

Комплекс измерения концентрации $PM_{2.5}$ и метеопараметров для многоточечной сети аэрозольного наблюдения в Екатеринбурге

Д.Е. Васильева^{✉ 1,2}, Е.А. Гуляев^{1,2}, Р. Имасу³, Ю.И. Маркелов²,
Ю. Мацуми⁴, А.В. Таловская⁵, А.А. Щелканов^{1,2}, В.М. Гадельшин^{1,2*}

¹Физико-технологический институт УрФУ
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия

²Институт промышленной экологии УрО РАН
620990, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 20, Россия

³Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo
5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba 277-8568, Japan

⁴Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University
464-8601, Furocho Chikusaku, Nagoya, Japan

⁵Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия

Поступила в редакцию 22.02.2023 г.;
после доработки 10.04.2023 г.;
принята к печати 12.04.2023 г.

Рассмотрены итоги первого испытания измерительного комплекса, предназначенного для исследования содержания аэрозольных примесей и метеопараметров. На основе результатов измерений в августе 2022 г. проведено сравнение опытных образцов комплекса с данными калиброванного оптического аэрозольного сенсора и стационарной метеостанции. Приводится описание выявленных недостатков конструкции комплекса, обсуждаются варианты доработки устройства и расширения его функциональных возможностей. Представлены планы по развертыванию многоточечной сети аэрозольных наблюдений в г. Екатеринбурге и его окрестностях.

Ключевые слова: атмосферный аэрозоль, частицы $PM_{2.5}$, оптические сенсоры, Panasonic PM2.5, массовая концентрация, экологический мониторинг, Урал; atmospheric aerosol, $PM_{2.5}$ particles, optical sensors, Panasonic PM2.5, mass concentration, ecological monitoring, Ural region.

Введение

Возникновение задачи исследования загрязнения окружающей среды является одним из последствий бурного научно-технического прогресса и глобальной индустриализации нашей планеты в последнее столетие. Электрификация, развитие промышленности и автотранспорта существенно изменили, количественно и качественно, состав атмосферного воздуха, в особенности на городской территории.

По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) почти все жители земного шара (99%) дышат воздухом, содержание загрязняющих веществ в котором превышает рекомендованные ВОЗ предельно-допустимые концентрации (ПДК) [1]. При этом в странах с низким и средним уровнем дохода негативное воздействие на здоровье населения загрязнения атмосферы проявляется в наибольшей степени, поскольку именно на их территорию приходится наибольший процент мирового промышленного производства благодаря дешевой рабочей силе и низким стандартам охраны труда и окружающей среды [2]. Как следствие, около 7 млн человек в мире ежегодно умирают из-за причин, так или иначе обусловленных загрязнением атмосферного воздуха [1].

Уровень содержания аэрозолей – взвеси твердых, жидких или смешанных частиц различного состава в газовой фазе – один из факторов, характе-

* Дарья Евгеньевна Васильева (daria_v00@mail.ru); Евгений Александрович Гуляев (gulyaev@esko.uran.ru); Рэйчи Имасу (imasu@aori.u-tokyo.ac.jp); Юрий Иванович Маркелов (markelovgm@gmail.com); Ютака Мацуми (matsumi@nagoya-u.jp); Анна Валерьевна Таловская (talovskaj@yandex.ru); Алексей Александрович Щелканов (a.a.shchelkanov@urfu.ru); Вадим Маратович Гадельшин (gadelshinvm@mail.ru).

ризующих качество вдыхаемого воздуха [3]. Особое внимание уделяется мелкодисперсному аэрозолю с аэродинамическим диаметром менее 2,5 мкм — $PM_{2.5}$ (от англ. particulate matter — взвешенные частицы), представляющему опасность для здоровья при вдыхании и состоящему в основном из продуктов сгорания [4]. Проникая в органы дыхания, частицы $PM_{2.5}$ легко преодолевают тканевый барьер и, будучи перенесенными с кровью, оседают во внутренних органах. При длительном воздействии высоких концентраций мелкодисперсного аэрозоля на человека повышается риск возникновения тяжелых заболеваний, таких как ишемическая болезнь сердца, инсульт, пневмония, хроническая обструктивная болезнь легких и онкология, вплоть до преждевременной смерти [5]. Для оценки уровня аэрозольного загрязнения и сопутствующей опасности для населения по всему миру проводятся непрерывные натурные измерения содержания микрочастиц $PM_{2.5}$ в атмосфере [6], изучаются зависимость концентрации аэрозоля от метеорологических параметров приземного слоя воздуха [7], влияние конкретных источников $PM_{2.5}$ [8, 9] и краткосрочное воздействие высоких концентраций [10] на здоровье живых организмов. Отдельного исследования заслуживают аномальные события глобального или локального масштабов, при возникновении которых наблюдается существенный рост или падение содержания аэрозолей в атмосфере, как, например, в период жесткой изоляции из-за пандемии COVID-19 [11, 12].

На Среднем Урале расположено большое количество предприятий металлургии, тяжелой и химической отраслей промышленности, вследствие чего необходим регулярный контроль за состоянием атмосферного воздуха. Крупнейшим городом Уральского региона является Екатеринбург, на исследование уровня загрязнения атмосферы в котором направлена научная деятельность лаборатории эколого-климатических проблем Арктики Института промышленной экологии (ИПЭ) УрО РАН. Для наблюдения за содержанием аэрозольных микрочастиц в приземном слое воздуха используется двухточечная модель измерений «город — фон»: городской пункт измерений располагается на территории ИПЭ (56°50'59,9 с.ш., 60°39'14,0 в.д.), а пункт фоновых измерений — на удалении ~70,5 км на территории Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета (57°02'12,1 с.ш., 59°32'50,4 в.д.) [13]. Круглогодичные измерения позволяют осуществлять сравнительный анализ циклических изменений концентрации аэрозолей в этих точках, оценивать «фоновый» уровень содержания аэрозольных примесей в регионе и их антропогенную составляющую на городской территории. Данные измерений являются основой для многофакторного анализа зависимости концентрации атмосферного аэрозоля от характеристик окружающей среды [14].

