

УДК: 613.15:543.42

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ С ИНДУКТИВНО СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМОЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА МЕТАЛЛАМИ НОВЫХ ГОРОДОВ-УЧАСТНИКОВ ФЕДЕРАЛЬНОГО ПРОЕКТА «ЧИСТЫЙ ВОЗДУХ»

Родионов А.С.¹, Егорова М.В.^{1,2}, Горячева Л.В.¹, Федорова Н.Е.¹, Богданова Ю.Ю.¹

¹ ФБУН «Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана»
Роспотребнадзор, Мытищи, Россия

² ФГБОУ ДПО Российская медицинская академия непрерывного
профессионального образования Минздрава России, Москва, Россия

Основным «инструментом» борьбы с одной из глобальных проблем современности – загрязнением атмосферного воздуха в Российской Федерации – является действующий с 2018 года Федеральный проект «Чистый воздух», в рамках реализации которого проводятся масштабные исследования и практические мероприятия, нацеленные на сокращение выбросов в воздушную среду в результате усовершенствования существующей системы контроля качества ее состояния, подразумевающие автоматизацию процесса сбора и обработки данных, повышение оперативности представления результатов наблюдений, а также актуализацию нормативно-методической базы.

В качестве контаминантов атмосферы отдельное внимание уделяется тяжелым металлам, ввиду их высокой токсичности, канцерогенности, особенностям биоаккумуляции и транспорта по пищевым цепям.

В статье представлены результаты апробации разработанного авторами метода для оценки загрязнения атмосферного воздуха металлами в городах Ростов-на-Дону и Новочеркасск, включенных с 2023 года в список участников Федерального проекта «Чистый воздух».

Целью исследования являлось проведение количественной оценки содержания металлов, в том числе тяжелых, в атмосферном воздухе городов Ростов-на-Дону (2 мониторинговые точки) и Новочеркасск (1 мониторинговая точка).

Материалы и методы. Для измерения концентрации металлических загрязнителей воздух аспирировали на фильтры из целлюлозы с диаметром 37 мм и пористостью 0,8 мкм (Millipore-MF). Деструкцию фильтра проводили методом микроволновой минерализации с применением азотной кислоты. Анализ содержания металлов выполнялся на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой Agilent 7800

ICP-MS. Все процедуры выполняли в чистой комнате для исключения привнесения загрязнений из внешней среды помещения.

Результаты. В результате проведенного исследования не отмечено превышений ПДК (м.р). выявленных элементов на маршрутных точках городов Ростов-на-Дону и Новочеркасск. Результаты исследования показали наличие в атмосферном воздухе Ростова-на-Дону следовых количеств натрия, алюминия, кальция, железа, бария, бора, индия, магния, марганца, стронция. Отмечено десятикратное увеличение содержания цинка в 2023 году относительно данных мониторинговых наблюдений ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС» в 2022 г., при этом превышения гигиенического норматива не зафиксировано. В атмосферном воздухе Новочеркаска идентифицировано присутствие алюминия ($0,0004 \pm 0,0001$ мг/м³), железа ($0,0017 \pm 0,004$ мг/м³) и марганца ($0,0000006 \pm 0,0000001$ мг/м³). Разработанный метод продемонстрировал высокую эффективность определения следовых количеств металлов при существенном сокращении времени пробоотбора.

Ключевые слова: аэрозольные фильтры; атмосферный воздух; тяжелые металлы; микроволновая минерализация; масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой.

Для цитирования: Родионов А.С., Егорова М.В., Горячева Л.В., Федорова Н.Е., Богданова Ю.Ю. Применение метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой для оценки загрязнения атмосферного воздуха металлами новых городов-участников Федерального проекта «Чистый воздух». Медицина труда и экология человека. 2024; 4: 54-68.

Для корреспонденции: Родионов Александр Сергеевич, младший научный сотрудник отдела аналитических методов контроля ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, e-mail: rodionov.as@fncg.ru.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

DOI: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2024-10404>

APPLICATION OF THE INDUCTIVELY COUPLED PLASMA MASS SPECTROMETRY METHOD FOR ASSESSMENT OF ATMOSPHERIC AIR POLLUTION BY METALS IN NEW CITIES PARTICIPATING IN THE FEDERAL PROJECT «CLEAN AIR»

Rodionov A.S.¹, Egorova M.V.^{1,2}, Goryacheva L.V.¹, Fedorova N.E.¹, Bogdanova Y.Y.¹

¹ FBUZ «Federal Scientific Center for Hygiene named after F.F. Erisman» of Rospotrebnadzor, Mytishchi, Russia

² FSBEI DPO Russian Medical Academy of Continuous Professional Education of the Ministry of Health of Russia, Moscow, Russia

The main «tool» of air pollution control in the Russian Federation is the Federal Project «Clean Air», which has been acting since 2018. Within the framework of its implementation for reducing emissions of harmful substances into the atmosphere large-scale experiments are being carried out. These experiments included measures to improve the existing system for monitoring atmosphere condition, implying automation of the process of collecting and processing data, increasing the efficiency of presenting observation results, as well as updating the regulatory and methodological framework.

