

Методы исследования атмосферного аэрозоля городской среды: средства измерений и верификация результатов

Е.А. Гуляев^{✉1,2}, А.О. Гусев^{2,3}, Ю.И. Маркелов¹, В.М. Гадельшин^{1,2*}

¹Институт промышленной экологии УрО РАН
620990, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20

²Физико-технологический институт УрФУ
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 21

³ООО «СИАМС»
620078, г. Екатеринбург, ул. Коминтерна, 16, офис 604

Поступила в редакцию 14.02.2023 г.;
после доработки 30.03.2023 г.;
принята к печати 15.04.2023 г.

Представлен подход, основанный на совокупности методов (статистических, микроскопических, верификационных) анализа данных, полученных с применением аэрозольных сенсоров, диффузионного аэрозольного спектрометра, прибора для отбора проб воздуха, а также оптического микроскопа в составе анализатора структуры твердых тел. Установлено, что такой подход позволяет выполнить комплексное исследование фракционного состава аэрозольных частиц и массовой концентрации аэрозоля $PM_{2.5}$. При этом дорогостоящее оборудование используется для проведения верификации средств измерения, относящихся к экономичному ценовому сегменту, и не требуется для непрерывного использования. Сопоставление результатов измерений использованными приборами продемонстрировало согласованный ход данных и высокий уровень коэффициента корреляции (значение R варьировалось от 0,92 до 0,98). Полученные результаты подтверждают возможность создания сети аэрозольного мониторинга для крупной городской агломерации при относительно небольших финансовых затратах.

Ключевые слова: атмосферный аэрозоль, частицы $PM_{2.5}$, массовая концентрация, фракционный состав, микроскопия; atmospheric aerosol, $PM_{2.5}$, mass concentration, size distribution, optical microscopy.

Введение

Атмосферный аэрозоль является одним из самых изменчивых компонентов атмосферы Земли. Аэрозольные частицы влияют на радиационный баланс и климат напрямую — рассеивая и поглощая солнечную радиацию, а также косвенно — изменяя микрофизические свойства облаков и влияя на процессы осадкообразования [1]. Фракционный состав атмосферного аэрозоля является одним из ключевых параметров, исследование которого позволяет установить степень этого влияния [2, 3]. Из-за малых размеров и масс аэрозоли могут переноситься ветром на значительные расстояния, что усиливает их негативное влияние на здоровье живых организмов. Наибольшую опасность для человека представляют частицы аэрозоля фракции $PM_{2.5}$, поскольку они могут поступать и абсорбироваться глубоко внутри органов дыхания [4, 5].

Сильная пространственная и временная изменчивость свойств атмосферного аэрозоля наиболее заметна в урбанизированных и промышленно развитых районах из-за большого числа его антропогенных источников. Поэтому научное сообщество уделяет повышенное внимание исследованию аэрозольного состава атмосферы в крупных городских агломерациях [6, 7]. Урбанизированные территории, города, мегаполисы играют важную роль в формировании регионального и глобального климата. Однако для понимания общей картины аэрозольного загрязнения городской территории необходима развитая сеть мониторинга, создание которой зачастую сопряжено с рядом объективных трудностей. В частности, необходимым условием является наличие соответствующей приборной базы. Широкий диапазон размеров и массовых концентраций аэрозольных микрочастиц при циклических измерениях практически невозможно охватить с помощью какого-то одного прибора [8]. Поэтому для фиксации особенностей изучаемых частиц нужна синергия нескольких измерительных приборов и методов исследования [9]. При этом данные, полученные с помощью приборов, устройство и принцип действия которых основан на различных физических параметрах, необходимо сравнивать между собой для получения

* Евгений Александрович Гуляев (kapterka111@gmail.com, gulyaev@ecko.uran.ru); Александр Олегович Гусев (xpbim3@gmail.com); Юрий Иванович Маркелов (markelovgm@gmail.com); Вадим Маратович Гадельшин (gadelshinvm@mail.ru).

согласованных результатов, а также минимизации неопределенности измеряемой величины.

В рамках совместного проекта Института промышленной экологии УрО РАН и Физико-технологического института УрФУ планируется развернуть сеть мониторинга загрязнения воздуха на Среднем Урале для наблюдения за содержанием микрочастиц в атмосфере с помощью недорогих аэрозольных сенсоров, а также исследования фракционного и химического составов образцов аэрозоля. Концентрация атмосферного аэрозоля будет измеряться непрерывно, тогда как отбор аэрозольных микрочастиц целесообразно выполнять на ежемесячной или еженедельной основе. При таком комплексном подходе можно будет определить некоторый «базовый» уровень концентрации, фракционного и химического составов атмосферного аэрозоля, свойственный каждому сезону в выбранной точке мониторинга. При обнаружении существенных отклонений этих характеристик (концентрация, распределение по размерам) от «базового» уровня можно будет говорить о возникновении аномального события (смог, лесные пожары, промышленные техногенные выбросы и др.), которое следует тщательным образом проанализировать вплоть до изучения строения и химического состава отдельных аэрозольных микрочастиц с помощью масс-спектрометрии вторичных ионов [10], что для некоторых событий даст возможность прояснить их причины и вероятные последствия.