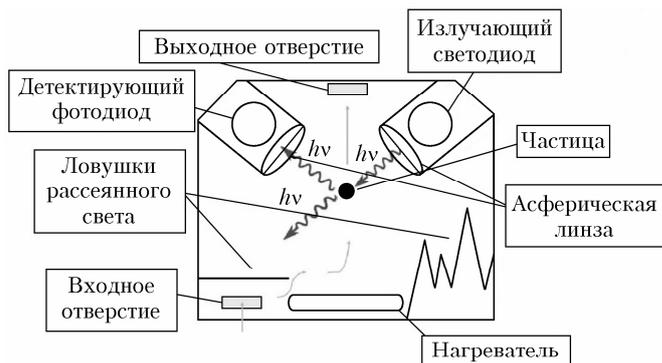
Преимущество двухточечной модели измерений заключается в ее простоте. Она позволяет проследить качественное различие в уровне концентрации при незначительных затратах на обслуживание и интеркалибровку приборов. Однако собираемая в единственной «городской точке» информация не может охарактеризовать состояние воздуха в определенном районе. Для анализа содержания аэрозоля в масштабах всего города и оценки вклада конкретных локальных источников решено перейти к многоточечным измерениям, развернув собственную сеть наблюдения за атмосферным аэрозолем. Спроектирован измерительный комплекс, обеспечивающий полное управление ходом измерений концентрации аэрозоля $PM_{2.5}$ и метеопараметров, единство и автоматизацию сбора данных.

Цели работы — испытание комплекса в реальных условиях, анализ полученных результатов и их сравнение с данными калиброванного аэрозольного сенсора и стационарной метеостанции.

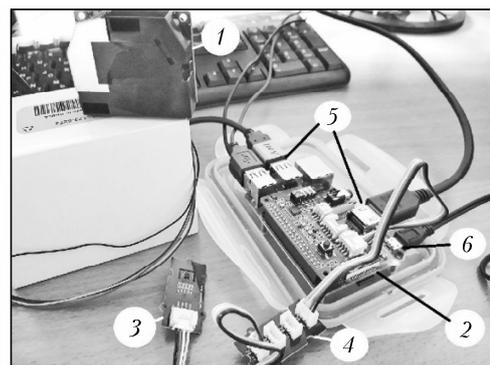
Ключевые компоненты измерительного комплекса

Основу рассматриваемого измерительного комплекса составляют миниатюрные оптические сенсоры Panasonic PM2.5 [15]. Они работают по следующему принципу: встроенный нагревательный элемент создает градиент температуры, образующийся при этом конвективный поток переносит аэрозольные частицы в зону облучения красным светодиодом ($\lambda = 625$ нм). По частоте импульсов и интенсивности рассеянного на аэрозольных частицах света определяются концентрация и размер детектируемых фотодиодом частиц соответственно. Размерный диапазон ограничен частицами аэродинамическим диаметром от 0,3 до 2,5 мкм, максимальное значение измеряемой концентрации составляет 300 мкг/м³. В конструкции сенсора имеются фотоловушки для минимизации искажающего результат шумового сигнала (рис. 1, а).

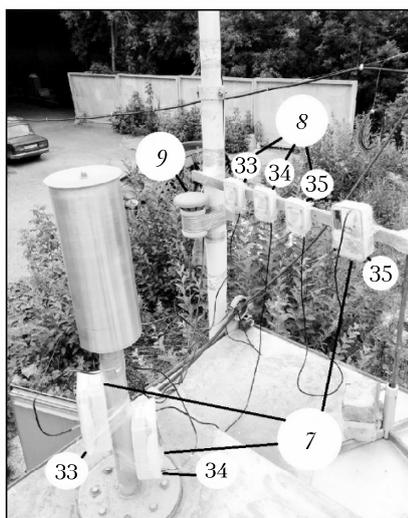
Система управления и сбора данных реализована на базе микрокомпьютера Raspberry Pi (рис. 1, б), обеспечивающего высокую автономность и компактность измерительного комплекса. Для удобства ведения сетевых многоточечных измерений разработано собственное программное обеспечение, позволяющее организовать централизованный сбор данных и их визуализацию в режиме реального времени. Часть функций по обработке данных выполняется непосредственно микрокомпьютером, существенно упрощая их дальнейший анализ. Благодаря подключению необходимых плат расширения к Raspberry Pi можно достичь желаемой функциональности комплекса, дополнив его, к примеру, датчиками метеопараметров. В рассматриваемом комплексе используются датчики температуры воздуха и относительной влажности SHT-31 (рис. 1, б), измеряющие температуру в диапазоне от -40 до +125 °С, а относительную влажность — от 0 до 100%.