The study pays special attention to heavy metals as atmospheric contaminants, due to their toxicity, carcinogenicity, peculiarities of bioaccumulation and transport through food chains.

This study examined the state of atmospheric air in the cities where the level of pollution was assessed as «high» by an analytical method which combined inductively coupled plasma mass spectrometry with sampling on Millipore-MF filters, developed by the Erisman Federal Research Center of Hygiene.

The aim of the research was to quantitatively investigate the content of heavy metals in the ambient air the cities of Rostov-on-Don and Novocherkassk, included in the list of participants of the Federal Project «Clean Air» from 2023.

Materials and methods. Sampling of atmospheric air was carried out on Millipore-MF filters made of mixed cellulose ethers, 37 mm in diameter, with a pore size of 0.8 µm. The filters were converted into solution by microwave mineralisation at elevated pressure in a closed reactor-type system. Quantitative analysis of heavy metal content was performed by inductively coupled plasma mass spectrometry using an Agilent 7800 ICP-MS spectrometer. All stages of sample preparation, including opening of «sample cassettes», sample dilution procedures and preparation of standard solutions, were carried out in a «clean workplace».

Results. The study revealed no exceedances of maximum permissible concentrations (MPCs) for the detected elements at monitoring points in Rostov-on-Don and Novocherkassk. The research included a comparative analysis of metal content in the atmospheric air of major industrial centers in the Rostov region (Rostov-on-Don and Novocherkassk) between 2022 and 2023. The research methodology was based on monitoring data from the North Caucasus Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring using standardized sampling methods with AFA filters and research results from the Erisman Federal Research Center of Hygiene using Merck Millipore-MF filters. The results showed stable concentrations of iron and manganese in Rostov-on-Don's atmosphere, with a tenfold increase in zinc content in 2023 compared to 2022, however, no exceedances of established hygienic standards were recorded. In Novocherkassk's atmospheric air, the presence of aluminum (0.0004 ± 0.0001 mg/m³), iron (0.0017 ± 0.004 mg/m³), and manganese (0.0000006 ± 0.0000001 mg/m³) was identified. The developed method demonstrated high efficiency in determining trace amounts of metals while significantly reducing sampling time.

Keywords: aerosol filters; atmospheric air; heavy metals; microwave mineralization; inductively coupled plasma mass spectrometry.

For citation: Rodionov A.S., Egorova M.V., Goryacheva L.V., Fedorova N.E., Bogdanova Y.Y. Application of Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry for Assessing Air Pollution by Metals in New Cities Participating in the Federal Project «Clean Air». Occupational health and human ecology. 2024; 4: 54-68.

Correspondence: Rodionov Alexander Sergeevich, Junior researcher of an analytical control methods department of Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman; e-mail: rodionov.as@fncg.ru

Funding: The study had no financial support.

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

DOI: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2024-10404>.

Загрязнение атмосферного воздуха, являясь одной из глобальных проблем современности, наиболее выражено в странах, занимающих ведущее место в мировой экономике, характеризующихся форсированной индустриализацией. Согласно данным ВОЗ на ноябрь 2023 года, сочетанное воздействие загрязнения воздушной среды и загрязнения воздуха в жилых помещениях ежегодно приводит к 7 миллионам преждевременных смертей [1].

Термин «загрязнение» трактуется в п. 6.1 ГОСТ 30772-2001¹ как «любой агент, имеющий природное или техногенное происхождение (прежде всего, физический агент, химическое вещество и биологический вид - главным образом микроорганизмы), попадающий в окружающую среду или возникающий в ней в количествах, выходящих за рамки обычных предельных естественных колебаний или среднего долгосрочного природного фона, и негативно влияющий на качество окружающей природной среды и здоровье человека».

Загрязнение атмосферы представляет угрозу не только из-за непосредственного влияния загрязнителей на здоровье людей, но и из-за их потенциала изменять характеристики атмосферы, что, в свою очередь, может вызвать климатические изменения [2]. К тому же аккумуляция токсичных веществ в воздухе может оказывать опосредованное воздействие на водные объекты, почву и другие экосистемы [3].