Для подтверждения адекватности применяемых методов по исследованию массовой концентрации и спектра размеров аэрозоля в период с 5 по 9 апреля 2022 г. проведен тестовый эксперимент. Выполнены параллельные измерения концентрации аэрозоля с помощью миниатюрных сенсоров Panasonic PM_{2.5} и диффузионного аэрозольного спектрометра (ДАС 2702-М), а также осуществлен пробоотбор образцов микрочастиц аспирационным методом. Короткие временные рамки эксперимента обусловлены отсутствием постоянного доступа к ДАС 2702-М, который на долгосрочной основе задейст-

вован в других исследованиях. Несмотря на удовлетворительную погрешность измерений и высокую воспроизводимость результатов отдельных сенсоров [11], они требуют периодической интеркалибровки с более точным прибором для проведения корректных и согласованных измерений. ДАС — отечественный аналог такого рода оптических счетчиков частиц зарубежного производства как по техническим характеристикам, так и по стоимости и мог бы быть использован в качестве «эталонного» прибора для интеркалибровки.

Цель настоящей работы — апробация подхода, основанного на совокупности методов анализа фракционного состава атмосферного аэрозоля и массовой концентрации аэрозоля PM_{2.5}, а также проведение верификации недорогих средств измерения с помощью дорогостоящего оборудования.

Материалы и методы

Исследование проводилось на территории Института промышленной экологии УрО РАН г. Екатеринбурга (56,85° с.ш.; 60,65° в.д.; 278 м н. у. м.); измерение концентрации и пробоотбор аэрозольных микрочастиц велись на высоте 10 м над поверхностью земли.

Екатеринбург является административным центром Уральского федерального округа и одним из крупнейших городов Российской Федерации с развитой транспортной и промышленной инфраструктурой [12], существенно влияющей на уровень загрязнения атмосферы в региональном масштабе. Измерительный комплекс располагается в 4 км к северо-востоку от центра города. Застройка данного района в основном представлена малоэтажными зданиями.

В исследовании были задействованы аэрозольные оптические сенсоры Panasonic PM_{2.5}, диффузионный аэрозольный спектрометр ДАС 2702-М, прибор для отбора проб воздуха ПА-300М-2, а также анализатор структуры твердых тел SIAMS 800 на базе оптического микроскопа Olympus BX-53 (рис. 1).

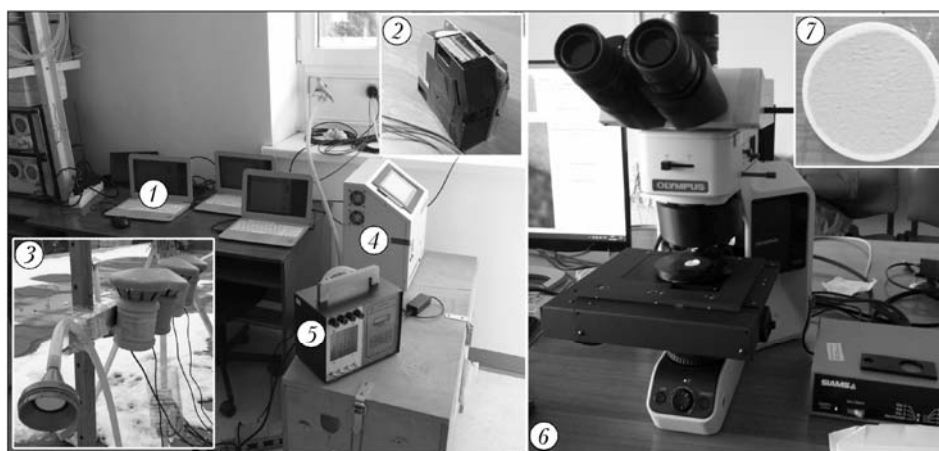


Рис. 1. Измерительно-исследовательский комплекс для анализа концентрации и фракционного состава атмосферного аэрозоля: ПК для регистрации данных (1); аэрозольный сенсор Panasonic PM_{2.5} (2, 3); спектрометр ДАС 2702-М (4); аспиратор ПА-300М-2 (5); анализатор структуры твердых тел на основе оптического микроскопа Olympus BX-53 (6); фильтр Whatman EPM 2000 с отобранной пробой атмосферного аэрозоля (7)

Аэрозольный сенсор Panasonic PM_{2,5} (2) предназначен для регистрации частиц диаметром от 0,3 до 2,5 мкм в диапазоне концентрации 0–300 мкг/м³ за счет рассеяния света, излучаемого красным светодиодом. Для защиты от осадков прибор помещен в полипропиленовый корпус (3). Сенсор не имеет активной прокачки, поток аэрозольных частиц формируется за счет создания нагревателем, расположенным внутри корпуса, постоянного температурного градиента [11]. Данные регистрируются с помощью ПК (1), подключенного к сенсору посредством USB-кабеля, с интервалом один раз в 10 с.