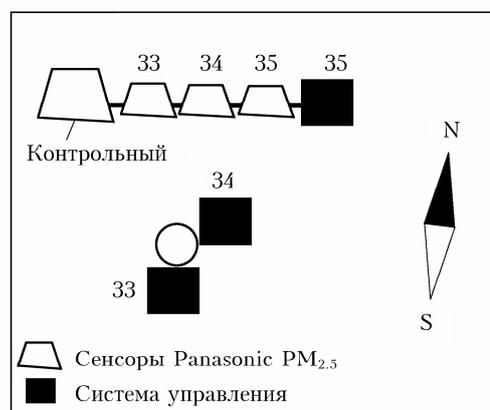
a



b



v



z

Рис. 1. Основные элементы и условия проведения испытания прототипов разработанного измерительного комплекса: *a* – принцип работы сенсора Panasonic PM_{2.5}; *b* – внешний вид элементов комплекса в разобранном виде: 1 – сенсор Panasonic PM_{2.5}; 2 – микрокомпьютер Raspberry Pi 3B+; 3 – датчик температуры воздуха и относительной влажности SHT-31; 4 – переходник для подключения дополнительных датчиков; 5 – порты периферийной аппаратуры; 6 – порт для подключения электропитания; *v* – фото расположения элементов комплекса во время испытания; 7 – система управления сенсором в защитном корпусе; 8 – сенсоры Panasonic PM_{2.5} (№ 33, 34, 35) в защитном корпусе; 9 – калиброванный сенсор в защитном корпусе; *z* – схема расположения устройств во время испытания

Результаты первых испытаний комплекса

В 2022 г. были собраны три опытных образца измерительного комплекса (сенсоры № 33, 34 и 35; результаты измерений последнего не рассматриваются в данной статье, поскольку он был изъят для использования в иных целях). Сенсоры были размещены на крыше метеоконтейнера (на высоте примерно 2,5 м над поверхностью земли), расположенного на территории ИПЭ и предназначенного для непрерывных атмосферных наблюдений (рис. 1, *v*). Первые испытания проводились с 1 по 31 августа 2022 г. совместно с откалиброванным контрольным сенсором Panasonic PM_{2.5}. Используемые оптические сенсоры проходят ежегодную калибровку с помощью поверенного прибора, а именно диффузионного аэрозольного спектрометра ДАС 2702-М [16, 17]. Однако в августе он не был доступен для работы, поэтому испытание опытных образцов измерительного комплекса сводилось к их проверке с контрольным сенсором.

Следует отметить, что в период измерений наблюдалось высокое содержание аэрозоля PM_{2.5} в воздухе, вызванное аномально высокой температурой окружающей среды и лесными пожарами в Свердловской и соседних областях, которые сопровождалась ухудшением видимости и отчетливым запахом гари [18, 19]. Максимальный уровень наблюдался 8–9 августа, когда концентрация PM_{2.5} превышала рекомендованную ВОЗ среднесуточную ПДК [20] непрерывно на протяжении 19 ч со средним значением 36 мкг/м³ и среднесуточную ПДК по отечественным нормам [21] непрерывно в течение 5 ч со средним значением 45 мкг/м³ (по данным калиброванного контрольного сенсора).

Результаты испытаний показали не только схожую динамику изменения концентрации для всех сенсоров Panasonic PM_{2.5}, но и высокий уровень соответствия абсолютных значений (рис. 2, *a*). На диаграммах рассеяния результатов измерения сенсоров № 33, 34 и контрольного (рис. 2, *b* и *v*) можно заметить некоторую ступенчатую структуру

с порогом около 35 мкг/м^3 , выше которого разница в показаниях сенсоров возрастает. Возможной причиной в отклонении результатов при высоких концентрациях является износ оптической системы контрольного сенсора, работающего с 2016 г. и, вероятно, нуждающегося в техническом обслуживании (очистка линз). Также эти отклонения могут быть связаны с различиями в конструкции защитных корпусов сенсоров: в отличие от опытных образцов контрольный сенсор помещен в полипропиленовый вентиляционный «гриб» для дополнительной защиты от осадков (см. рис. 1, в). В любом случае для выяснения причины возникновения этих отклонений представляется необходимым провести совместную поверку опытных образцов измерительного комплекса и контрольного сенсора относительно ДАС 2702-М, желательного в широком диапазоне концентраций. При сохранении ступенчатой структуры калибровку сенсоров будет корректнее выполнять на основе двух линий регрессии для низких и вы-

соких концентраций. При этом порог разделения данных следует определять исходя из требования максимизации коэффициента детерминации R^2 для обеих зависимостей.

Между собой сенсоры № 33 и 34 демонстрируют высокий уровень корреляции, однако также наблюдается некоторая аномальная область, в которой сенсор № 33 завышает или сенсор № 34 занижает результаты (рис. 2, з). Замечено, что данная область характерна для «ночных» измерений, между заходом и восходом Солнца (в среднем за рассматриваемый период заход Солнца был в 20:30, а восход в 05:30). Это может быть связано с усилением конвективного воздушного потока в «дневное» время, вызванного нагревом крыши метеоконтейнера под воздействием солнечных лучей (см. рис. 1, в). Из-за усиления переноса воздуха в рабочую область сенсоров, размещенных на крыше, «дневные» измерения становились более согласованными. Вероятно, данный эффект не проявился

