

УДК 53.047

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2025.4.5

НЕПРЕРЫВНЫЙ МОНИТОРИНГ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ В ТЕХНОГЕННЫХ УСЛОВИЯХ

© М. А. Соломатин^{1*}, А. Р. Каримов^{1,2}, М. В. Малашин¹,
Р. А. Валиуллин³, Р. Ф. Шарафутдинов³

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ
Россия, 115409 Москва, Каширское шоссе, 31.

²Институт высоких температур РАН
Россия, 125412 г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

³Уфимский университет науки и технологий
Россия, республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

*Email: mis4455@yandex.ru

Качество воздуха в замкнутых помещениях играет ключевую роль в поддержании здоровья и профилактике респираторных инфекций. В условиях высокой плотности людей повышается концентрация биоаэрозолей – микроскопических частиц, выделяемых при дыхании, разговоре и кашле, которые могут служить переносчиками патогенов. Фракция PM2.5, включающая частицы диаметром менее 2,5 мкм, особенно значима, поскольку способна глубоко проникать в дыхательные пути и длительное время оставаться во взвешенном состоянии. В данной работе представлены результаты измерений параметров воздушной среды (PM2.5, CO₂, VOC, температура, влажность), проведенных с помощью разработанного устройства в жилых, офисных и общественных помещениях. Показано, что в условиях высокой посещаемости наблюдается значительный рост концентрации PM2.5 и CO₂, что коррелирует с интенсивностью присутствия людей и режимом проветривания. Установлено, что уровень PM2.5 в помещениях с массовым скоплением людей может достигать 70 мкг/м³, а CO₂ – превышать 1 800 прт, что указывает на недостаточную вентиляцию. Полученные данные подтверждают, что мониторинг PM2.5 в сочетании с CO₂ и VOC позволяет оценивать накопление биоаэрозолей и выявлять потенциально опасные условия. Разработанное устройство демонстрирует высокую чувствительность и пригодность для использования в системах раннего предупреждения о риске передачи инфекций воздушно-капельным путем.

Ключевые слова: качество воздуха в помещениях, биоаэрозоли, PM2.5, мониторинг в реальном времени, CO₂, летучие органические соединения (VOC), вентиляция; респираторные инфекции, воздушно-капельный путь передачи.

Введение

Аэрозоли (микроскопические твердые или жидкые частицы), являются неотъемлемой частью техногенной среды обитания, где современный человек проводит до 90 % своей жизни [1]. Среди таких образований выделяются биоаэрозоли, представляющие собой биологически активные частицы, содержащие микроорганизмы (бактерии, вирусы, грибки), их фрагменты, клеточные остатки, а также биомолекулы, такие как белки, ДНК и липиды.

Как правило, формирование биоаэрозолей происходит в различных отделах респираторного тракта, как это показано на рис. 1. В верхних дыхательных путях – нос, гортань, ротоглотка – генерируются более крупные капли (от 10 до 100 мкм), которые быстро оседают на поверхностях из-за гравитации, и поэтому не представляют большой опасности. В нижних отделах – в трахее, бронхах и альвеолах – при выдохе и особенно при кашле возникают мелкие аэрозоли размером менее 5 мкм, причем подавляющее большинство выдыхаемых при дыхании, разговоре и кашле аэрозолей имеет характерный размер меньше одного мкм [2]. Подобные частицы способны оставаться в воздухе часами, при этом проникая глубоко в легкие, когда попадают обратно в дыхательную систему.

С другой стороны, характерные размеры большинства мелкодисперсных аэрозолей значительно превосходят размеры вирусов и бактерий, что позволяет рассматривать мелкодисперсные аэрозоли в качестве потенциальных переносчиков различных патогенов, выделив их в отдельный класс – так называемые PM2.5 частицы. Тем более, что жидкостная матрица некоторых аэрозолей, состоящая из слизи, сурфактанта и ионов, может играть ключевую роль в сохранении жизнеспособности вирусов и бактерий, защищая их от внешних воздействий, например, УФ-излучения, что в современных техногенных условиях особенно остро проявился в время пандемии COVID-19 [3–5].

Данные особенности показывают, что распространение респираторных инфекций обусловлено не только размером аэрозольных носителей и временем пребывания патогенов в воздухе, но и фазовым, компонентным и зарядовым составом потенциальных носителей, а также состоянием окружающей среды. Поэтому мониторинг самих *PM2.5* частиц и входящих в их состав *CO₂*, *VOC*, озона, а также температуры и влажности в режиме реального времени становится ключевым моментом для диагностики инфекций, распространяющихся воздушным путем. Например, рост концентрации *CO₂* сигнализирует о недостаточном воздухообмене и высокой плотности людей, а увеличение *PM2.5* может указывать на накопление аэрозольных частиц, включая биоаэрозоли. При этом отсутствие доступа к информации о состоянии воздушной среды в реальном времени ограничивает возможности профилактики и управления рисками заражения [6]. Для эффективного контроля качества воздуха необходимы комплексные решения, позволяющие не только измерять ключевые параметры воздушной среды, но и предоставлять пользователю информацию в понятной форме, а также обеспечивать возможность удаленного мониторинга и автоматического регулирования климатических условий.

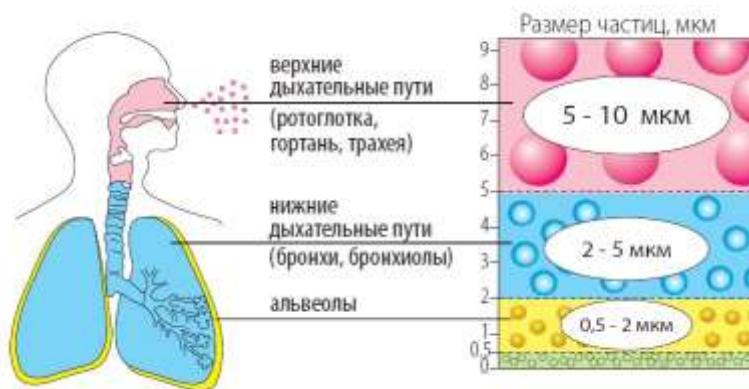


Рис. 1. Аэрозоли в дыхательной системе человека.

В настоящей работе рассматривается одна из возможных технических реализаций такого непрерывного мониторинга микроклимата в замкнутых пространствах, позволяющая оценить характеристики воздушной среды, при которых возникают необходимые условия для накопления биоаэрозолей как потенциальных носителей патогенов. В качестве ключевых индикаторов исследуются концентрация мелкодисперсных частиц (*PM2.5*), уровень *CO₂*, летучие органические соединения (*VOC*), температура и влажность в помещениях с различной посещаемостью. Полученные данные позволяют выявлять режимы, способствующие застою воздуха и накоплению инфекционных аэрозолей.