Диффузионный аэрозольный спектрометр ДАС 2702-М (4) предназначен для автоматизированного контроля концентрации и спектра размеров аэрозольных частиц. Работа данной модели прибора возможна в трех режимах:

- режим спектрометра с диффузионной батареей (диапазон частиц от 0,005 до 0,2 мкм);
- субмикронного счетчика без диффузионной батареи (от 0,2 до 10 мкм);
- счетчика ядер конденсации (от 0,005 до 10 мкм).

В настоящем исследовании использовался режим субмикронного счетчика. Принцип работы спектрометра в этом режиме основан на измерении оптического излучения, рассеянного аэрозольными частицами. Рассеянное частицами излучение регистрируется фотодиодным детектором. Интенсивность света пропорциональна размеру аэрозольных частиц, а количество импульсов определяет их концентрацию [13]. Более подробное описание принципа работы ДАС 2702-М представлено в руководстве по эксплуатации [14], а метод его калибровки аналогичен методу [15]. Описываемая модель прибора оснащена миниатюрным ПК, стационарно установленным на лицевой панели и работающим на операционной системе WINDOWS. Параметры аэрозольных частиц регистрировались и автоматически сохранялись с периодичностью примерно раз в минуту. При обработке результатов измерений полученные с помощью сенсоров и спектрометра данные о концентрации аэрозоля PM_{2,5} синхронизировались по времени и усреднялись с временным разрешением 2 мин для дальнейшего анализа.

Образцы атмосферного аэрозоля были собраны с помощью аспиратора ПА-300М-2 (5), предназначенного для отбора проб воздуха (пыль, аэрозоли, газы) через фильтры и имеющего шесть каналов пробоотбора [16]. Отбор осуществлялся через канал с расходом воздуха 60–90 л/мин на стекловолоконные фильтры Whatman EPM 2000 (7) (диаметр 47 мм; эффективность удержания частиц размером более 0,3 мкм – 99,95%). Было проведено две серии испытаний, состоящие из восьми и четырех циклов отбора соответственно (время отбора за цикл 330 мин; общее время каждого цикла 360 мин). После пробоотбора фильтры запечатывались в бумажный конверт и хранились при комнатной температуре без прямого воздействия света. В дальнейшем эти фильтры использовались для

определения размеров микрочастиц с помощью оптического микроскопа.

Анализатор структуры твердых тел SIAMS 800 на основе оптического микроскопа прямого действия Olympus BX-53 (6) оборудован полной системой моторизации предметного столика SIAMS Stable (по трем осям XYZ) и револьверной головки на шесть объективов [17]. Для фиксации изображения микроскоп оснащен цифровой камерой 6 Мп и подключен к ПК с программным обеспечением SIAMS 800.

Для съемки фильтр помещался на горизонтатор-образцедержатель столика микроскопа. В центре фильтра выбирался репрезентативный участок (участок в центре фильтра, не подверженный механическим повреждениям, которые могли произойти в процессе извлечения фильтра после пробоотбора либо при транспортировке к месту проведения съемки), с поверхности которого осуществлялась панорамная съемка изображения объективами 10× (для серии из четырех циклов) и 20× (для серии из восьми циклов). Совокупное увеличение в окулярах микроскопа составляло 100× и 200× соответственно. При увеличении 100× площадь поля, видимая цифровой камерой, ~ 1,25 мм², а итоговая площадь отснятой поверхности ~ 100 мм². При увеличении 200× рассмотренные аддитивные характеристики меньше: ~ 0,3 и ~ 6,25 мм². Итоговые площади отснятых поверхностей определялись из условия одинакового времени съемки при каждом увеличении, поскольку для получения изображения с увеличением 200× той же площади требуется больше времени.

Поверхность фильтров Whatman EPM 2000 представляет собой сложную структуру, образованную хаотически переплетающимися волокнами фильтрующего материала. Поэтому для получения итогового изображения с большей глубиной резкости был использован режим Z-стекинга, который осуществлялся на глубину 500 мкм с шагом 20 мкм. Итоговое изображение загружалось в ПО SIAMS 800 для последующего анализа видимых объектов.

На рис. 2 представлен фрагмент изображения, полученного с помощью оптического микроскопа. На фоне светлой волокнистой структуры фильтра легко обнаруживаются микрочастицы аэрозоля – темные объекты с относительно резкими границами. Это позволило провести пороговую сегментацию для отделения предполагаемых объектов (микрочастиц) от фона (фильтра). Порог сегментации подбирался исходя из условия наиболее полного выделения темных участков без видимых артефактов захвата ложных областей.