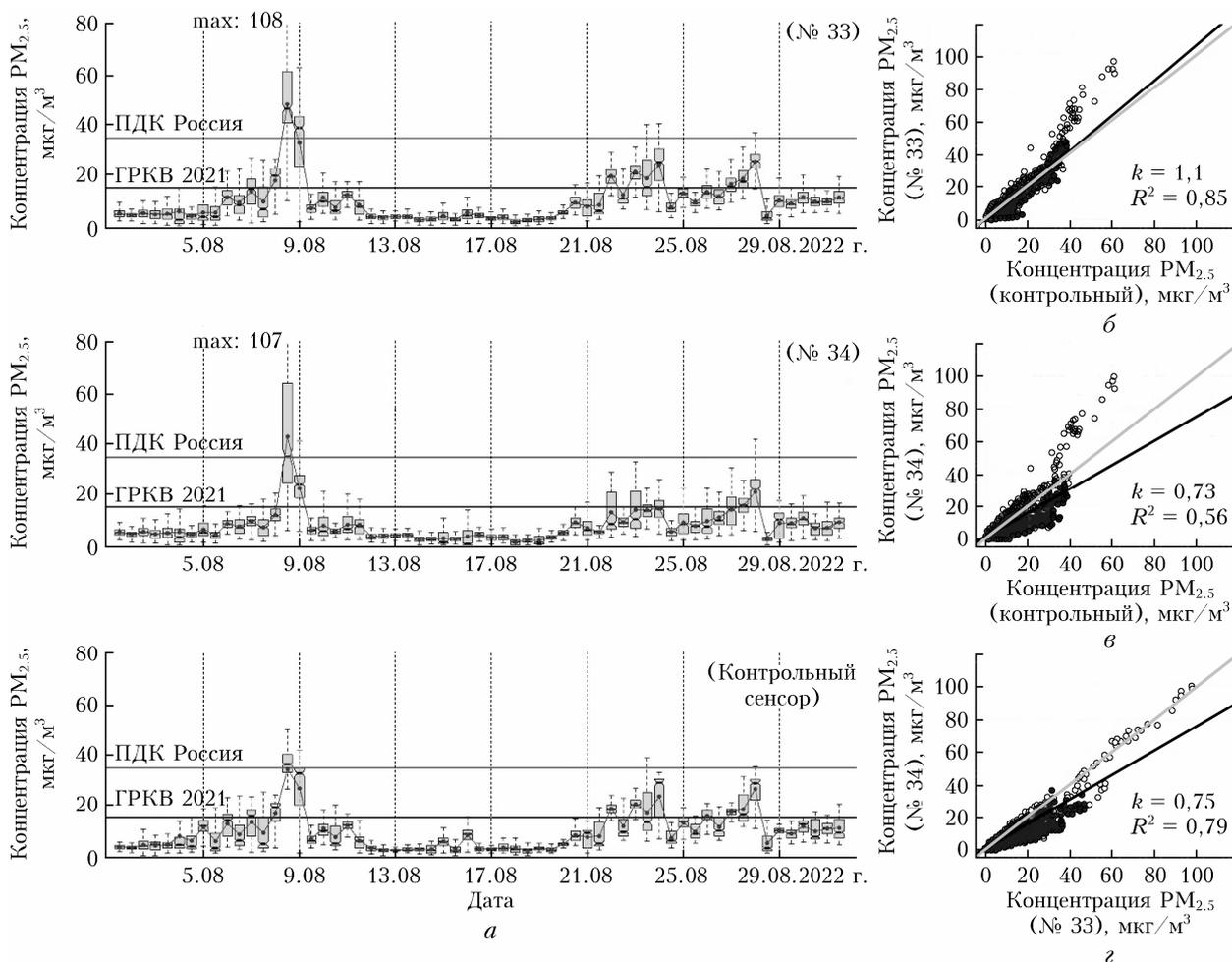


Рис. 2. Результаты измерения концентрации $\text{PM}_{2.5}$ прототипами измерительного комплекса в период с 1 по 31 августа 2022 г. *a* – динамика изменения концентрации аэрозоля $\text{PM}_{2.5}$ для сенсоров № 33 и 34 и для контрольного сенсора с 12-часовым разрешением. Диаграммы рассеяния результатов измерения: *б* – контрольного сенсора и сенсора № 33; *в* – контрольного сенсора и сенсора № 34; *г* – сенсоров № 33 и 34. На диаграммах представлены данные, усредненные за 10 мин: \circ – «дневные» измерения (05:30–20:30), \bullet – «ночные» (20:30–05:30). Среднесуточная ПДК аэрозоля $\text{PM}_{2.5}$, согласно «Глобальным рекомендациям ВОЗ по качеству воздуха» (ГРКВ 2021), составляет 15 мкг/м^3 , по отечественным стандартам (ПДК Россия) – 35 мкг/м^3

для контрольного сенсора ввиду иной конструкции защитного корпуса. По итогам испытаний в дальнейшем решено привести конструкцию всех используемых сенсоров к единому виду с дополнительной защитой от осадков.

Отдельной задачей являлось сравнение показаний датчиков метеопараметров SHT-31 и ультразвуковой метеостанции «Метео-2» [22], а также метеоданных, предоставляемых веб-ресурсом «gr5.ru» (точка расчета в Екатеринбурге: 56°50' с.ш., 60°38' в.д.) [23]. Из графика временного хода температуры воздуха (рис. 3, а) видно, что на первоначальном этапе испытаний (до 11.08.2022 г.) датчики SHT-31 «днем» (05:30–20:30) демонстрировали завышенное значение температуры относительно показаний «Метео-2» (средняя амплитуда вариации составляла 11,9 °С). При этом «ночные» (20:30–05:30) результаты показывали высокий уровень соответствия (рис. 3, б) данным метеостанции (средняя амплитуда вариации – 1,0 °С) и сайта «gr5.ru». Очевидно, что «дневное» расхождение является следствием воздействия прямых солнечных лучей, падающих на поверхность датчика SHT-31 (рис. 1, з). После смены корпуса держателя датчика

(с 12.08.2022 г.) ситуация изменилась, и различие в «дневных» температурах значительно уменьшилось (средние амплитуды вариации составили 5,5 и 0,8 °С за «дневной» и «ночной» периоды соответственно). Выполненное сравнение подтверждает критичность правильного расположения датчика в пространстве: при установке измерительного комплекса в пункте постоянного мониторинга корпус держателя датчика SHT-31 следует защищать по возможности от воздействия прямых солнечных лучей.