Физико-химические и медико-биологические свойства *PM2.5* частиц

Прежде всего вкратце остановимся на физико-химических и медико-биологических свойствах *PM2.5* частиц. Данная категория включает мелкодисперсные твердые и жидкые аэрозольные частицы диаметром менее 2,5 микрон, которые могут оставаться во взвешенном состоянии в воздухе в течение долгого времени. Действительно, согласно [7], оценка времени оседания частиц, имеющих сферическую форму, в вязкой среде определяется соотношением:

$$\tau \sim \frac{d^2}{4\nu}, \quad (1)$$

где d – диаметр частицы, ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха. Как следует из этого соотношения, при уменьшении радиуса частицы время ее нахождения в воздухе уменьшается не линейно, а по квадратичному закону, что означает резкое увеличение времени пребывания в подвешенном состоянии даже при незначительном уменьшении размера. В качестве иллюстрации на *рис. 2* приведена зависимость τ от d для типичных городских условий, где $\nu = 1,5 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. Как видно из графика, мелкие частицы при $d \leq 2,5 \text{ мкм}$ могут оставаться в воздухе от нескольких минут до нескольких часов, особенно в условиях низких скоростей воздушных потоков и слабой вентиляции [8].

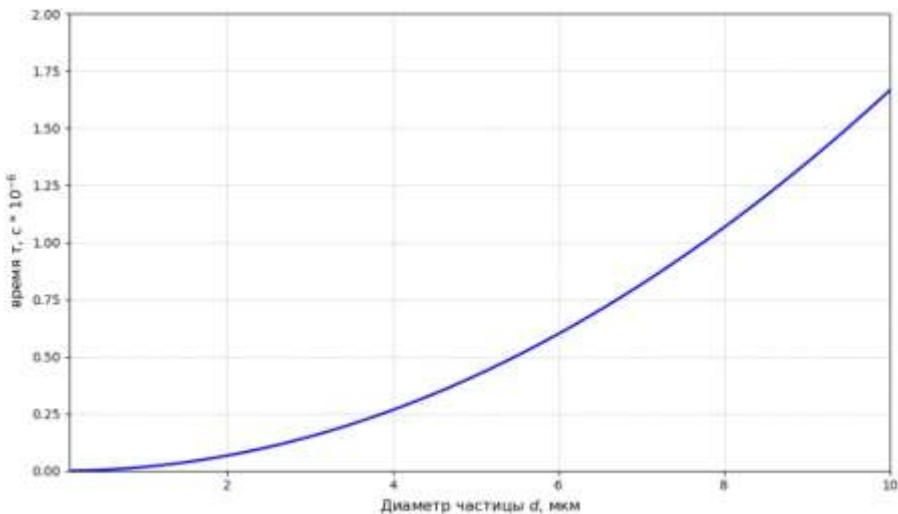


Рис. 2. График зависимости времени оседания частиц от их диаметра при $v = 1,5 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

Правда, данная оценка получена с учетом электронейтральной природы частиц, тогда как большинство аэрозолей обладает дипольным моментом, что имеет принципиальное значение для реализации механизма переноса вирусов такими частицами из-за наличия естественного и техногенных электрических полей. Продемонстрируем эту особенность на примере электрического поля Земли E_{\oplus} , которое можно оценить на основе модели «сферического конденсатора», где нижний электрод – поверхность Земли, а верхний электрод – верхние слои атмосферы. В нормальных условиях Земля имеет отрицательный заряд, причем вблизи ее поверхности электрическое поле составляет $E_0 = -130 \text{ В/м}$ [9–11]. В отсутствие грозовых облаков и т.д. напряженность электрического поля уменьшается с высотой и обращается в нуль на поверхности верхнего электрода. Для относительно небольшого высотного диапазона, в котором разность плотностей ионов и электронов постоянна и составляет $\delta n \approx 3 \text{ см}^{-3}$ [11], E_{\oplus} определяется соотношением:

$$E_{\oplus} = E_0 \left(1 - \frac{z}{L}\right), \quad (2)$$

где величина $L = |E_0|/(4\pi\epsilon_0\delta n)$ представляет собой эффективную высоту атмосферы в используемой модели конденсатора и составляет $L \approx 5 \text{ км}$.

Пренебрегая градиентом давления, условие механического равновесия дипольной частицы в электростатическом и гравитационном поле Земли можно записать в виде

$$\mathbf{pV} \cdot \mathbf{E}_{\oplus} - mge_z = 0, \quad (3)$$

где $m = \pi d^3 \rho_0 / 6$ – масса аэрозольной частицы, выраженная через плотность дисперсной фазы ρ_0 ; g – ускорение свободного падения, направленное в противоположную сторону; e_z – орта оси $0Z$; \mathbf{p} – дипольный момент частицы, который для оценки электростатической силы Земли по порядку величины можно взять равным $\mathbf{p} \sim qde_z$, где q – эффективный заряд частицы. Подставив (2) в (3), получим условие удержания аэрозоля в воздухе:

$$d^2 g \leq 6qedn, \quad (4)$$

когда электростатическая сила, действующая на дипольную частицу, компенсирует силу тяжести. Как видно из данного соотношения, при уменьшении d , за счет эффекта левитации происходит увеличение времени пребывания частиц в воздухе по сравнению с временем удержания нейтральных аэрозолей, а значит зона потенциального заражения увеличивается с течением времени.

При этом также следует принимать во внимание развитую поверхность и гидрофильтрные свойства PM2.5 частиц, покрытых высокомолекулярными полярными макромолекулами, содержащими неорганические соли и металлы [7]. Наличие заряженных функциональных групп и гидратированных доменов на поверхности частиц способствует прочному связыванию с белковыми компонентами вирусных капсидов и оболочек за счет электростатических, диполь-дипольных и водородных взаимодействий, что обеспечивает эффективную адсорбцию и стабилизацию вирусов на поверхности аэрозольных носителей.

Особую роль в стабилизации аэрозольных частиц и поддержании жизнеспособности патогенов могут играть мицеллоподобные структуры, формирующиеся в жидкой матрице аэрозолей. В респираторных аэрозолях, особенно генерируемых в нижних отделах дыхательной системы, присутствуют компоненты легочного сурфактанта – фрагменты фосфолипидов (в первую очередь дипальмитоилфосфатидилхолина) и белков, которые при достижении критической концентрации способны к самосборке в мицеллоподобные агрегаты. Эти структуры

снижают поверхностное натяжение в тонких пленках аэрозольных капель, препятствуя их быстрому высыханию и обеспечивая защитную среду для вирусов. Благодаря гидрофобному ядру и гидрофильной оболочке, мицеллы могут стабилизировать липидные оболочки вирусов, предотвращая их денатурацию и увеличивая время их сохранения в инфекционной форме.

Кроме того, мицеллоподобные образования могут формироваться и под действием внешних летучих органических соединений (VOC), присутствующих в техногенной среде. Некоторые VOC, такие как спирты, альдегиды и поверхностно-активные вещества (например, из чистящих средств, парфюмерии или строительных материалов), обладают амфильтальными свойствами и при достаточной концентрации способны к самосборке в водной среде аэрозольных частиц. Данные экзогенные мицеллы могут модифицировать поверхность PM2.5, изменения их заряд, гидрофильность и способность к связыванию с биологическими молекулами. В ряде случаев это может усиливать стабильность вирус-ассоциированных аэрозолей, повышая их инфекционный потенциал.

В этой связи также следует коснуться неблагоприятного медико-биологического аспекта транспорта патогенов мелкодисперсными частицами. Как отмечалось, PM2.5 частицы благодаря своему малому размеру способны проникать глубоко в дыхательную систему – вплоть до альвеол легких – и даже попадать в кровеносную систему [8], о чем свидетельствует прошедшая эпидемия COVID-19 [12], а также собранные в табл. 1 данные по глубине проникновения аэрозольных частиц разного размера в дыхательную систему и производимому инфицирующему эффекту.