Анализ размеров обнаруженных объектов велся с помощью ПО SIAMS 800 в автоматическом режиме. Были посчитаны распределения таких характеристик, как «средняя проекция» и «диаметр эквивалентного круга» для всех сегментированных частиц загрязнения. Под средней проекцией понимается среднее арифметическое минимальной и максимальной проекций, которые, в свою очередь, являются размерными характеристиками частицы при ее повороте в плоском поле. Диаметр эквивалентного

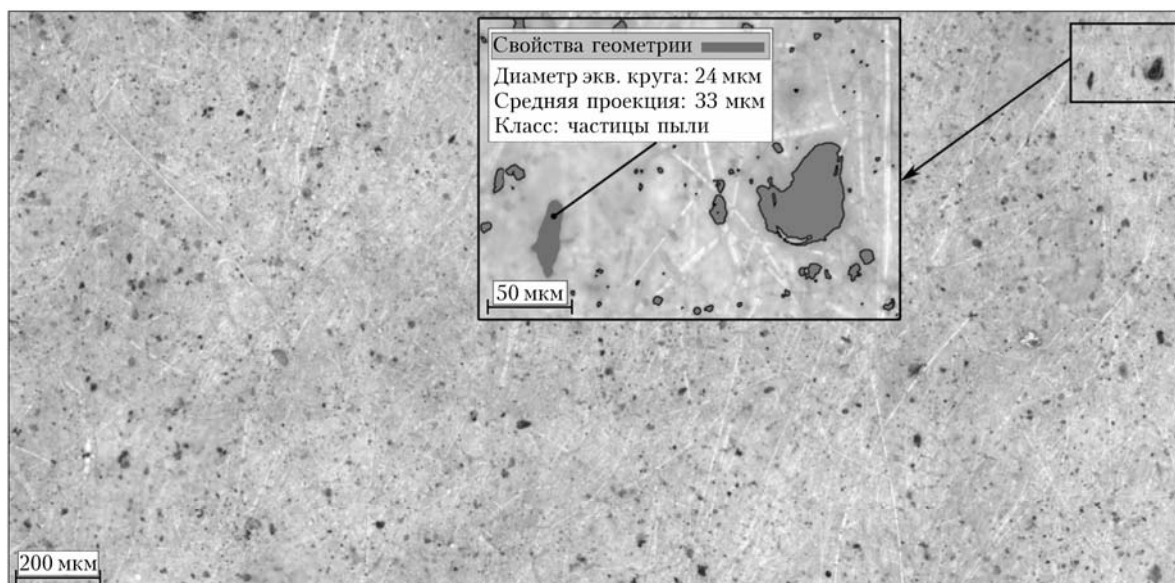


Рис. 2. Панорама участка поверхности фильтра, полученная с помощью микроскопа (на вставке — фрагмент с наложенными сегментационными масками)

круга — это диаметр окружности, которая имеет ту же площадь, что и исследуемая частица. При дальнейшем анализе фракционного состава атмосферного аэрозоля использовался именно этот термин, так как он дает более корректное представление о размерах реальных частиц. Полученные распределения сравнивались с данными ДАС 2702-М, которые соответствовали по времени пробоотбору на каждую из фильтрующих поверхностей. Так как при обработке данных методами микроскопии интервалы размерного диапазона могут быть заданы произвольно, то они выбирались в соответствии с интервалами диапазона работы ДАС 2702-М в режиме оптического счетчика: 0,5–1,0; 1,0–2,0; 2,0–2,5; 2,5–3,0; 3,0–5,0; 5,0–7,0 и 7,0–10,0 мкм.

Результаты и обсуждение

В эксперименте изначально были задействованы четыре сенсора Panasonic PM_{2,5}, однако в работе рассматриваются данные, полученные при помощи двух из них (сенсор № 1 и сенсор № 2). Выбор сенсоров произволен, так как все они демонстрируют малую дисперсию измеряемой концентрации. Для оценки сходимости результатов измерений были построены временные вариации концентрации PM_{2,5}, измеренной с помощью аэрозольных сенсоров и диффузионного спектрометра (рис. 3, а). Наблюдается согласованный ход концентрации PM_{2,5}, однако результаты, полученные с помощью ДАС 2702-М, имеют более высокие значения, чем показатели сенсоров. Следует отметить, что спектрометр более чувствителен к коротким всплескам колебаний концентрации аэрозоля. Это подтверждается наличием пиковых значений на графике. Полученный эффект объясняется отсутствием в датчиках Panasonic PM_{2,5} активной прокачки воздуха через измерительную ячейку, а также особенностями конвективного переноса, связанными с наличием защитного корпуса.

Для рассмотренного периода наблюдений можно выделить две области значений: с низкой — до 10 мкг/м³ (85% значений от общего набора данных) и с умеренной концентрацией > 10 мкг/м³ (15% значений). Медианные отклонения измеренных значений сенсоров от значений спектрометра для первой области составили 1,15 мкг/м³ (сенсор № 1) и 1,00 мкг/м³ (сенсор № 2). Для второй области медианные отклонения возросли до 2,01 мкг/м³ (сенсор № 1) и 2,21 мкг/м³ (сенсор № 2). Медианные отклонения значений, полученных с помощью сенсоров (при сравнении сенсоров между собой), составляют: 0,42 мкг/м³ для области с низкими значениями (до 10 мкг/м³) и 0,83 для области с умеренными значениями (> 10 мкг/м³).