Доказана взаимосвязь между двумя перечисленными глобальными кризисами: изменением климата, вызванным загрязнениями атмосферы, и эпидемией неинфекционных заболеваний (НИЗ). По данным ВОЗ [4], ежегодно от НИЗ умирает 41 миллион человек, что соответствует 74% всех смертей в мире, из них - 17 миллионов в возрасте до 70 лет, к причинам которых относят сердечно-сосудистые, раковые и хронические респираторные заболевания, диабет. Помимо того, климатические аномалии могут вызывать и социально-экономические последствия, например, продолжительные засухи вызывают снижение урожайности сельскохозяйственных культур, угрожая продовольственной безопасности [5].

Таким образом, наличие эффективной экологической политики становится первоочередным фактором для формирования высокого качества жизни и реализации территориальной модели устойчивого развития [6].

На территории Российской Федерации обеспечение экологической безопасности страны за счет сокращения выбросов вредных веществ в атмосферу реализуется в рамках Федерального проекта «Чистый воздух» Национального проекта «Экология» и Указа Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 г. № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года», направленных на достижение к 2030 году национальной цели «Комфортная и безопасная среда для жизни» [7]. С 1 сентября 2023 года на

¹ ГОСТ 30772-2001. Межгосударственный стандарт. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Термины и определения.

основании мониторинговых исследований Росгидромета в список участников включены еще 29 городов.

В процессе выполнения проекта особое внимание акцентируется не только на действиях по уменьшению выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, но также на улучшении текущей системы мониторинга состояния воздуха., подразумевающей автоматизацию процесса сбора и обработки данных, повышение оперативности представления результатов наблюдений, а также актуализацию нормативно-методической базы. При этом речь идет не только о совершенствовании способов интерпретации данных мониторинга, положенных в основу оценки риска [8], но и непосредственно о методах аналитического контроля вредных веществ.

Предметом отдельного обсуждения является количественное определение тяжелых металлов в воздухе, ввиду их высокой токсичности, канцерогенности отдельных элементов и способности проникать в организм человека по пищевым цепям [9].

Развитию методов аналитического контроля содержания тяжелых металлов в атмосферном воздухе посвящен ряд исследований [10, 11], в которых освещены способы снижения пределов количественного определения и повышения достоверности получаемых результатов за счет применения более «чистого» пробоотборного материала, свободного от фоновых загрязнений. В качестве наиболее подходящей пробоотборной среды предлагается использовать аэрозольные фильтры Millipore-MF, изготавливаемые из смешанных эфиров целлюлозы.

Методические подходы, подразумевающие использование описанного фильтроматериала, в совокупности с микроволновой минерализацией экспонированных фильтров, легли в основу соответствующих методических указаний [12], апробированных в городах-участниках Федерального проекта «Чистый воздух» - Липецк и Череповец [13, 14]. Показано, что применение предлагаемого метода позволяет получать сопоставимые результаты, ограничиваясь отбором существенно меньшего объема воздуха, и, соответственно, снизить временные затраты на отбор проб. Апробация разработанного метода была дополнена проведением сличительных испытаний с областными центрами ФБУЗ «ФЦГиЭ» Роспотребнадзора указанных городов, помогла подтвердить адекватность данных, получаемых на маршрутных постах Липецка и Череповца.

В результате всей совокупности мероприятий по уменьшению выбросов, включающих и совершенствование аналитических методик, согласно отчетным данным, удалось снизить уровень загрязнения в Липецке и Череповце с «повышенного» до «низкого» [15]. В целом на начало 2024 года количество городов с очень высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха снизилось с 8 (Братск, Красноярск, Магнитогорск, Нижний Тагил, Новокузнецк, Норильск, Челябинск, Чита) до 0.

Одними из крупнейших областных и промышленных центров среди новых участников Федерального проекта «Чистый воздух», отнесенных к зонам повышенного потенциала загрязнения атмосферы, ввиду большого количества машиностроительных и металлургических предприятий, являются города Ростов-на-Дону и Новочеркасск [16]. При этом, основываясь на данных мониторинга загрязнения атмосферного воздуха в режиме реального времени, индекс загрязнения атмосферы (AQI) находится в диапазоне от 40 (средний уровень загрязнения) до 140 (высокий уровень загрязнения) в обоих городах. К загрязнителям, по которым проводится оценка состояния воздуха в режиме онлайн, относятся озон, PM_{2,5}, PM₁₀, NO₂, SO₂, CO.

Помимо этого, данные, полученные при проведении мониторинговых исследований, проводимых ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС» в Ростове-на-Дону [17] по всем неорганическим загрязнителям, показывают превышение гигиенических нормативов для марганца (1,1 ПДК, среднегодовая концентрация), а общий уровень загрязнения воздуха оценивается как высокий (ИЗА5=11, СИ = 4,8, НП = 12,9%). В Новочеркасске данные по содержанию тяжелых металлов не представлены, однако общий уровень загрязнения воздуха оценивается как очень высокий (ИЗА5=18, СИ = 6,5, НП = 48,4%). Исходя из вышесказанного, указанные города представляют интерес для проведения дальнейших исследований атмосферного воздуха на содержание тяжелых металлов с применением ранее разработанного в ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» метода и сопоставления результатов с данными мониторинговых исследований, получаемыми организациями, контролирующими загрязнение атмосферы в период с 2018 по 2022 г.