Таблица 1

Пути осаждения частиц от размера частиц [13–17]

Размер частиц	Путь осаждения частиц в дыхательных путях	Риск инфекции
> 10 мкм	Носоглотка	Низкий
5 – 10 мкм	Верхние дыхательные пути	Умеренный
1 – 5 мкм	Легкие, бронхи, альвеолы	Высокий
< 1 мкм	Могут выдыхаться обратно	Средний

Как видно из этой таблицы, PM2.5 частицы преимущественно проникают в глубокие отделы дыхательной системы, где снижена эффективность естественных барьерных механизмов защиты дыхательных путей от проникновения патогенов [18]. Например, альвеолярная зона характеризуется повышенной уязвимостью к инфекционным агентам по ряду анатомо-физиологических и иммунологических причин. С одной стороны, альвеолярно-капиллярная мембрана, отвечающая за газообмен, отличается минимальной толщиной и высокой проницаемостью, что делает ее потенциально доступной для транслегочного проникновения вирусных частиц, особенно при их ассоциации с мелкодисперсными носителями. С другой стороны, в этой зоне отсутствует развитая мукоцилиарная система – основной механизм механической защиты дыхательных путей, – что ограничивает способность организма к быстрому удалению инородных частиц [19]. Кроме того, местный иммунный надзор в альвеолах, хотя и представлен специализированными клетками, такими как альвеолярные макрофаги и дендритные клетки, отличается более умеренной активностью по сравнению с верхними дыхательными путями, где сильнее выражена продукция антимикробных пептидов, секреторного иммуноглобулина A и провоспалительных медиаторов.

Таким образом, вирусы, связанные с частицами PM2.5, имеют возможность распространяться на значительные расстояния, при этом доставляя патогены в анатомически уязвимые и иммунологически менее защищенные участки респираторного тракта. Именно поэтому представляется необходимым непрерывный мониторинг мелкодисперсных аэрозолей в наиболее уязвимых местах, что может быть осуществлено с помощью разрабатываемого устройства.

Физико-технические принципы измерений и их реализация

Учитывая перечисленные физико-химические закономерности, определяющие формирование, стабильность и транспорт биологически активных аэрозолей, предлагается многопараметрическая система мониторинга, позволяющая в режиме реального времени оценивать совокупность факторов, создающих условия для накопления и сохранения жизнеспособности вирус-ассоциированных аэрозолей; принципиальная схема этой системы приведена на рис. 3. Данное устройство построено вокруг микроконтроллера Arduino Mega, выбранного благодаря наличию четырех аппаратных UART-интерфейсов, достаточному объему оперативной и флэш-памяти, а также высокой совместимости с разнородными сенсорами. Архитектура реализована по принципу распределенного сбора данных: каждый измерительный компонент функционирует автономно, генерируя аналоговый или цифровой сигнал, обусловленный физическим механизмом взаимодействия с окружающей средой: оптическим рассеянием, инфракрасным поглощением, электрохимической реакцией, термосопротивлением или эффектом Холла, – который преобразуется в количественное значение параметра, определяющего условия, благоприятные для формирования и устойчивости инфекционных аэрозольных комплексов. Центральный микроконтроллер выполняет синхронизацию, обработку, временную привязку и передачу данных, обеспечивая устойчивую работу в условиях одновременного опроса нескольких последовательных устройств.

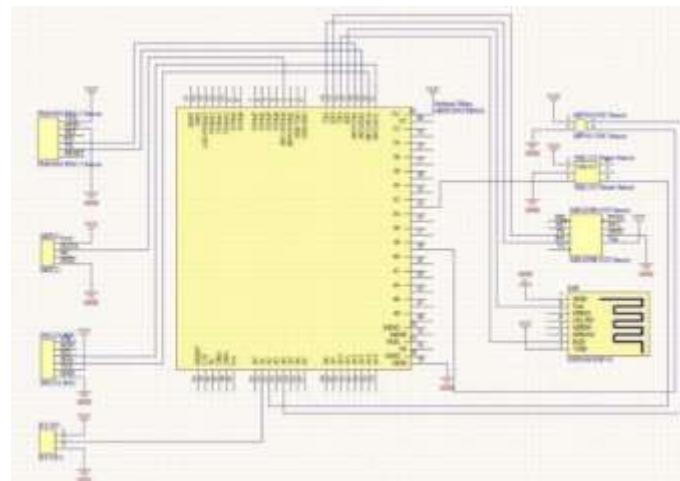


Рис. 3. Схема подключения проекта.

Каждый сенсор в системе выбран с учетом его вклада в оценку условий, способствующих образованию, стабилизации и переносу биоаэрозолей, как потенциальных переносчиков патогенов. При этом акцент сделан не только на измерении концентраций, но и на выявлении физико-химических механизмов, лежащих в основе долгоживучести и инфекционного потенциала мелкодисперсных аэрозолей.

Сенсорная сеть интегрирована с учетом специфики интерфейсов, а также уровней сигналов и требований к питанию. Цифровые датчики, использующие протоколы *UART* и *I²C*, подключены к соответствующим аппаратным портам микроконтроллера, а аналоговые — к входам аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Такое распределение обеспечивает не только корректное функционирование каждого компонента в его номинальном режиме, но и устойчивую синхронизацию и независимость потоков данных, что необходимо для непрерывного мониторинга. Использование аппаратных *UART*-интерфейсов для датчиков *PM2.5* (*PMS5003*) и *CO₂* (*MH-Z19B*) позволяет организовать параллельный прием данных по отдельным последовательным каналам, исключая задержки, характерные для программной эмуляции протоколов. Поскольку оба датчика работают при напряжении 3,3 В, а логические уровни *Arduino Mega* рассчитаны на 5 В, на линиях приема данных (*RX*) установлены резистивные делители напряжения, предотвращающие превышение предельно допустимого уровня на входах микроконтроллера. Это защищает плату от повреждения и обеспечивает надежную передачу данных без искажений. Благодаря выделенным интерфейсам, точной временной синхронизации и отсутствию конкуренции за доступ к шине, система обеспечивает стабильный, циклический и синхронизированный сбор данных от всех сенсоров, даже при длительной работе в условиях переменной электромагнитной обстановки.

Датчик *PM2.5* (*PMS5003*) основан на методе лазерного рассеяния света: встроенный вентилятор обеспечивает стабильный поток воздуха через измерительную камеру, где частицы рассеивают свет от лазерного диода, а фотодетектор регистрирует интенсивность сигнала, пропорциональную концентрации частиц, как это показано на рис. 4 [20]. Диапазон измерений находится в пределах 0–500 мкг/м³, погрешность составляет $\pm 10\%$ при концентрации выше 100 мкг/м³ и ± 10 мкг/м³ при низких значениях концентрации. Увеличение уровня *PM2.5* сигнализирует о накоплении биоаэрозолей, выделяемых при дыхании и кашле.