Диаграммы рассеяния демонстрируют высокий уровень корреляции между датчиками и спектрометром (рис. 3, б). Угол наклона линии регрессии составляет 43,68° (для сенсора № 1) и 46,68° (для сенсора № 2). Коэффициент корреляции между двумя сенсорами $R = 0,98$ (при угле наклона линии регрессии 41,37°), что хорошо согласуется с исследованиями аналогичных по принципу действия и по цене датчиков [18, 19]. Для оценки значимости различий результатов измерений двух сенсоров был использован t -критерий Стьюдента. Средние концентрации за исследуемый период для сенсоров составляют 4,09 и 4,02 мкг/м³ с дисперсиями 13,18 и 10,72 мкг/м³ соответственно (количество измерений для каждого из датчиков $n = 3104$). Эмпирическое значение t -критерия $t_{\text{эмп}} = 0,72$ меньше критического $t_{\text{кр}} = 1,96$ для данных выборок, что свидетельствует об отсутствии статистически значимых различий между сенсорами.

Так как сенсоры Panasonic PM_{2,5} работают только в одном размерном диапазоне, фракционный состав аэрозоля в точке мониторинга исследовался программными методами анализа поверхности фильтров, использованных в пробоотборе.

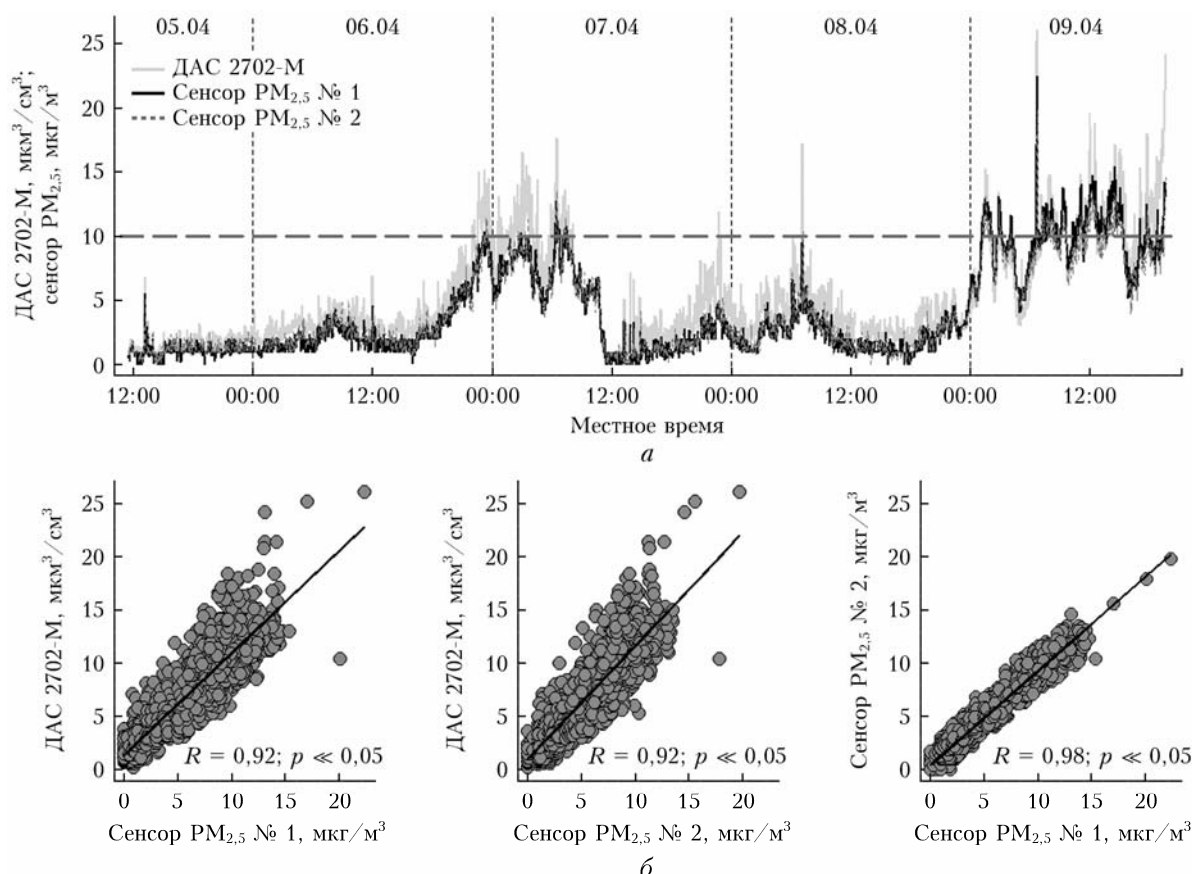


Рис. 3. Временные ряды (а) и диаграммы рассеяния (б) концентрации $PM_{2.5}$, измеренной с помощью сенсоров и ДАС 2702-М в приземной атмосфере Екатеринбурга с 5 по 9.04.2022 г. (p – уровень значимости)