Таким образом, **цель** настоящей работы состояла в оценке содержания металлов, в том числе тяжелых, в атмосферном воздухе городов Ростов-на-Дону (2 мониторинговые точки) и Новочеркасск (1 мониторинговая точка).

Данное исследование представляет интерес не только с точки зрения повышения актуальности и эффективности применяемых аналитических методик, но и для дополнительной оценки качества реализуемой в городах экологической политики.

Материалы и методы. Отборы проб атмосферного воздуха проводились в г. Ростов-на-Дону и г. Новочеркасск на трех маршрутных постах (передвижные мониторинговые точки), расположенных в зонах влияния выбросов: маршрутная точка №1 – г. Ростов-на-Дону, ул. Новаторов, 12А, маршрутная точка №2 – г. Ростов-на-Дону, ул. Страна Советов, 20-24, маршрутная точка №3 – Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Свободы, 3. На каждой маршрутной точке отбиралось по 2 пробы одновременно.

Аэрозоли металлов контролировали после их аспирации с использованием мониторов для контроля атмосферы производства Merck Millipore. Технические параметры используемых вспомогательных материалов характеризуются диаметром 37 мм и пористостью 0,8 мкм. Условия отбора выбраны согласно ГОСТ 17.2.3.01-86 «Охрана природы (ССОП). Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных пунктов»² и МУК 4.1.3773-22 [12]. Загрязнения фильтров при перевозке к месту анализа удалось избежать благодаря конструкционным особенностям используемых пробоотборных кассет.

После доставки образцов в лабораторию кассеты для отбора проб вскрывались для изъятия фильтров. Извлеченные фильтры немедленно перемещались в контейнеры, предназначенные для микроволнового разложения. Далее проводили минерализацию с 4 см³ азотной кислоты по специальной программе для обработки целлюлозных материалов. После завершения процесса для обесцвечивания растворов применяли пероксид водорода. Прозрачный минерализат переносился в пробирки и разбавлялся деионизированной водой до нужного объема.

Количественный анализ 22 элементов проводился с помощью масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой Agilent 7800 ICP-MS. Определяемые элементы включали Na, Mg, Al, K, Ca, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Ag, Sr, Ba, Tl, Pb, B, In, W и Bi.

Во избежание контаминации фильтров и используемых растворов из атмосферы лабораторного помещения хранение, вскрытие, разбавление проб, приготовление стандартных растворов, помещение в сосуды для минерализации проводилось в комплексе «Чистое рабочее место» [18]. Для минерализации фильтров

² ГОСТ 17.2.3.01-86 «Охрана природы (ССОП). Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных пунктов».

использовались коммерческие реактивы квалификации ACS и деионизированная вода I класса чистоты по ГОСТ 52501-2005.

Для обработки полученных данных использовались математико-статистические инструменты, доступные в программе Microsoft Excel.

Результаты. Результаты элементного анализа атмосферного воздуха городов при отборе на фильтры Millipore MF представлены в таблице 1 в виде среднего из двух измерений с учетом относительной погрешности метода.

Таблица. Содержание металлов в атмосферном воздухе, мониторинговые точки № 1, 2, 3

Table. Metal Content in Ambient Air, Monitoring Points No. 1, 2, 3

Определяемые показатели	Результаты измерений/ испытаний, с учетом относительной погрешности метода, мг/м ³ ×10 ⁻³			ПДК ³ (м.р.), мг/м ³	Предел обнаружения, мг/м ³ ×10 ⁻³
	№1: г. Ростов-на-Дону, ул. Новаторов, 12 А	№2: г. Ростов-на-Дону, ул. Страна Советов, 20-24	№3: Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Свободы, 3.		
Натрий	0,58±0,15	Менее 0,1*	0,63±0,16	-	0,1
Магний	Менее 0,06*	0,10± 0,03	Менее 0,06*	-	0,06
Алюминий	1,0±0,3	0,45± 0,11	0,4±0,1	-	0,002
Калий	Менее 1	Менее 1	Менее 1*	-	1
Кальций	1,6±0,4	Менее 1	Менее 1*	0,03	1
Хром	Менее 0,1*	Менее 0,1	Менее 0,1*	-	0,1
Марганец	Менее 0,0005*	0,04± 0,01	0,0006±0,000 1	0,01	0,0005
Железо	1,1± 0,3	Менее 0,9*	1,7± 0,4	-	0,9

³ СанПин 1.2.3685-21. «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»

Продолжение таблицы.