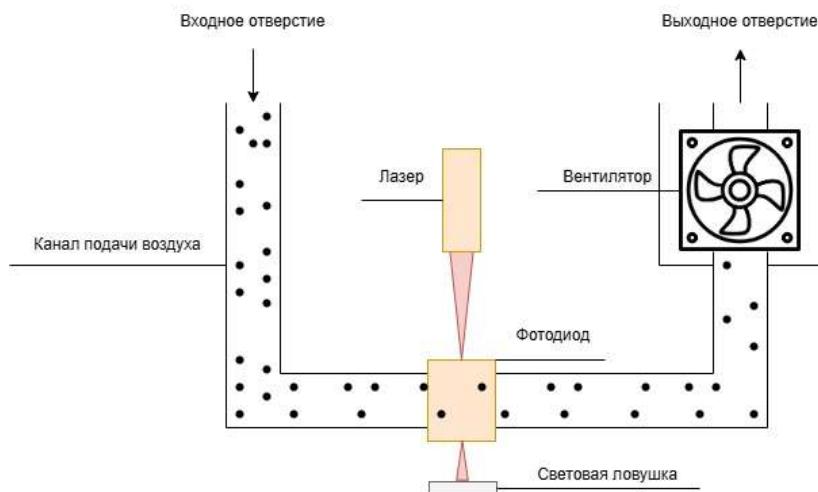


Рис. 4. Схема работы датчика PMS5003.

Датчик CO_2 (MH-Z19B) использует недисперсионный инфракрасный метод: молекулы углекислого газа поглощают инфракрасное излучение на длине волны 4,26 мкм, и степень поглощения пропорциональна его концентрации; для наглядности этот процесс изображен на рис. 5 [21]. В рассматриваемом случае диапазон измерений составляет 400–5 000 ppm, а погрешность – $\pm(50 \text{ ppm} + 3\% \text{ от измеренного значения})$. Рост CO_2 указывает на недостаточный воздухообмен и высокую плотность людей, что создает условия для накопления инфекционных аэрозолей.

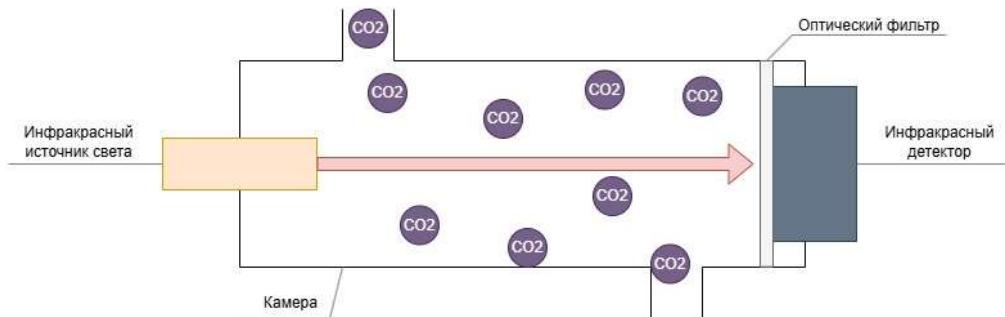


Рис. 5. Схема работы датчика MH-Z19B.

Аналоговые датчики озона (MQ131), летучих органических соединений (MP503) и магнитного поля (KY-035) подключены к отдельным аналоговым входам, что исключает взаимное влияние и позволяет проводить независимую калибровку каждого канала. Датчик озона (MQ131) представляет собой электрохимический сенсор на основе полупроводникового оксида олова, чувствительного к O_3 ; его диапазон составляет 10–1 000 ppb, а погрешность – $\pm 15\%$ при 25 °C и 60 % влажности (см. рис. 6) [22]. Озон, хотя и используется для обеззараживания, в приземном слое оказывает токсическое действие на слизистые, снижая устойчивость к инфекциям [23].

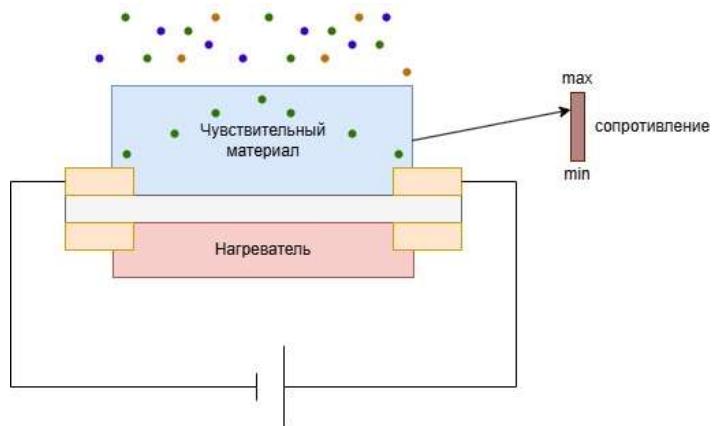


Рис. 6. Схема работы датчика озона.

Датчик летучих органических соединений (MP503) представляет собой полупроводниковый газовый сенсор, чувствительный к широкому спектру летучих органических соединений, таких как спирты, формальдегид, изобутан и метаналь, которые испаряются в воздух из бытовой химии, строительных материалов, косметики и освежителей воздуха (см. рис. 7). Контроль данных компонент необходим из-за того, что повышенная концентрация VOC может оказывать негативное влияние на самочувствие человека, вызывая головные боли, раздражение глаз и кожи, усталость и снижение концентрации внимания.

Однако с точки зрения формирования биоаэрозолей ключевое значение имеют не столько гигиенические, сколько физико-химические свойства этих соединений. Кроме того, VOC могут модифицировать уже существующие мицеллоподобные агрегаты, образованные компонентами легочного сурфактанта, изменяя их заряд, размер и устойчивость. В зависимости от химической природы соединений, этот процесс может как усиливать, так и подавлять стабильность вирус-ассоциированных аэрозолей. Например, спирты и альдегиды способны разрушать липидные структуры, в то время как длинноцепочечные углеводороды и некоторые поверхностно-активные вещества способствуют их агрегации. Таким образом, мониторинг VOC приобретает не только экологическое, но и патогенетическое значение – он позволяет оценивать условия, способствующие формированию устойчивых инфекционных аэрозольных комплексов через механизм мицеллообразования. Диапазон чувстви-

тельности датчика составляет $10\text{--}1\,000\text{ ppm}$ в зависимости от типа газа, погрешность – до $\pm 20\text{--}30\%$ и зависит от температуры и влажности, что учитывается при калибровке и интерпретации данных.

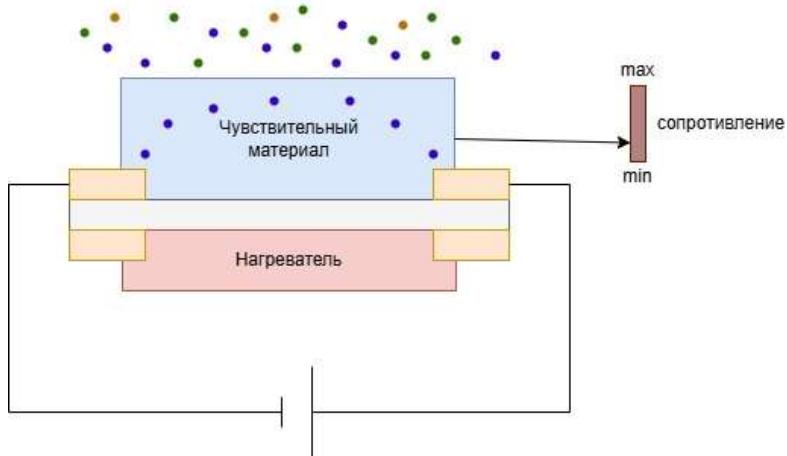


Рис. 7. Схема работы датчика MP503.