На рис. 4 представлены гистограммы распределения фракционного состава атмосферного аэрозоля на основании данных, полученных с помощью спектрометра и методов плоскопольной микроско-

пии. Серии измерений представляют собой два различных временных интервала (как по хронологии, так и по продолжительности), которые соответствуют отбору проб на две фильтрующие поверхности

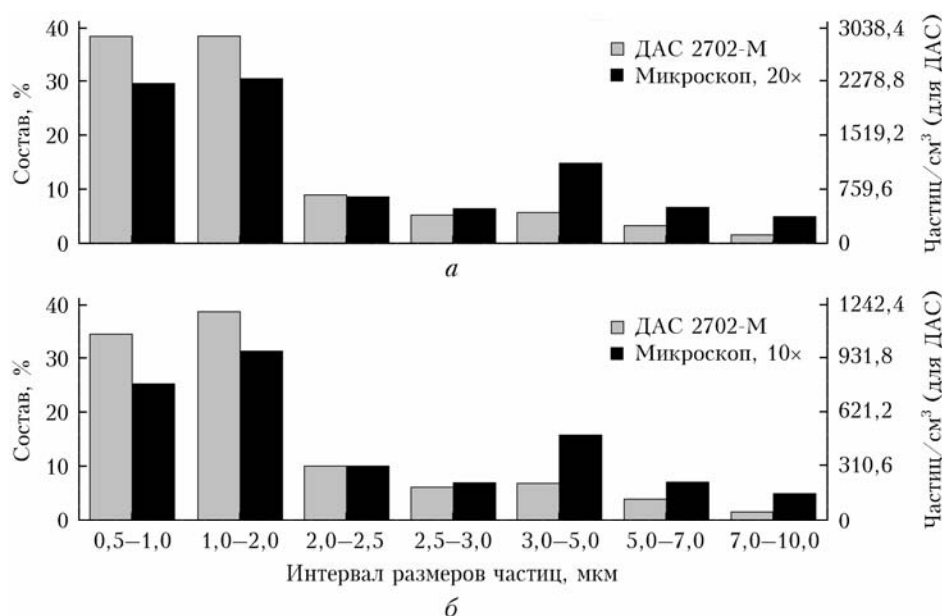


Рис. 4. Сравнение фракционного состава аэрозольных частиц по данным спектрометра и микроскопа: а – серия измерений № 1; б – серия измерений № 2

(см. Материалы и методы). Для серии измерений № 1 микроскопический анализ проводился с использованием объектива с увеличением 20 $\times$, для серии № 2 — 10 $\times$. Выбор объективов с таким увеличением обусловлен их выгодностью с точки зрения соотношения скорость/качество съемки. Выбор для исследования диапазона размеров от 0,5 до 10 мкм продиктован техническими возможностями приборов. ДАС 2702-М не распределяет аэрозольные частицы размером > 10 мкм по интервалам, а микроскоп практически не идентифицирует частицы размером < 0,5 мкм, что влечет за собой невозможность достоверной оценки их размеров. Следует отметить, что на выбранный диапазон приходится основная доля фракционного состава аэрозоля, характерного для городской территории [20–22].

Согласно полученным результатам преобладающим является мелкодисперсный аэрозоль размером до 2 мкм (рис. 4). Сравнение данных измерений спектрометра и полученных с помощью микроскопа сопровождается высокой корреляцией. Для серии № 1 $R = 0,97$, а для серии № 2 — 0,96. Незначительное снижение уровня корреляции может быть следствием использования объектива микроскопа с меньшим увеличением в серии измерений № 2. Однако для подтверждения этого предположения необходимо больше серий измерений. Количественное расхождение для интервалов размерного диапазона варьируется от 0,2 до 9,3% и является максимальным для интервала 3–5 мкм.

Различия в результатах, полученные при сравнении данных спектрометра и микроскопа, являются следствием нескольких факторов.

1. Плоскопольная оптическая микроскопия исследует объекты на плоскости, поэтому все, что выходит за рамки плоского поля по оси Z , подвержено расфокусировке. Собранные на стекловолоконные фильтры аэрозольные микрочастицы будут распределены не только по поверхности, но и в толще волокон. Если при итоговой съемке не удалось достичь приемлемой глубины резкости и частицы на панораме имеют размытые границы, программа будет ошибаться при их сегментации в сторону меньших размеров.

2. При плотном загрязнении фильтра микрочастицы соприкасаются и выглядят как единое целое. При пороговой сегментации такие объекты не будут разделены и пара мелких частиц будет учтена как одна большая.

3. В исследовании использовались объективы с увеличением 10 $\times$ и 20 $\times$, позволяющие охватить репрезентативный участок поверхности фильтра (представительная выборка). Однако с учетом разрешения фотокамеры микроскопа частицы размером менее 1 мкм на изображении представляются как совокупность нескольких пикселей. Поэтому в действительности они могут оказаться оптическими артефактами.

4. Пространственное расположение воздухозаборных каналов ДАС 2702-М и аспиратора отличалось. Расстояние между ними составляло ~ 0,5 м, поэтому возможно некоторое различие аэрозольного состава в каналах.