При измерении относительной влажности воздуха (рис. 3, в) разница между показаниями датчиков и метеостанции не имела ярко выраженной зависимости от смены дня и ночи (средняя амплитуда вариации за «дневной» период до 11.08.2022 г. составляла 17,4%, за «ночной» – 15,2%). Куда более очевидно, что датчики SHT-31 систематически показывали заниженные результаты по сравнению с «Метео-2». После смены корпуса держателя датчика ситуация несколько улучшилась (средние амплитуды вариаций 10,5 и 9,8% за «дневной» и «ночной» периоды соответственно), но общее занижение результатов осталось (рис. 3, з). Отметим, что при сравнении показаний датчиков с данными

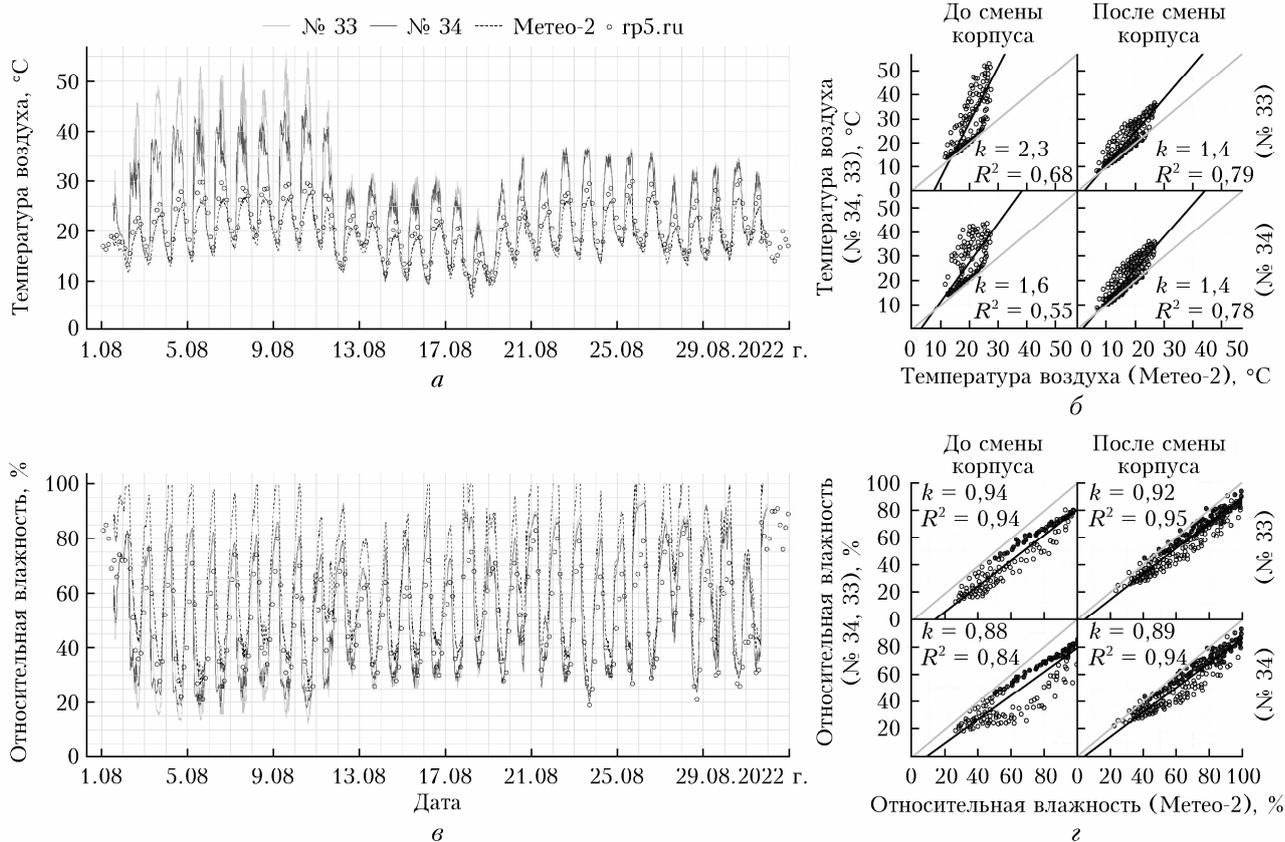


Рис. 3. Результаты измерения метеопараметров прототипами измерительного комплекса в период с 1 по 31 августа 2022 г. а, в – временные ходы температуры и относительной влажности воздуха, полученные с помощью датчиков № 33 и 34, метеостанции «Метео-2» и по данным сайта «gr5.ru» (результаты измерений датчиков и метеостанции представлены с 10-минутным разрешением, данные с сайта – с максимально доступным 3-часовым); б, з – диаграммы рассеяния результатов измерения температуры и относительной влажности воздуха для датчиков № 33, 34 и метеостанции до и после (11.08.2022 г.) смены корпуса держателя датчиков. На диаграммах представлены усредненные за 1 ч данные; ○ – «дневные» измерения (05:30–20:30), ● – «ночные» (20:30–05:30)

сайта «gr5.ru» систематическое завышение или занижение результатов не наблюдается и измерения выглядят более согласованными (рис. 3, в). Тем не менее «точка расчета метеоданных» (gr5.ru) находится на расстоянии 3 км от ИПЭ, что вносит дополнительную разницу при сравнении показаний. Возможно, полученные данные следует трактовать как завышение результатов измерения относительной влажности метеостанцией «Метео-2». Для подтверждения или опровержения этой гипотезы решено выполнить новую поверку метеостанции.