Continuation of Table.

Определяемые показатели	Результаты измерений/ испытаний, с учетом относительной погрешности метода, мг/м ³ ×10 ⁻³			ПДК ⁴ (м.р.), мг/м ³	Предел обнаружения, мг/м ³ ×10 ⁻³
	№1: г. Ростов-на-Дону, ул. Новаторов, 12 А	№2: г. Ростов-на-Дону, ул. Страна Советов, 20-24	№3: Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Свободы, 3.		
Кобальт	Менее 0,0004*	Менее 0,0004*	Менее 0,0004*	-	0,0004
Никель	Менее 0,0007*	Менее 0,0007*	Менее 0,0007*	0,002	0,0007
Медь	Менее 0,03*	Менее 0,03*	Менее 0,03*	0,002	0,03
Цинк	Менее 0,5*	Менее 0,5*	Менее 0,5*	-	0,5
Кадмий	Менее 0,0006*	Менее 0,0006*	Менее 0,0006*	0,0003	0,0006
Серебро	0,0030± 0,0008	Менее 0,002*	0,0010± 0,0003	-	0,002
Стронций	0,020± 0,005	0,016±0,004	Менее 0,0003	-	0,0003
Барий	7,5±1,9	Менее 0,04*	0,5± 0,1	0,015	0,04
Таллий	н/о**	н/о**	н/о**	-	-
Свинец	Менее 0,01*	Менее 0,01*	Менее 0,01*	0,001	0,01
Бор	0,020± 0,005	-	-	-	-
Индий	0,20± 0,05	0,010±0,003	0,10± 0,02	-	-
Вольфрам	н/о**	н/о**	н/о**	-	-
Висмут	н/о**	н/о**	н/о**	-	-

* - Предел количественного определения металла в атмосферном воздухе

** - Не обнаружено (менее предела детектирования используемого оборудования)

Обсуждение. При анализе полученных результатов количественного определения металлов в атмосферном воздухе городов Ростов-на-Дону и Новочеркасск превышений ПДК _(м.р.) не обнаружено, что согласуется с опубликованными данными

⁴ СанПин 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»

[17], позволяющими проследить тенденцию к снижению загрязнения атмосферного воздуха в период с 2018 по 2022 годы.

В период 2022 – 2023 годов для анализа изменений в уровне загрязнения атмосферы использовались данные, сопоставленные с информацией из открытых источников, полученной в ходе мониторинговых исследований качества воздуха в Ростове-на-Дону и Новочеркасске.

Для оценки качества воздуха в Ростове-на-Дону были использованы результаты работы группы мониторинга загрязнения атмосферы комплексной лаборатории мониторинга окружающей среды ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС». В 2022 году данные были собраны на трех типах станций: городские фоновые (станция №55), промышленные в районах, находящихся под влиянием промышленных объектов (станция №52), и автомобильные, расположенные возле крупных дорог или в районах с высокой транспортной активностью (станция №51).

Отбор и количественный анализ проб атмосферного воздуха проводились в соответствии с нормами и рекомендациями РД.52.04.186-89⁵ после отбора на фильтры АФА.

Для прослеживания динамики загрязнения атмосферного воздуха в 2022 – 2023 г. значения, полученные в настоящем исследовании, сравнивали с данными из открытых источников, получаемыми при мониторинговых исследованиях качества атмосферного воздуха в городах Ростов-на-Дону и Новочеркасске.

При сопоставлении данных для Ростова-на-Дону, полученных в ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» и ФГБУ «Северо-Кавказского УГМС», отмечены близкие результаты по содержанию железа и марганца. Концентрация цинка, обнаруженная ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» в 2023 г., в 10 раз превышает показатели, представленные ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС» в 2022 г., однако оба значения намного ниже установленного норматива. Помимо указанных элементов, мониторинговые службы г. Ростов-на-Дону в 2022 году фиксировали в воздухе никель, хром, свинец и медь на уровнях выше пределов количественного определения используемого метода, но ниже установленных гигиенических нормативов. По результатам 2023 г., присутствие данных элементов в атмосферном воздухе не обнаружено.

Для определения основных загрязнителей атмосферного воздуха г. Новочеркасска выбраны данные по основным компонентам выбросов [19], в число которых входят

⁵ РД.52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы.

алюминий, железо, марганец, цинк, медь, никель, олово, свинец, пятиокись ванадия, хромовый ангидрид (доминируют медь, цинк, свинец). Однако, как видно из результатов проведенных нами исследований, в атмосферном воздухе выбранной мониторинговой точки отмечают присутствие только алюминия ($0,0004 \pm 0,0001$ мг/м³), железа ($0,0017 \pm 0,004$ мг/м³), марганца ($0,0000006 \pm 0,0000001$ мг/м³), остальные компоненты выбросов не обнаружены.