Заключение

Выполнено сопоставление результатов параллельных измерений сенсоров Panasonic PM_{2,5} и спектрометра ДАС 2702-М. Доказана целесообразность их совместного использования в рамках планируемой сети мониторинга загрязнения атмосферного воздуха на Среднем Урале. Полученные приборами результаты имеют высокую степень сходимости с коэффициентом корреляции $R = 0,92$. Между собой сенсоры обладают еще большей согласованностью результатов ($R = 0,98$), однако меньшее значение угла наклона линии линейной регрессии указывает на необходимость периодических интеркалибровок. Статистически значимые различия между данными сенсоров отсутствуют. При проведении систематических интеркалибровок с ДАС 2702-М сенсоры Panasonic PM_{2,5} могут равнозначно использоваться в качестве средств измерения концентрации аэрозоля в разных пунктах мониторинга. Отдельной задачей на будущее является сравнение получаемых данных с другими аэрозольными спектрометрами, например с общепризнанными эталонными приборами фирмы GRIMM, поскольку режим оптического счетчика является все-таки дополнительным для ДАС 2702-М.

Исследование фракционного состава атмосферного аэрозоля с применением средств и методов плоскопольной микроскопии позволило сделать вывод о преобладании микрочастиц размером до 2 мкм для выбранного диапазона размеров аэрозолей (от 0,5 до 10 мкм) на рассматриваемой территории. Сопоставление данных измерений (микроскопия/ДАС) сопровождалось высоким уровнем корреляции. При этом количественные расхождения для интервалов размерного диапазона варьировались от 0,2 до 9,3%, что связано со спецификой исследования образцов при помощи оптического микроскопа, а также особенностями отбора проб атмосферного воздуха. Микроскопия имеет существенные ограничения в исследованиях частиц субмикронного размера, однако (в отличие от спектрометра) позволяет изучать аэрозоль с частицами размером > 10 мкм.

Рассмотренные средства измерений атмосферного аэрозоля относятся к категории экономичного ценового сегмента, что позволяет развернуть сеть аэрозольных наблюдений на территории крупной городской агломерации. При этом дорогостоящие высокоточные приборы будут необходимы только для периодических интеркалибровок и верификации средств измерения, а также для последующего анализа данных.

Использованные методы анализа атмосферного аэрозоля являются вполне самостоятельными, поэтому могут применяться не только в комплексном исследовании.

Благодарности. Коллектив авторов выражает благодарность радиационной лаборатории ИПЭ УрО РАН и лично М.Е. Васяновичу, а также ООО «СИАМС» (г. Екатеринбург) за помощь в проведении исследования. Выражаем благодарность нашим японским коллегам, профессорам Ryoichi Imasu

и Yutaka Matsumi, за предоставленные для работы сенсоры Panasonic PM_{2.5}.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (научный проект № 19-05-50138).