Отметим, что испытания опытных образцов измерительного комплекса продолжились осенью 2022 г. Однако при падении температуры окружающего воздуха ниже +5 °С запись результатов измерений сенсора Panasonic PM2.5 осуществлялась некорректно (с подобными проблемами столкнулись и другие научные группы [24]). Причиной ошибок в работе устройства стали особенности в программном коде передачи данных. После устранения неполадок рассмотренные образцы комплекса с унифицированным защитным корпусом планируется выставить на итоговую калибровку совместно с ДАС 2702-М и перейти к размещению устройств в выбранных пунктах создаваемой многоточечной сети.

Планы и перспективы

Для осуществления задачи поэтапного развертывания многоточечной научно-исследовательской сети аэрозольного мониторинга на основе рассмотренного измерительного комплекса сформирован ряд критериев размещения единичных пунктов наблюдения. Во-первых, территориальный: измерительные устройства будут располагаться на достаточном

удалении друг от друга для охвата различных районов города и/или различных функциональных зон – спальной, парковой, общественной, промышленной, транспортной инфраструктуры и др. Во-вторых, технический: для обеспечения стабильной работы устройства необходимо постоянное электропитание, для автоматического сбора и передачи данных – доступ к интернету, для целостности и сохранности комплекса – защита от вандализма.

В соответствии с этими критериями готовые устройства планируется размещать на территории других институтов УрО РАН, корпусов и филиалов УрФУ (рис. 4, а). Пункт непрерывных атмосферных измерений на территории ИПЭ станет первым городским звеном будущей сети; здесь же будет расположен единый сервер хранения и обработки данных. Следующий пункт хранения уже согласован и будет находиться в Институте теплофизики УрО РАН. Данный институт располагается в другом районе города, в непосредственной близости к оживленной автодороге, где в часы пик, как правило, наблюдаются «высокобалльные» пробки (транспортная зона). Обсуждаются новые варианты: промышленная зона (г. Верхняя Пышма), парковая (Ботанический сад УрО РАН), общественно-деловая (Институт естественных наук и математики УрФУ).

В ИПЭ развивается методика флюид-локации атмосферы (ФЛА), позволяющая построить среднее эффективное поле концентрации атмосферных примесей в пространстве по данным локальных измерений без привлечения информации об источниках выбросов примесей в атмосферу [25, 26]. Для расширения возможностей этой методики планируется размещение дополнительных точек измерения в окрестностях Екатеринбурга и других городах Уральского региона на двух кольцевых группах (рис. 4, б):

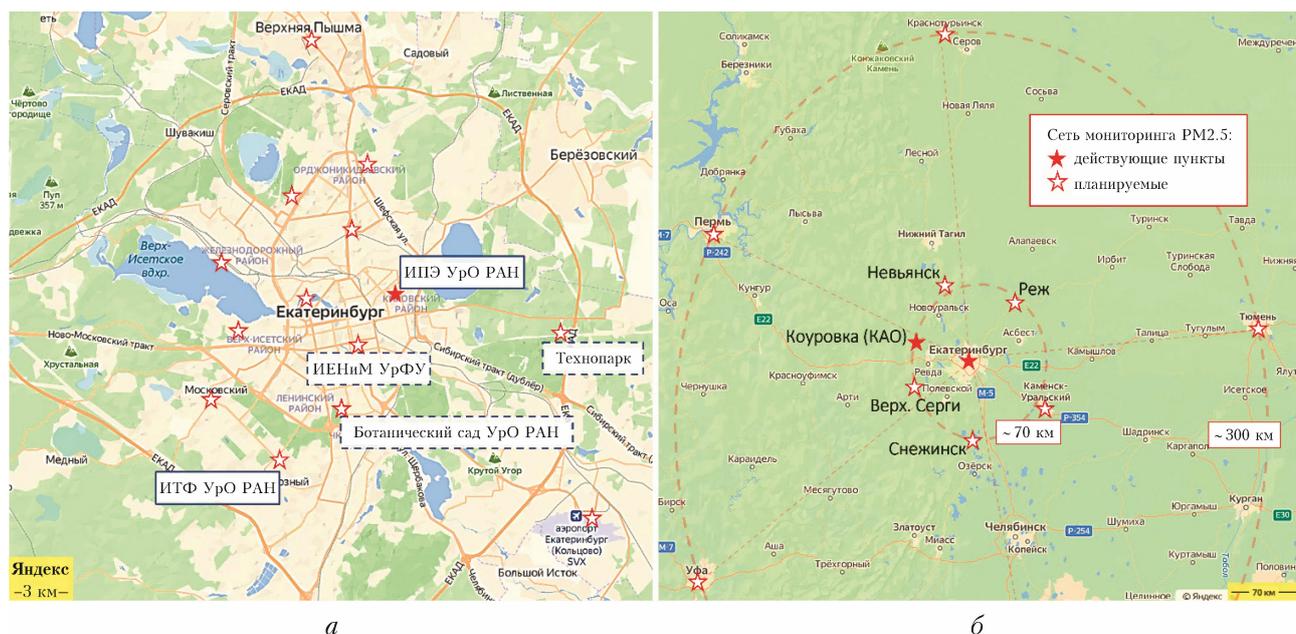


Рис. 4. Карта расположения действующих и планируемых пунктов аэрозольного наблюдения в Екатеринбурге (а) и его окрестностях (б)