Цифровой датчик температуры и влажности *DHT22* подключен к одному из цифровых pinов и взаимодействует с микроконтроллером по однопроводному протоколу, требующему точной синхронизации, реализованной на уровне программного обеспечения. Он измеряет температуру в диапазоне от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ с погрешностью $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и влажность от 0 до 100 % с погрешностью $\pm 2\%$ [24]. Эти параметры напрямую влияют на скорость испарения аэрозольных капель и стабильность вирусов, особенно в условиях низкой или высокой влажности.

Модуль часов реального времени *DS3231* интегрирован по шине $I^2\text{C}$, что позволяет обеспечивать точную временную привязку каждого измерения [25]. Его термокомпенсированный кварцевый резонатор обеспечивает высокую точность – $\pm 2\text{ ppm}$ при $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соответствует отклонению не более одной минуты в год (модуль работает автономно от резервной батарейки *CR2032*, гарантируя сохранение времени даже при длительном отключении основного питания).

Для передачи данных в режиме реального времени используется *Wi-Fi* модуль *ESP-01*, подключенный к третьему аппаратному *UART* [26]. Это позволяет организовать независимый канал передачи без вмешательства в работу других последовательных устройств. Модуль обеспечивает отправку структурированных данных в формате *JSON* на облачную платформу, что открывает возможность удаленного мониторинга и интеграции в системы умного здания.

Сбор данных выполняется циклически с интервалом 1 мин. Микроконтроллер последовательно инициирует опрос каждого сенсора, получает «сырые» значения и преобразует их в физические величины с использованием калибровочных коэффициентов, заложенных в программную обработку. Для датчиков с нелинейной характеристикой, таких как *MP503* и *MQ131*, применяются аппроксимации на основе экспоненциальных и степенных зависимостей, полученных при предварительной настройке и сопоставлении с фоновыми условиями. Полученные данные фильтруются с помощью скользящего среднего (окно 5 точек) для подавления кратковременных выбросов, вызванных помехами, локальными воздушными потоками или кратковременными изменениями микроклимата. Затем значения собираются в структурированный пакет, включающий все измеренные параметры, точную временную метку от *DS3231* и контрольную сумму. Пакет передается на удаленный сервер в формате *JSON*, что обеспечивает простоту парсинга, интеграцию с облачными платформами и возможность визуализации в виде временных рядов и графиков.

Для обеспечения отказоустойчивости и непрерывности мониторинга реализован кольцевой буфер в оперативной памяти, сохраняющий последние 24 ч измерений – около 1 440 записей. Это позволяет сохранять данные даже при кратковременных сбоях в сети. После восстановления соединения система автоматически передает накопленные данные на сервер, что обеспечивает целостность экспериментальных данных и возможность анализа динамики параметров на фоне изменяющихся условий эксплуатации и возможность последующего анализа временных зависимостей в условиях длительного мониторинга. Такой подход гарантирует установление закономерностей, связанных с режимом работы помещений, активностью людей и эффективностью вентиляции.

Калибровка датчиков проводилась в условиях, приближенных к реальным: измерения в открытом воздухе использовались как ориентир для *PM2.5* и *CO₂*, показания температуры и влажности – для сопоставления с данными локальной метеостанции, а уровни *VOC* и *O₃* – для оценки фона в помещениях с различной техногенной нагрузкой. Однако, поскольку калибровка выполнялась без использования поверенных эталонных приборов, ее следует рассматривать как функциональную настройку, направленную на согласованность работы компонентов, а не как метрологическую аттестацию. Это означает, что система пригодна для отслеживания относитель-

ных изменений параметров во времени, но не предназначена для выполнения метрологически достоверных абсолютных измерений, требующих специализированной калибровки и аттестации измерительных каналов. Тем не менее, для задач мониторинга условий, способствующих накоплению биоаэрозолей, такая точность является достаточной, поскольку ключевым является не абсолютное значение, а динамика изменения параметров и их корреляция с активностью людей и состоянием вентиляции.

Электропитание организовано от внешнего диммируемого блока питания (5 В, 2 А), подключенного к разъему Arduino Mega. Напряжение проходит через встроенный стабилизатор платы, обеспечивающий стабильные 5 В на выходе. Все компоненты системы: датчики, модуль RTC, Wi-Fi-передатчик – запитываются исключительно от этого стабилизированного источника, что гарантирует электрическую совместимость, устойчивость к колебаниям входного напряжения и защиту чувствительных аналоговых цепей. Такая схема распределения питания упрощает конструкцию, снижает риск повреждения элементов и обеспечивает надежную работу в различных эксплуатационных сценариях – как от сетевого адаптера, так и от резервированных источников.

Схема на *рис. 8* отражает реализованную топологию соединений, включая цепи питания, интерфейсы связи и разводку сигналов. Особое внимание удалено минимизации пересечений линий, экранированию чувствительных аналоговых трасс и раздельной прокладке силовых и сигнальных цепей. Это обеспечивает электромагнитную совместимость, устойчивость к помехам и стабильную работу системы в условиях техногенной среды, насыщенной источниками электромагнитных полей и переменных токов.

Каждый измерительный компонент системы выбран с учетом его вклада в оценку условий, способствующих образованию, стабилизации и переносу биоаэрозолей как носителей патогенов.

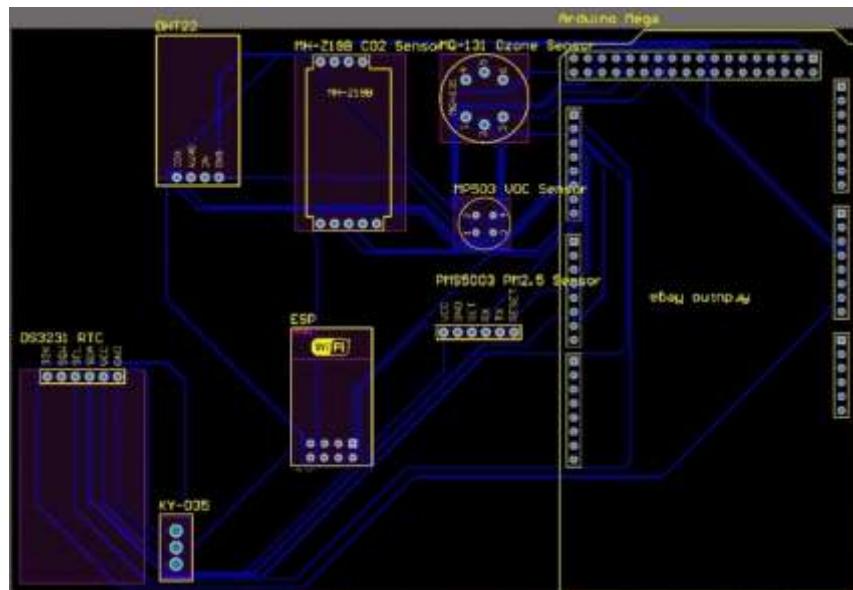


Рис. 8. Принципиальная схема печатной платы.

Результаты

Описанная система для оценки параметров воздушной среды, определяющих условия формирования и накопления биоаэрозолей, была использована в серии тестовых измерений в реальных условиях: в жилых, офисных и общественных помещениях, с акцентом на учебные корпуса университета. Настоящие исследования проводились в летний период, когда отсутствует основной контингент студентов, но в присутствии административного состава сотрудников. Это позволило провести сравнительный анализ воздушной среды в помещениях с различной степенью заполненности и длительностью пребывания людей: офисные кабинеты (2–4 человека, длительное пребывание), комнаты ожидания (до 10–15 человек одновременно, умеренная продолжительность), коридоры и холлы (высокая проходимость, кратковременные задержки).