Список литературы

1. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis* / V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani et al. (eds.) // Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. WMO, 2021. 31 p.
2. Asmi A., Wiedensohler A., Laj P., Fjaeraa A.-M., Sellegri K., Birmili W., Weingartner E., Baltensperger U., Zdimal V., Zikova N., Putaud J.-P., Marinoni A., Tunved P., Hansson H.-C., Fiebig M., Kivekäs N., Lihavainen H., Asmi E., Ulevicius V., Aalto P.P., Svietlicki E., Kristensson A., Mihalopoulos N., Kalivitis N., Kalapov I., Kiss G., de Leeuw G., Henzing B., Harrison R.M., Beddows D., O'Dowd C., Jennings S.G., Flentje H., Weinhold K., Meinhardt F., Ries L., Kulmala M. Number size distributions and seasonality of submicron particles in Europe 2008–2009 // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11, N 11. P. 5505–5538.
3. Freutel F., Schneider J., Drewnick F., von der Weiden-Reinmüller S.-L., Crippa M., Prevôt A.S.H., Baltensperger U., Poulain L., Wiedensohler A., Sciare J., Sarda-Estève R., Burkhardt J.F., Eckhardt S., Stohl A., Gros V., Colomb A., Michoud V., Doussin J.F., Borbon A., Haeffelin M., Morille Y., Beekmann M., Borrmann S. Aerosol particle measurements at three stationary sites in the megacity of Paris during summer 2009: Meteorology and air mass origin dominate aerosol particle composition and size distribution // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13, N 2. P. 933–959.
4. Гинзбург А.С., Губанова Д.П., Минашкин В.М. Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // *Российский химический журнал*. 2008. Т. 52, № 5. С. 112–119.
5. Song Z., Fu D., Zhang X., Wu Y., Xia X., He J., Han X., Zhang R., Che H. Diurnal and seasonal variability of PM_{2.5} and AOD in North China Plain: Comparison of MERRA-2 products and ground measurements // *Atmos. Environ.* 2018. V. 191. P. 70–78.
6. Губанова Д.П., Виноградова А.А., Иорданский М.А., Скороход А.И. Временные вариации состава атмосферного аэрозоля в Москве весной 2020 года // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2021. Т. 57, № 3. С. 334–348.
7. Gulyaev E., Antonov K., Markelov Y., Poddubny V., Shchelkanov A., Turkov I. Short-term effect of COVID-19 lockdowns on atmospheric CO₂, CH₄, and PM_{2.5} concentrations in urban environment // *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2023. V. 20, N 5. P. 1–12.
8. McMurry P.H. A review of atmospheric aerosol measurements // *Atmos. Environ.* 2000. V. 34, N 12–14. P. 1959–1999.
9. *Aerosol measurement: Principles, techniques, and applications* / P. Kulkarni, P.A. Baron, K. Willeke (eds.). Hoboken: John Wiley & Sons, 2011. 888 p.
10. Шchelkanov A.A., Коваленко М.А., Купряжкин А.А., Маркелов Ю.И., Поддубный В.А., Гадельшин В.М. Первые результаты исследования образцов атмосферного аэрозоля Среднего Урала методом масс-спектрометрии вторичных ионов // *Оптика атмосф. и океана*. 2021. Т. 34, № 6. С. 414–420; Shchelkanov A.A., Kovalenko M.A., Kupryazhkin A.Ya., Markelov Yu.I., Poddubny V.A., Gadelshin V.M. First results of the study of particulate matter samples from the Middle Urals with the use of secondary ion mass spectrometry // *Atmos. Ocean. Opt.* 2021. V. 34, N 5. P. 400–405.
11. Nakayama T., Matsumi Y., Kawahito K., Watabe Y. Development and evaluation of a palm-sized optical PM_{2.5} sensor // *Aerosol Sci. Tech.* 2018. V. 2, N 1. P. 2–12.
12. Осипов Ю.С., Кравец С.Л. Большая российская энциклопедия. Т. 29. М.: Большая Российская Энциклопедия, 2015. 766 с.
13. Mostafa M.Y.A., Khalaf H.N.B., Zhukovsky M. Attachment rate characteristics of different wide used aerosol sources in indoor air // *J. Environ. Health Sci.* 2021. V. 19, N 1. P. 867–879.
14. *Руководство по эксплуатации МПТР. 407232.001 РЭ. Спектрометр диффузионный аэрозольный ДАС 2702-М. М.: АэроНаноТех, 2016. 22 с.*
15. Dubtsov S., Ovchinnikova T., Valiulin S., Chen X., Manninen H.E., Aalto P.P., Petäjä T. Laboratory verification of aerosol diffusion spectrometer and the application to ambient measurements of new particle formation // *J. Aerosol Sci.* 2017. V. 105. P. 10–23.
16. *Руководство по эксплуатации ЦАПД 30.00.00.000 РЭ. Прибор для отбора проб воздуха ПА-300М-1,2. Екатеринбург: Экотех-УРАЛ, 2003. 15 с*
17. *Анализатор SIAMS 800. М., 2022. URL: https://siams.com/siamss800/* (дата обращения: 10.08.2022).
18. Sayahi T., Butterfield A., Kelly K.E. Long-term field evaluation of the Plantower PMS low-cost particulate matter sensors // *Environ. Pollut.* 2019. V. 245. P. 932–940.
19. Nguyen C.D.T., To H.T. Evaluating the applicability of a low-cost sensor for measuring PM_{2.5} concentration in Ho Chi Minh city, Viet Nam // *Sci. Technol. Dev. J.* 2019. V. 22, N 3. P. 343–347.
20. Азаров В.Н., Кузьмичев А.А., Николенко Д.А., Васильев А.Н., Козловцева Е.Ю. Исследование дисперсного состава пыли городской среды // *Вестн. МГСУ*. 2020. Т. 15, № 3. С. 432–442.
21. Тихонова И.В., Землянова М.А., Кольдибекова Ю.В., Пескова Е.В., Игнатова А.М. Гигиеническая оценка аэрогенного воздействия взвешенных веществ на заболеваемость детей болезнями органов дыхания в зоне влияния выбросов металлургического производства // *Анализ риска здоровью*. 2020. № 3. С. 61–69.
22. Deshmukh D.K., Deb M.K., Verma D., Verma S.K., Nirmalkar J. Aerosol size distribution and seasonal variation in an urban area of an industrial city in Central India // *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 2012. V. 89, N 5. P. 1098–1104.

E.A. Gulyaev, A.O. Gusev, Yu.I. Markelov, V.M. Gadelshin. **Techniques to study urban atmospheric aerosols: measurement tools and verification of result.**

This paper represents an approach based on analysis techniques (statistical, microscopic, verification) of data provided by aerosol optical sensors, diffusion aerosol spectrometer, aspirating air sampler, and optical microscopy. The particulate matter size distribution and PM_{2.5} mass concentration are studied. The low-cost measurement tools are verified with expensive precise equipment. The results show a high correlation (from 0.92 to 0.98) between different tools. The combination of considered devices can become a basis for a multi-point aerosol monitoring network for a wide urban territory with relatively low expenses.