мед. наук, профессор, академик РАН, научный руководитель ФБУН «ФНЦ МПТ УРЗН», 614045, Пермь, Россия. E-mail: znv@fcrisk.ru
- Крылов Алексей Александрович**, мл. науч. сотр. лаб. методов анализа наноматериалов и мелкодисперсных частиц ФБУН «ФНЦ МПТ УРЗН», 614045, Пермь, Россия. E-mail: krylov@fcrisk.ru
- Зверева Лада Александровна**, вед. химик лаб. методов анализа наноматериалов и мелкодисперсных частиц ФБУН «ФНЦ МПТ УРЗН», 614045, Пермь, Россия. E-mail: zvereva@fcrisk.ru

Information about author

- Tatyana V. Nurislamova**, DSc (Biology), head, Department of chemical analytical research methods, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Technologies for Public Health Risk Management, Perm, 614045, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-2344-3037> E-mail: nurtat@fcrisk.ru
- Anastasia S. Zorina**, PhD (Biology), senior researcher, head, Laboratory of methods of analysis of nanomaterials and fine particles, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Technologies for Public Health Risk Management, Perm, 614045, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-4276-9921> E-mail: zorina@fcrisk.ru
- Nina V. Zaitseva**, DSc (Medicine), professor, academician of the RAS, Scientific Director of the Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-2356-1145> E-mail: znv@fcrisk.ru
- Aleksey A. Krylov**, junior researcher, Laboratory of methods of analysis of nanomaterials and fine particles, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Technologies for Public Health Risk Management, Perm, 614045, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8931-0539> E-mail: kkrylov@fcrisk.ru
- Lada A. Zvereva**, leading chemist, Laboratory of methods of analysis of nanomaterials and fine particles, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Technologies for Public Health Risk Management, Perm, 614045, Russian Federation, E-mail: zvereva@fcrisk.ru