Для устранения внешних помех при проведении измерений система устанавливалась с учетом рекомендаций по размещению сенсоров, обеспечивающих репрезентативность измерений: устройство размещалось на столе в центре помещения, на высоте около 1,2 м от пола, на расстоянии не менее 1 м от окон и дверей. Данные фиксировались с временным интервалом в 1 мин.

В ходе мониторинга регистрировались следующие параметры: концентрация взвешенных частиц *PM2.5*, объемная доля *CO₂*, относительная влажность и температура воздуха, а также уровни летучих органических соединений (*VOC*) и озона. Дополнительно регистрировались временные интервалы проветривания, что использовалось при интерпретации изменений концентраций загрязняющих веществ.

В жилых помещениях при численности 1–2 человека наблюдалось постепенное накопление CO_2 в течение дня. Начальные значения (~500 ppm) увеличивались до 700–900 ppm за 3–4 ч при отсутствии интенсивного воздухообмена. После проветривания концентрация CO_2 снижалась до фоновых значений в течение 10–15 мин. Уровень $PM2.5$ оставался относительно стабильным (10–20 мкг/м³), за исключением кратковременных всплесков, связанных с бытовыми потребностями людей или использованием пылевыделяющего оборудования.

В офисных кабинетах, где одновременно находилось 2–4 человека, концентрация CO_2 достигала 1 000–1 200 ppm к концу рабочего дня, что указывает на недостаточный воздухообмен при длительной эксплуатации помещений. Уровень $PM2.5$ находился в диапазоне 20–35 мкг/м³, что может быть обусловлено постоянным присутствием людей, а также выбросами мелкодисперсных частиц от оргтехники и бумажных материалов. Показатели VOC демонстрировали умеренный рост в течение рабочего времени, вероятно, вследствие десорбции органических соединений с поверхностей мебели и канцелярских принадлежностей.

Наиболее выраженные изменения зафиксированы в помещениях приемной комиссии, где одновременно присутствовало от 8 до 15 человек. В таких условиях концентрация CO_2 достигала 1 400–1 800 ppm уже через 1–1,5 ч, что свидетельствует о значительной нагрузке на вентиляционную систему. Уровень $PM2.5$ возрастал до 50–70 мкг/м³, что может быть связано как с механическим поднятием пыли при перемещении людей, так и с выделением аэрозольных частиц в процессе дыхания и речи. Также отмечался значительный рост содержания VOC , что указывает на усиление обмена летучими веществами в условиях высокой плотности пребывания людей.

После проведения проветривания во всех типах помещений наблюдалось снижение концентраций загрязняющих веществ. Уровень CO_2 уменьшался на 30–40 % в течение первых 15 мин, что соответствует эффективному газообмену. Снижение $PM2.5$ происходило медленнее – на 15–20 % за тот же период, что объясняется инерционностью аэрозольных систем и более длительным временем седиментации и удаления взвешенных частиц. Динамика VOC характеризовалась временной задержкой в снижении, что может быть обусловлено вторичной десорбцией ранее адсорбированных соединений с поверхностей стен, мебели и одежды.

На основании полученных данных построены временные зависимости концентрации $PM2.5$ (рис. 7) и CO_2 (рис. 8) в помещениях с различной заполняемостью и назначением: бытовым (1–2 чел.), административным (3–5 чел.) и общественным (8–15 чел.).

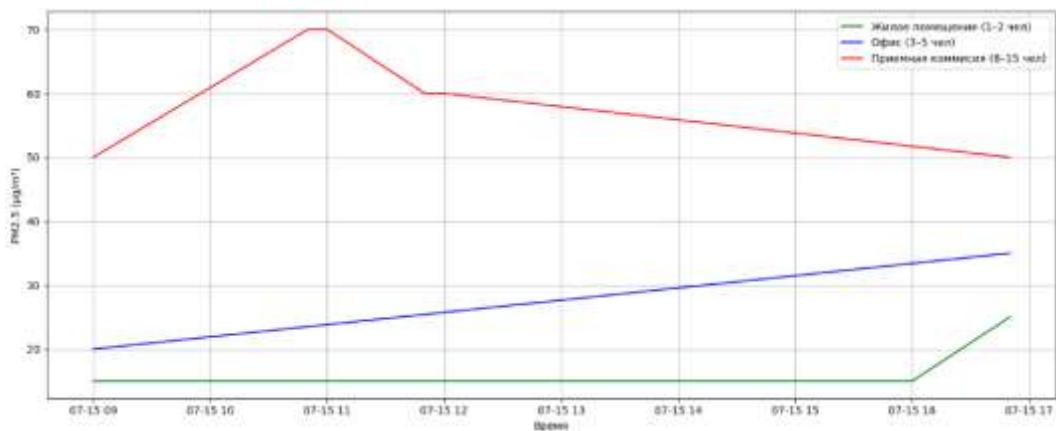


Рис. 9. Динамика уровня $PM2.5$ в разных помещениях.

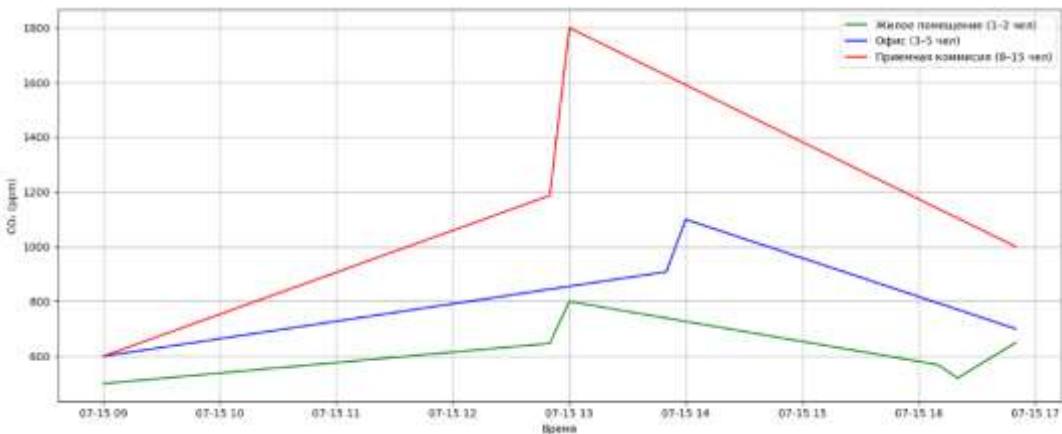


Рис. 10. Динамика уровня CO_2 в разных помещениях.

Как видно из *рис. 9*, в жилом помещении уровень $PM_{2.5}$ сохранялся на уровне $\sim 15 \text{ мкг}/\text{м}^3$ в течение большей части дня. К вечеру зафиксирован умеренный рост до $\sim 25 \text{ мкг}/\text{м}^3$, что может быть связано с увеличением активности людей, находящихся в этом месте. В офисных помещениях наблюдается постепенное повышение $PM_{2.5}$ от 20 до $35 \text{ мкг}/\text{м}^3$, соответствующее накоплению аэрозолей в условиях постоянного человеческого присутствия. В помещениях приемной комиссии отмечены наиболее высокие значения – до $70 \text{ мкг}/\text{м}^3$, с последующим снижением на 15–20 % после проветривания.