ближние пункты мониторинга (в радиусе 70 км от Екатеринбурга), к которым относится действующая точка «фоновых измерений» в Коуровской астрономической обсерватории УрФУ, и удаленные пункты мониторинга (в радиусе 300 км). Во взаимодействии с научными коллективами других регионов можно будет реализовать дальние пункты мониторинга, расположенные в радиусе более 1500 км от Екатеринбурга, что позволит существенно повысить точность расчетов методом ФЛА на большом пространстве.

Одним из ключевых достоинств использования приборов собственной разработки является возможность их видоизменения под требуемые задачи. Представляется перспективным воспользоваться компактностью измерительного комплекса и задействовать его в проведении измерений высотного профиля содержания атмосферного аэрозоля с помощью беспилотных летательных аппаратов, а также мобильных измерений уровня загрязнения воздуха в общественном транспорте и на рабочих местах [27]. Для комплексного анализа аэрозольных микрочастиц возможно размещение пассивного пробоотборника в едином корпусе с измерительным комплексом. Сочетание круглогодичного мониторинга концентрации атмосферного аэрозоля и анализа периодически собираемых проб позволит получать информацию о химическом составе условно постоянного городского аэрозольного загрязнения, а также о составе микрочастиц, соответствующих аномально высоким значениям концентрации.

Заключение

Исследование загрязнения атмосферного воздуха аэрозольными микрочастицами является актуальной задачей для оценки качества и безопасности жизни населения современных городов. Рассмотренный измерительный комплекс на базе оптического сенсора Panasonic PM2.5 может стать основой для многоточечной сети мониторинга атмосферного аэрозоля, развертывание которой особенно актуально для Екатеринбурга — одного из ключевых промышленных центров страны. Распространенная сеть аэрозольных наблюдений откроет возможность изучения динамики загрязнения городского воздуха, поможет определить влияние конкретного источника на пространственное распределение аэрозольных микрочастиц. Она представляет особую ценность для предупреждения риска здоровью жителей в случае поступления большого количества загрязняющих веществ в атмосферу. Примером такого аномального события является сильный смог 8–9 августа 2022 г., когда на протяжении 19 ч со средним значением концентрации $PM_{2.5}$ в 36 мкг/м^3 наблюдалось двухкратное превышение рекомендованного ВОЗ среднесуточного ПДК по данным измерений на территории ИПЭ УрО РАН.

Первые испытания опытных образцов измерительного комплекса демонстрируют важность соблюдения единых условий калибровки сенсоров, чтобы гарантировать высокое соответствие между измере-

ниями каждого пункта будущей сети. Наблюдаемые отклонения в результатах измерения сенсоров при концентрациях выше 35 мкг/м^3 говорят о необходимости унифицировать конструкцию защитного корпуса и провести дополнительную калибровку с более точным поверенным средством измерения, желательно в широком диапазоне концентраций. Более того, организация круглогодичных измерений требует дальнейшего совершенствования и доработки как конструкции, так и программной части комплекса. После устранения сбоя записи данных при температуре окружающей среды ниже $+5 \text{ }^\circ\text{C}$ и итоговой калибровки образцов комплекса с более точным прибором планируется перейти к размещению устройств в выбранных пунктах создаваемой многоточечной сети аэрозольного мониторинга. Представленные результаты могут поспособствовать реализации национального проекта «Экология».

Благодарности. Выражаем особую благодарность Василию Алексеевичу Поддубному, ведущему научному сотруднику ИПЭ УрО РАН, за проявленную внимательность и многочисленные предложения по улучшению текста статьи.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-50138.

Список литературы

1. World health organization Air pollution. URL: <https://www.who.int/westernpacific/health-topics/air-pollution> (last access: 24.12.2022).
2. *Загрязнение воздуха и здоровье детей: рекомендуем чистый воздух.* Резюме. Женева: Всемирная организация здравоохранения, 2018. 32 с.
3. *Air quality guidelines: Global update 2005: Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide.* Copenhagen, Denmark: World Health Organization, 2006. 484 p.
4. *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications* / A.P. Baron, P. Kulkarni, P. Willeke (eds.). New York: Elsevier, 2011. 876 p.
5. *Дудорова Н.В., Белан Б.Д.* Связь загрязнения воздуха твердыми частицами со смертностью населения г. Томска // *Аэрозоли Сибири: материалы 28-й конференции.* Томск: ИОА СО РАН, 2021. С. 48.
6. *Chetna D., Dhaka S.K., Longiany G., Panwar V., Kumar V., Malik S., Rao A.S., Singh N., Dimri A.P., Matsumi Y., Nakayama T., Hayashida S.* Trends and variability of $PM_{2.5}$ at different time scales over Delhi: Long-term analysis 2007–2021 // *Aerosol Air Qual. Res.* 2022. N 22. P. 220191.
7. *Володько О.С., Дергунов А.В.* Дисперсионный анализ зависимости концентрации взвешенных частиц $PM_{2.5}$ в атмосфере г. Красноярска и метеоусловий // *Региональные проблемы дистанционного зондирования земли: Материалы IX Международной научной конференции, 13–16 сентября 2022 г.* Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2022. С. 195–198.
8. *Холодов А.С., Кириченко К.Ю., Задорнов К.С., Голохваст К.С.* Влияние твердых взвешенных частиц атмосферного воздуха населенных пунктов на здоровье человека // *Вестн. Камчат. гос. техн. ун-та.* 2019. № 49. С. 81–88.
9. *Orru H., Maasikmets M., Lai T., Tamm T., Kaasik M., Kimmel V., Orru K., Merisalu E., Forsberg B.* Health