Результаты исследования свидетельствуют о возможности успешного применения разработанного метода для определения следовых количеств металлов в атмосферном воздухе. Существенным преимуществом предложенного подхода является значительное сокращение продолжительности пробоотбора. Данное обстоятельство имеет принципиальное значение, поскольку традиционные методики, направленные на достижение требуемых пределов количественного определения и минимизацию погрешности пробоотбора, предполагают отбор значительных объемов воздуха (1-2 м³), что затруднительно реализовать в рамках нормативных требований² к времени отбора проб при определении разовых концентраций. В дополнение к вышесказанному неоднократно отмечаемым преимуществом фильтров Millipore-MF, выражающимся в значительно меньшем загрязнении фильтроматериала по сравнению с используемыми на территории РФ фильтрами АФА, является значительное снижение пределов количественного определения метода.

Заключение. Проведены исследования состояния атмосферного воздуха в отношении содержания тяжелых металлов во включенных в список участников Федерального проекта «Чистый воздух» с 01.09.2023 г. городах Ростов-на-Дону и Новочеркасск с использованием разработанного в ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» метода, включающего отбор проб на фильтры Millipore-MF, последующую микроволновую минерализацию и определение методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой.

Полученные результаты показали отсутствие превышений предельно допустимых концентраций в воздушной среде обоих городов. По результатам аналитических исследований, в атмосфере г. Ростова-на-Дону зафиксированы следовые количества натрия, алюминия, кальция, железа, бария, бора, индия, магния, марганца, стронция, также установлено существенное (десятикратное) увеличение концентрации цинка в 2023 г. относительно предшествующего периода наблюдений, однако данные показатели не превысили предельно допустимой концентрации согласно действующим санитарно-гигиеническим нормативам.

Мониторинг атмосферного воздуха г. Новочеркаска позволил идентифицировать присутствие следующих металлов: Al ($0,0004 \pm 0,0001$ мг/м³), Fe ($0,0017 \pm 0,004$ мг/м³) и Mn ($0,0000006 \pm 0,0000001$ мг/м³).

Использование методических подходов с отбором на фильтры Millipore-MF в комбинации с высокочувствительным методом ИСП-МС позволило достичь низких пределов количественного определения анализируемых элементов и оптимизировать временные затраты при полном соответствии нормативным требованиям к процедурам отбора.

Список литературы:

1. WHO – Air Pollution [Электронный ресурс], 2024 [Дата обращения: 12.03.2024]. Доступно по: https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_2.
2. Макоско А.А., Матешева А.В. Загрязнение атмосферы и изменение климата. В Кн.: Загрязнение атмосферы и качество жизни населения в XXI веке: угрозы и перспективы. М.: Российская академия наук; 2020. с. 46 – 73.
3. Malathi R., Sellamuthu S., Arundhati R., Swetha R. Monitoring and analyzing the effect of heavy metals in air based on ecological and health risks in Coimbatore. IOP Conference series: Earth and Environmental Science. 2022; 1125(1):012002 : 1 – 11.
4. WHO – Climate change and noncommunicable diseases: connections. [Электронный ресурс], 2024 [Дата обращения: 12.03.2024]. Доступно по: <https://www.who.int/news/item/02-11-2023-climate-change-and-noncommunicable-diseases-connections>.
5. Макоско А.А., Матешева А.В. Повышение качества жизни населения в условиях загрязнения атмосферы и изменения климата на основе экологического риск-менеджмента. В Кн.: Загрязнение атмосферы и качество жизни населения в XXI веке: угрозы и перспективы. М.: Российская академия наук; 2020. с. 177 – 228.
6. Шпакова Р.Н. Региональные и иные проблемы разработки и реализации Федерального проекта «Чистый воздух». Модернизация России: приоритеты, проблемы, решения. 2021; 16., 1: 1129 – 1134.
7. Рекомендации Общественной палаты Российской Федерации по итогам круглого стола на тему «О расширении сроков реализации федерального проекта «Чистый воздух» [Электронный ресурс], 2022 [Дата обращения: 12.03.2024]. Доступно по: <https://files.oprf.ru/storage/documents/rek-chistiy-vozd-17102022.pdf>.
8. Т. А. Шашина, М. В. Егорова, А. В. Воронова. К уточнению оценки среднегодовых концентраций при мониторинговых исследованиях атмосферных загрязнений. Развивая вековые традиции, обеспечивая "Санитарный щит" страны: Материалы XIII Всероссийского съезда гигиенистов, токсикологов и санитарных врачей с международным участием, посвященного 100-летию основания Государственной санитарно-эпидемиологической службы России. 2022: 438-441.
9. Yaman M. Comprehensive comparison of trace metal concentrations in inhaled air samples. В кн.: Khare M. Редактор. Air pollution. Monitoring, modeling, health and control. China: Intech; 2012. с. 2 – 66.
10. Burtseva L.V., Golubeva N.I. Development of quality assurance methods of heavy metal measurements in the atmospheric air and precipitations in the integrated background monitoring system of Roshydromet. Monitoring systems of environment. 2019; 4: 20-26.
11. Родионов А.С., Егорова М.В. Проблематика определения низких концентраций тяжелых металлов в атмосферном воздухе при оценке риска здоровью населения. Современные проблемы эпидемиологии, микробиологии и гигиены: Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов Роспотребнадзора, Ростов-на-Дону. 2020: 231-234.