На *рис. 10* представлено изменение концентрации CO_2 в течение рабочего дня. В жилом помещении отмечается умеренный рост с 500 до 800 ppm в первой половине дня с последующим восстановлением после проветривания. К вечеру значения вновь повышаются до $\sim 650 \text{ ppm}$. В офисах CO_2 возрастает до $1\,100 \text{ ppm}$ к концу рабочего дня, снижаясь после вентиляции до комфортного уровня. В общественных помещениях рост CO_2 наиболее интенсивен: уже через 1–1,5 ч концентрация достигает $1\,400\text{--}1\,800 \text{ ppm}$, что указывает на высокую степень скопления людей и недостаточную эффективность естественной вентиляции [27–28].

Эти предварительные измерения подтвердили работоспособность разработанной системы в реальных условиях эксплуатации. Устройство обеспечивает стабильный сбор и передачу данных, позволяя отслеживать динамику параметров воздушной среды в зависимости от внешних факторов. Наиболее значительные изменения зарегистрированы в помещениях с высокой плотностью людей, что с учетом риска передачи вирусов воздушно-капельным путем подчеркивает необходимость непрерывного мониторинга качества воздуха в образовательных и общественных учреждениях.

Заключение

Аэрозольные частицы, особенно фракции $PM_{2.5}$, обладающие развитой поверхностью, полярными функциональными группами и способностью к зарядке, могут быть переносчиками биологически активных агентов из-за их уникальной способности адсорбировать и поддерживать инфицирующую способность вирусов и бактерий при их транспортировке на значительные расстояния. В условиях замкнутых пространств, где современный человек проводит подавляющую часть времени, такие аэрозоли становятся ключевым звеном в цепи передачи респираторных инфекций, особенно при недостаточной вентиляции и высокой плотности пребывания людей.

При этом стабильность и жизнеспособность патогенов в аэрозольной фазе определяются сложным сочетанием микрофизических факторов: температуры, влажности, состава жидкой матрицы и электрических свойств частиц. Важную роль играют мицеллоподобные структуры, формирующиеся как за счет компонентов легочного сурфактанта, так и под действием экзогенных летучих органических соединений (*VOC*). Данные структуры снижают скорость испарения респираторных капель, предотвращают дегидратацию липидной оболочки вирусов и создают защитную среду, способствующую длительному сохранению инфекционного потенциала. Наличие у аэрозолей эффективного заряда или дипольного момента позволяет им взаимодействовать с естественными и техногенными электрическими полями, включая поле Земли, что может приводить к электростатической левитации, т.е. значительному увеличению времени их пребывания в воздухе, а значит к расширению зоны, где может происходить заражение. Все это еще раз подчеркивает необходимость контроля воздуха в реальном режиме времени, что и стало объектом настоящей работы.

Для решения этой задачи было разработано устройство на базе микроконтроллера *Arduino Mega*, которое реализует многопараметрический подход к мониторингу, позволяя в режиме реального времени оценивать совокупность факторов, создающих условия для накопления и сохранения жизнеспособности вирус-ассоциированных аэрозолей. Измерение концентрации $PM_{2.5}$, уровня CO_2 , *VOC*, озона, температуры и влажности, а также временная привязка данных обеспечивают не только оценку качества воздуха, но и выявление режимов, при которых создаются благоприятные условия для формирования инфекционных аэрозольных комплексов. Предварительные экспериментальные данные, полученные в помещениях с различной посещаемостью, подтверждают, что в условиях высокой плотности людей и слабой вентиляции наблюдается значительный рост как $PM_{2.5}$, так и CO_2 , сопровождающийся увеличением *VOC*, что указывает на активный обмен органическими соединениями и, как следствие, на создание условий, способствующих формированию мицеллоподобных структур и сохранению жизнеспособности вирусных частиц.

Таким образом, непрерывный мониторинг микроклимата становится не просто инструментом экологического контроля, а профилактической мерой, направленной на снижение риска передачи инфекций. Предложенное решение демонстрирует, как современные технологии могут быть интегрированы в систему управления воздушной средой для создания безопасных условий в образовательных, медицинских и общественных учреждениях. Его реализация открывает возможности для разработки локальных систем предупреждения, способных не только фиксировать текущее состояние, но и прогнозировать переход в режим повышенного риска. В условиях, когда воздушно-капельные инфекции продолжают оказывать значительное влияние на общественное здоровье, такие подходы могут обеспечить переход от пассивного наблюдения за окружающей средой к активному контролю за микросредой обитания человека.

Также следует отметить, что аналогичные физико-химические закономерности могут проявляться и в других дисперсных системах, в частности в нефтяных средах, где кавитационные процессы, инициированные аку-

стическими полями и гидродинамическими нестабильностями, приводят к формированию и разрушению макромолекулярных структур. Причем в респираторных аэрозолях и в нефтяных эмульсиях ключевую роль играют слабые межчастичные взаимодействия, чувствительность к внешним полям и способность к самоорганизации в ответ на изменения термодинамических параметров. Данная особенность указывает на возможность развития единого физико-технического подхода к управлению процессами структурообразования в различных коллоидных системах. Например, если в нефтяных потоках акустическое воздействие используется для модификации структуры среды, то в воздушной среде электрические и гидродинамические поля могут способствовать накоплению и транспорту биоаэрозолей. Это наводит на мысль, что разработанный метод мониторинга и контроля дисперсных систем может быть использован для анализа газов, выделяющихся при разработке нефти.