- impacts of particulate matter in five major Estonian towns: Main sources of exposure and local differences // *Air Qual. Atmos. Health*. 2011. N 4. P. 247–258.
10. *Wenhua Yu W., Ye T., Zhang Y., Xu R., Lei Y., Chen Z., Yang Z., Zhang Y., Song J., Yue X., Li S., Guo Y.* Global estimates of daily ambient fine particulate matter concentrations and unequal spatiotemporal distribution of population exposure: A machine learning modelling study // *The Lancet Planetary Health*. 2023. V. 3, N 7. P. E209–E218.
 11. *Dhaka S.K., Chetna, Kumar V., Panwar V., Dimri A.P., Singh N., Patra P.K., Matsumi Y., Takigawa M., Nakayama T., Yamaji K., Kajino M., Misra P., Haya-shida S.* PM_{2.5} diminution and haze events over Delhi during the COVID-19 lockdown period: An interplay between the baseline pollution and meteorology // *Sci. Rep.* 2020. N 10. P. 13442.
 12. *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.* 2022. P. 1–12.
 13. *Поддубный В.А., Полькин В.В., Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Лужецкая А.П., Маркелов Ю.И., Дубинкина Е.С., Хуризианова О.И.* Комплексный аэрозольный эксперимент на среднем урале. Часть 1. Условия проведения и результаты фотометрических измерений // *Оптика атмосф. и океана*. 2016. Т. 29, № 12. С. 1003–1010.
 14. *Luzhetskaya A.P., Nagovitsyna E.S., Omelkova E.V., Poddubny V.A., Shchelkanov A.A., Gadelshin V.M., Matsumi Y., Imasu R.* Relationship between the concentration of fine particulate matter and aerosol optical depth in the Middle Urals // *Proc. SPIE*. 2021. N 11916. P. 119164A.
 15. *Nakayama T., Matsumi Y., Kawahito K., Watabe Y.* Development and evaluation of a palm-sized optical PM_{2.5} sensor // *Aerosol Sci. Technol.* 2018. V. 52, N 1. P. 2–12.
 16. *Руководство по эксплуатации МПТР. 407232.001 РЭ.* Спектрометр диффузионный аэрозольный ДАС 2702-М. 2016. 21 с.
 17. *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.
 18. *Вестн Урал: Свердловскую область все сильнее окутывает смог.* Свердловск, 2023. URL: <https://vesti-ural.ru/2022/08/08/175669/?ysclid=le9fkuxv6g272620559> (дата обращения: 11.02.2023).
 19. *Интерфакс [Б.м.]*, 2023. Смог от природных пожаров накрыл Екатеринбург и другие города Урала URL: <https://www.interfax.ru/russia/785696> (дата обращения: 11.02.2023).
 20. *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide, and carbon monoxide.* Bonn, Germany: World Health Organization, 2021. 300 p.
 21. *Постановление* главного государственного санитарного врача РФ от 28 января 2021 года № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”». 469 с.
 22. *Гладких В.А., Макиенко А.Э.* Цифровая ультразвуковая метеостанция // *Приборы*. 2009. № 7. С. 21–25.
 23. *Расписание погоды* // gp5.ru. URL: <https://gp5.ru> (дата обращения: 11.02.2023).
 24. *Yasunari T.J., Wakabayashi S., Matsumi Y., Matoi S.* Developing an insulation box with automatic temperature control for PM_{2.5} measurements in cold regions // *J. Environ. Manag.* 2022. N 311. P. 114784.
 25. *Поддубный В.А., Наговицина Е.С.* Восстановление пространственного поля концентрации атмосферного аэрозоля по данным локальных измерений: модификация метода статистики обратных траекторий // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2013. Т. 49, № 4. С. 439–446.
 26. *Поддубный В.А., Дубинкина Е.С.* Задача о пассивной локации атмосферы ветровыми потоками для оценки полей концентрации и определения источников примеси // *Оптика атмосф. и океана*. 2017. Т. 30, № 10. С. 862–870.
 27. *Ariunsaikhan A., Chonokhuu S., Matsumi Y.* Mobile measurement of PM_{2.5} based on an individual in Ulaanbaatar City // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2020. N 17. P. 2701.

D.E. Vasilyeva, E.A. Gulyaev, R. Imasu, Yu.I. Markelov, Y. Matsumi, A.V. Talovskaya, A.A. Shchelkanov, V.M. Gadelshin. **A measuring system for PM_{2.5} concentration and meteorological parameters for a multipoint aerosol monitoring network in Yekaterinburg.**

The outcome of the first tests of a measuring system designed for the monitoring of atmospheric aerosol and meteorological parameters is considered. Based on the measurement results from August 2022, the data of the system prototypes, a calibrated optical aerosol sensor, and the on-site meteorological station are compared. The revealed drawbacks of the system design are described. The plans to improve and extend the system capabilities are discussed. A blueprint of a future multipoint aerosol monitoring network in Yekaterinburg and its neighborhood is presented.