12. МУК 4.1.3773-22 «Измерение массовых концентраций алюминия, сурьмы, хрома, кобальта, меди, железа, свинца, кадмия, магния, марганца, никеля, цинка в атмосферном воздухе методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой». 2022
13. Егорова М.В., Коротков В.В., Родионов А.С., Григорьева Е.В., Гнездилова В.В. Сравнительная оценка качества аэрозольных фильтров для анализа загрязнений атмосферного воздуха. Здоровье населения и среда обитания - ЗНиСО. 2021; 29, 8: 33-38.
14. Родионов А.С., Егорова М.В., Федорова Н.Е. Апробация методических подходов определения тяжелых металлов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в атмосферном воздухе промышленного города. Медицина труда и экология человека. 2023; 3(35): 205-222.
15. Общественный совет при Министерстве природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Актуализация федерального проекта «Чистый воздух» Национального проекта «Экология». [Электронный ресурс], 2019 [Дата обращения: 12.03.2024]. Доступно по: http://www.prisp.ru/images/pdf/doklad_chistyi_vozduh_pdfio.pdf.
16. Морина В.А., Юрьева А.А. Мониторинг реализации Федерального проекта «Чистый воздух». Актуальные вопросы современной экономики. 2021; 10: 171 – 183.
17. Коркина Д., Кларк-Карская Ю., Иванова А., Захарова А, Кузин А., Гринштейн И. Чистое рабочее место – комплексное решение проблемы загрязнений проб при проведении следового элементного анализа. Аналитика. 2016; 2:58-68.
18. Правительство Ростовской области. Министерство природных ресурсов и экологии Ростовской области. Экологический вестник Дона: «О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2022 году» [Электронный ресурс], 2023 [Дата обращения: 12.03.2024]. Доступно по: <https://www.kalitvaland.ru/upload/iblock/1c3/5ubuta3rhrpjxj16ilxtdgobl7h85a.pdf?ysclid=ltsqrbhshy414453246>
19. Минкина Т. М., Назаренко О. Г., Мотузова Г. В. Групповой состав соединений тяжелых металлов в почвах агроценозов, загрязненных аэрозольными выбросами Новочеркасской ГРЭС. Агрохимия. 2011, № 6: 68-77.

References:

1. WHO – Air Pollution [Internet], 2024 [Cited 12/03/2024]. Available from: https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_2.
2. Makosko A.A., Matesheva A.V. Zagryazneniye atmosfery i izmeneniye klimata. In: Zagryazneniye atmosfery i kachestvo zhizni naseleniya v XXI veke: ugrozy i perspektivy. M.: Rossiyskaya akademiya nauk; 2020. p. 46 – 73. (In Russian).
3. Malathi R., Sellamuthu S., Arundhathi R., Swetha R. Monitoring and analyzing the effect of heavy metals in air based on ecological and health risks in Coimbatore. IOP Conference series: Earth and Environmental Science. 2022, 1125(1):012002 : 1 – 11.
4. WHO – Climate change and noncommunicable diseases: connections. [Internet], 2024 [Cited: 12/03/2024]. Available from: <https://www.who.int/news/item/02-11-2023-climate-change-and-noncommunicable-diseases-connections>. (In Russian).
5. Makosko A.A., Matesheva A.V. Povysheniye kachestva zhizni naseleniya v usloviyakh zagryazneniya atmosfery i izmeneniya klimata na osnove ekologicheskogo risk-menedzhmenta. In: Zagryazneniye atmosfery i kachestvo zhizni naseleniya v XXI veke: ugrozy i perspektivy. M.: Rossiyskaya akademiya nauk; 2020. p. 177 – 228. (In Russian).
6. Shpakova R.N. Regional'nyye i inyye problemy razrabotki i realizatsii Federal'nogo proyekta «Chistyy vozdukh». Modernizatsiya Rossii: priority, problemy, resheniya. 2021;16, 1: 1129 – 1134
7. Рекомендации Общественной палаты Российской Федерации по итогам круглого стола на тему «О расширении сроков реализации федерального проекта «Чистый воздух» [Internet], 2022 [Cited: 12/03/2024]. Available from: <https://files.oprf.ru/storage/documents/rek-chistiy-vozd-17102022.pdf>. (In Russian).
8. Т. А. Shashina, М. V. Egorova, А. V. Voronova. К уточнению отсенки среднегодovykh kontsentratsiy pri monitoringovykh issledovaniyakh atmosferykh zagryazneniy. Razvivaya vekovyye traditsii, obespechivaya