ЛИТЕРАТУРА

1. Klepeis N. E., Nelson W. C., Ott W. R. et al. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants // *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*. 2001. Vol. 11. No. 3. P. 231–252.
2. Morawska L., Johnson G. R., Ristovski Z. D., et al. Size distribution of cough-generated aerosol particles during expiratory activities // *Journal of Aerosol Science*. 2009. Vol. 40. No. 3. P. 234–244.
3. Morawska L., Cao J., Rautou P.-Y., et al. Aerosol transmission of SARS-CoV-2: Evidence and implications for infection prevention and control // *Environment International*. 2020. Vol. 142. A. 105902.
4. Stadnytskyi V., Bax C. E., Bax A., Anfinrud P. The airborne lifetime of small speech droplets and their potential importance in SARS-CoV-2 transmission // *PNAS*. 2020. Vol. 117. No. 22. P. 11875–11877.
5. Qian H., Miao T., Liu L., et al. Indoor transmission of SARS-CoV-2 // *Indoor Air*. 2021. Vol. 31. No. 3. P. 636–642.
6. Nazaroff W. W. Indoor bioaerosol dynamics // *Indoor Air*. 2016. Vol. 26. No. 1. P. 61–78.
7. Seinfeld J. H., Pandis S. N. *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change*. 3rd ed. Hoboken: Wiley, 2016. 1152 p.
8. Ланге-Штабель А., Виллеман Х. *Физиология дыхания* / пер. с нем. М.: Медицина, 1975. 552 с. [Lange-Schtabel A., Willeman H. *Physiology of respiration*. Moscow: Meditsina, 1975. 552 p.]
9. Chalmers J. A. *Atmospheric Electricity*. 2nd ed. Oxford: Pergamon Press, 1967. 397 p.
10. Rycroft M. J., Israelsson S., Price C. The global atmospheric electrical circuit, solar activity and climate change // *Surveys in Geophysics*. 2000. Vol. 21. No. 1. P. 41–54.
11. Смирнов Б. М. Электрический цикл в земной атмосфере // *Успехи физических наук*. 2014. Т. 184. №11. С. 1153–1176. [B. M. Smirnov Electric cycle in Earth atmosphere // *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. 2014. Vol. 184. No. 11. P. 1153–1176].
12. Bourouiba L. Turbulent gas clouds and respiratory pathogen emissions: Potential implications for reducing transmission of COVID-19 // *JAMA*. 2020. Vol. 323. No. 18. P. 1837–1838.
13. Clift R., Grace J. R., Weber M. E. *Bubbles, drops, and particles*. New York: Academic Press, 1978. 380 p.
14. Yezli S., Otter J. A. Minimum infective dose of the major human respiratory and enteric viruses transmitted through food and the environment // *Food and Environmental Virology*. 2011. Vol. 3. No. 1. P. 1–30.
15. Prussin A. J., Marr L. C. Sources and fate of airborne microorganisms and their interactions with particulate matter and atmospheric gases // *Environmental Reviews*. 2015. Vol. 23. No. 1. P. 1–10.
16. Cheng Y. S. Aerosol deposition in the human respiratory tract // *Journal of Aerosol Science*. 2003. Vol. 34. No. 6. P. 651–661.
17. Tellier R., Li Y., Cowling B. J., Tang J. W. Recognition of aerosol transmission of infectious agents: a commentary // *BMC Infectious Diseases*. 2019. Vol. 19. No. 1. P. 1–10.
18. Johnson G. R., Morawska L., Ristovski Z. D., et al. Modality of human expired aerosol size distributions // *Journal of Aerosol Science*. 2011. Vol. 42. No. 12. P. 839–851.
19. Asadi S., Wexler A. S., Cappa C. D., et al. Aerosol emission and superemission during human speech in comparison with breathing and coughing // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. Art. 2348.
20. Plantower. PMS5003 Series Particulate Matter Sensor Datasheet. Zhengzhou: Plantower Co., 2020. 15 p. [webpage]. URL: <https://www.plantower.com>
21. Winsen. MH-Z19B CO₂ Sensor Datasheet. Henan: Winsen Sensor Technology Co., 2015. 12 p. [webpage]. URL: <https://www.winsen-sensor.com>
22. Chen C., Zhao B. Review of the secondary organic aerosols formation from indoor ozone-terpene reactions // *Indoor Air*. 2011. Vol. 21. No. 1. P. 2–15.
23. Hanwei Electronics. MQ131 Ozone Sensor Datasheet. Shenzhen: Hanwei Electronics Co., 2018. 8 p. [webpage]. URL: <https://www.hwsensor.com>
24. Adafruit. DHT22 Temperature and Humidity Sensor Datasheet. New York: Adafruit Industries, 2020. 10 p. [webpage]. URL: <https://www.adafruit.com/product/385>
25. Maxim Integrated. DS3231 Precision RTC with Integrated Crystal Datasheet. San Jose: Analog Devices, Inc., 2018. 40 p. [webpage]. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/DS3231.pdf>
26. Espressif Systems. ESP8266 Datasheet. Shanghai: Espressif Systems (Shanghai) Co., 2021. 68 p. [webpage]. URL: <https://www.espressif.com>
27. Li Y., Leung G. M., Tang J. W., et al. Role of air change rate, particle filtration, and mask use in controlling aerosol transmission in buildings // *Indoor Air*. 2007. Vol. 17. No. 1. P. 1–11.
28. CEN. EN 13779:2017. Ventilation for non-residential buildings. Brussels: European Committee for Standardization, 2017. 108 p.

Поступила в редакцию 05.09.2025 г.

CONTINUOUS MONITORING OF FINE-DISPERSED AEROSOLS IN TECHNOGENIC ENVIRONMENTS

**M. A. Solomatin^{1*}, A. R. Karimov^{1,2}, M. V. Malashin¹,
R. A. Valiullin³, R. F. Sharafutdinov³**

¹*National Research Nuclear University MEPhI
31 Kashirskoe shosse, 115409 Moscow, Russia.*

²*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences
Bldg. 2, 13 Izhorskaya st., 125412 Moscow, Russia.*

³*Ufa University of Science and Technology
32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*

Indoor air quality plays a crucial role in maintaining human health and preventing respiratory infections. In conditions of high population density, the concentration of bioaerosols – microscopic particles released during breathing, speaking, and coughing – increases significantly, and these particles can act as carriers of pathogens. The $PM_{2.5}$ fraction, which includes particles with a diameter of less than $2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, is of particular importance due to its ability to deeply penetrate the respiratory tract and remain suspended in the air for extended periods. This paper presents the results of measurements of indoor air parameters ($PM_{2.5}$, CO_2 , VOC , temperature, humidity) conducted using a custom-developed device in residential, office, and public spaces. It is shown that under conditions of high occupancy, a significant increase in $PM_{2.5}$ and CO_2 concentrations occurs, correlating with human activity and ventilation patterns. The $PM_{2.5}$ levels in crowded rooms were found to reach up to $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, while CO_2 concentrations exceeded 1 800 ppm, indicating insufficient ventilation. The obtained data confirm that monitoring $PM_{2.5}$ in combination with CO_2 and VOC enables the assessment of bioaerosol accumulation and the identification of potentially hazardous conditions. The developed device demonstrates high sensitivity and suitability for integration into early warning systems for airborne transmission of infectious diseases.

Keywords: indoor air quality; bioaerosols; $PM_{2.5}$; real-time monitoring; CO_2 ; volatile organic compounds (VOC); ventilation; respiratory infections; airborne transmission.

Received 05.09.2025.

Об авторах / about the authors

Каримов Александр Рашатович

доктор физико-математических наук,
профессор кафедры электрофизических установок,
ИЯФИТ.
arkarimov@mephi.ru

Соломатин Михаил Андреевич

старший преподаватель
кафедры электрофизических установок, ИЯФИТ.
MASolomatin@mephi.ru

Малашин Максим Владимирович

доцент кафедры электрофизических установок.
ИЯФИТ.
MVMaslashin@mephi.ru

Валиуллин Рим Абдуллович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой геофизики,
Уфимский университет науки и технологий.
valra@yandex.ru

Шарифутдинов Рамиль Фаизырович

доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры геофизики,
Уфимский университет науки и технологий.
gframil@inbox.ru

Karimov Aleksandr Rashatovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor of the Department of Electrophysical Installations,
Institute of Nuclear Physics and Technology.
arkarimov@mephi.ru

Solomatin Mikhail Andreevich

Senior Lecturer of the Department
of Electrophysical Installations,
Institute of Nuclear Physics and Technology.
MASolomatin@mephi.ru

Malashin Maxim Vladimirovich

Associate Professor of the Department
of Electrophysical Installations,
Institute of Nuclear Physics and Technology.
Joint Institute for High Temperatures
of the Russian Academy of Sciences.
MVMaslashin@mephi.ru

Valiullin Rim Abdullovich

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Head of the Department of Geophysics,
Ufa University of Science and Technology.
valra@yandex.ru

Sharafutdinov Ramil Faizyrovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,
Professor in the Department of Geophysics,
Ufa University of Science and Technology.
gframil@inbox.ru