- «Sanitarnyy shchit» strany: Materialy XIII Vserossiyskogo zvezda gigiyenistov, toksikologov i sanitarnykh vrachey s mezhdunarodnym uchastiyem, posvyashchennogo 100-letiyu osnovaniya Gosudarstvennoy sanitarno-epidemiologicheskoy sluzhby Rossii. 2022: p. 438-441. (In Russian).
9. Yaman M. Comprehensive comparison of trace metal concentrations in inhaled air samples. In.: Khare M. Editor. Air pollution. Monitoring, modeling, health and control. China: Intech; 2012. p.2 – 66.
10. Burtseva L.V., Golubeva N.I. Development of quality assurance methods of heavy metal measurements in the atmospheric air and precipitations in the integrated background monitoring system of Roshydromet. Monitoring systems of environment. 2019; 4: p. 20-26.
11. Rodionov A.S., Egorova M.V. Problematika opredeleniya nizkikh kontsentratsiy tyazhelykh metallov v atmosfernom vozduke pri otsenke riska zdorov'yu naseleniya. Sovremennyye problemy epidemiologii, mikrobiologii i gigiyeny: Materialy XII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov Rospotrebnadzora, Rostov-na-Donu. 2020: p. 231-234 (In Russian).
12. MUK 4.1.3773-22 «Izmereniye massovykh kontsentratsiy alyuminiya, sur'my, khroma, kobal'ta, medi, zheleza, svintsa, kadmiya, magniya, margantsa, nikelya, tsinka v atmosfernom vozduke metodom mass-spektrometrii s induktivno-svyazannoy plazmoy». 2022 (In Russian).
13. Egorova M.V., Korotkov V.V., Rodionov A.S., Grigor'yeva Ye.V., Gnezdilova V.V. Sravnitel'naya otsenka kachestva aerol'nykh fil'trov dlya analiza zagryazneniy atmosfernogo vozdukh. Zdorov'ye naseleniya i sreda obitaniya - ZNiSO. 2021; 29, 8: p. 33-38 (In Russian).
14. Rodionov A.S., Egorova M.V., Fedorova N.Ye. Aprobatsiya metodicheskikh podkhodov opredeleniya tyazhelykh metallov metodom mass-spektrometrii s induktivno-svyazannoy plazmoy v atmosfernom vozduke promyshlennogo goroda. Meditsina truda i ekologiya cheloveka. 2023; 3(35): p. 205-222 (In Russian).
15. Obshchestvennyy sovet pri ministerstve prirodnnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii. Aktualizatsiya federal'nogo proyekta «Chisty y vozdukh» Natsional'nogo proyekta «Ekologiya. [Internet], 2019 [Cited: 12/03/2024]. Available from: http://www.prisp.ru/images/pdf/doklad_chisty_y_vozduh_pdfio.pdf. (In Russian).
16. Morina V.A., Yur'yeva A.A. Monitoring realizatsii federal'nogo proyekta «Chisty y vozdukh». Aktual'nyye voprosy sovremennoy ekonomiki. 2021; 10: p. 171 – 183. (In Russian).
17. Pravitel'stvo Rostovskoy oblasti. Ministerstvo prirodnnykh resursov i ekologii Rostovskoy oblasti. Ekologicheskyy vestnik Dona: «O sostoyanii okruzhayushchey sredy i prirodnnykh resursov Rostovskoy oblasti v 2022 godu» [Internet], 2023 [Cited: 12/03/2024]. Available from: <https://www.kalitvaland.ru/upload/iblock/1c3/5ubuta3rhrpjxj16ilxtdgobl7h85a.pdf?ysclid=Itsqrbhshy414453246> (In Russian).
18. Korkina D., Clark-Karskaya Yu., Ivanova A., Zakharova A, Kuzin A., Grinshtein I. Chistoye rabocheye mesto – kompleksnoye resheniye problemy zagryazneniy prob pri provedenii sledovogo elementnogo analiza. Analitika. 2016. 2:58-68. (In Russian).
19. Minkina T. M., Nazarenko O. G., Motuzova G. V. Group composition of heavy metal compounds in soils of agrocenoses contaminated with aerosol emissions from Novocherkassk State District Power Plant. Agrochemistry. 2011, No. 6: 68-77. (In Russian).

Поступила/Received: 15.10.2024

Принята в печать/Accepted: 18.11.2024