1.5.15 Экология

Научная статья

УДК 504.054:502.53

СИСТЕМА НИЗКОБЮДЖЕТНОГО МОНИТОРИНГА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ПРОМЫШЛЕННОЙ ЗОНЫ

Шидло Елена Владимировна, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Ботанический сад-институт ДВО РАН, Амурский филиал, лаборатория интродукции, Россия, Благовещенск, elena.shidlo@yandex.ru;

Здравчев Никита Сергеевич, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН, Лаборатория тропических растений, Россия, Москва, n.zdravchev@mail.ru

Аннотация. Традиционные системы государственного контроля качества воздуха не способны фиксировать локальные пики загрязнения вблизи промышленных объектов из-за низкой пространственной плотности постов. Агрессивные факторы производственной среды дополнительно усложняют эксплуатацию чувствительного оборудования. В работе предложен подход к организации распределенного экологического мониторинга санитарно-защитной зоны предприятия с применением сетей бюджетных сенсоров. Измерительные узлы были размещены для регистрации концентраций PM2,5, PM10, NO_2, SO_2, CO и летучих органических соединений с учетом розы ветров и расположения источников выбросов. Для компенсации температурно-влажностного дрейфа и выявления залповых выбросов разработаны алгоритмы машинного обучения на базе изоляционного леса. Шестимесячный вычислительный эксперимент показал высокую согласованность скорректированных показаний сети с данными референсной станции: коэффициент детерминации R^2 составил от 0,82 до 0,91. Предложенный алгоритм позволил локализовать неорганизованные источники с минимальным временем отклика и долей ложных тревог менее 6 %. Практическая значимость работы заключается в возможности использования построенных тепловых карт

для обоснованного пересмотра границ санитарно-защитной зоны и оперативного оповещения персонала о неисправностях газоочистного оборудования. Полученные результаты подтверждают эффективность интеграции доступных аппаратных средств и математических методов фильтрации для перехода от точечного нормативного контроля к непрерывному картированию микрозон загрязнения. Такой подход способствует снижению антропогенной нагрузки на прилегающие территории и повышению их экологической безопасности.

Ключевые слова: мониторинг атмосферного воздуха; низкобюджетные сенсоры; промышленные выбросы; калибровка датчиков; обнаружение аномалий; распределённая сеть.

Original article

LOW-COST MONITORING SYSTEM FOR AIR POLLUTION IN INDUSTRIAL ZONES

Shidlo Elena Vladimirovna, Candidate of Biological Sciences, Researcher, Botanical Garden-Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Amur Branch, Laboratory of Introduction, Blagoveshchensk, Russia, elena.shidlo@yandex.ru;

Zdravchev Nikita Sergeevich, Candidate of Biological Sciences, Researcher, N.V. Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Tropical Plants, Moscow, Russia, n.zdravchev@mail.ru

Annotation. Traditional government air quality monitoring systems are unable to detect localized pollution peaks near industrial facilities due to the low spatial density of monitoring stations. Harsh factors in the industrial environment further complicate the operation of sensitive equipment. This paper proposes an approach to organizing distributed environmental monitoring of an enterprise's sanitary protection zone using low-cost sensor networks. Researchers deployed measuring nodes to record concentrations of PM2.5, PM10, NO2, SO2, CO, and volatile organic compounds, taking into account wind patterns and the architecture of emission sources. Machine

learning algorithms based on an isolation forest were developed to compensate for temperature and humidity drift and identify burst emissions. A six-month computational experiment demonstrated high consistency between the adjusted network readings and reference station data: the R2 determination coefficient ranged from 0.82 to 0.91. The proposed algorithm localized unorganized sources with minimal response time and a false alarm rate of less than 6%. The practical significance of this work lies in the potential use of the resulting heat maps for informed revision of sanitary protection zone boundaries and prompt notification of personnel about gas purification equipment malfunctions. The results confirm the effectiveness of integrating available hardware and mathematical filtering methods to transition from point-by-point regulatory monitoring to continuous mapping of pollution microzones. This approach minimizes anthropogenic impacts on adjacent areas and ensures genuine environmental safety.

Keywords: air quality monitoring; low-cost sensors; industrial emissions; sensor calibration; anomaly detection; distributed monitoring network.

Введение. Экологическая обстановка в районах с высокой концентрацией производственных предприятий остается объектом пристального внимания исследователей, однако традиционные системы контроля качества атмосферного воздуха обладают фундаментальным ограничением. Государственные сети мониторинга опираются на стационарные посты, укомплектованные высокоточными аналитическими приборами, которые требуют значительных капиталовложений и сложного технического обслуживания [1]. Подобный подход обеспечивает высокую достоверность измерений, но страдает от крайне низкой пространственной плотности. Стационарные станции, расположенные на значительном удалении друг от друга, фиксируют усредненные фоновые показатели, но не способны уловить локальные пики загрязнения [2], что существенно снижает информативность данных в непосредственной близости от промышленных площадок [3].

Пространственная динамика загрязняющих веществ вблизи производственных объектов характеризуется выраженной микрозонной неоднородностью. Концентрации взвешенных частиц, диоксида азота и летучих органических соединений могут многократно меняться на протяжении нескольких сотен метров из-за влияния локальных источников, особенностей розы ветров и архитектурных препятствий [4], [5]. При этом специфика промышленных территорий, включающая наличие агрессивных сред, постоянных вибраций и электромагнитных помех, создает дополнительные барьеры для размещения чувствительного измерительного оборудования [6]. Существующие нормативные методики, ориентированные на сбор долгосрочных временных рядов, не позволяют в режиме реального времени выявлять и картировать зоны кратковременного экстремально высокого загрязнения, из-за чего оценка фактического экологического риска для населения и биоты на таких территориях остается недостаточно точной [7].

Преодолеть дефицит пространственных данных позволяет переход к распределенному мониторингу с использованием сетей низкобюджетных сенсоров. Современные микроэлектромеханические системы позволяют создавать компактные и экономически доступные устройства, которые можно массово размещать непосредственно в зонах наиболее интенсивного загрязнения [8-10]. В отличие от хроматографов или оптических анализаторов, требующих специализированных лабораторных условий, миниатюрные сенсорные узлы формируют плотную распределенную сеть измерений. Такой подход радикально меняет методологию экологического контроля, переводя ее от точечного наблюдения к непрерывному картированию микрозон и позволяя выявлять скрытые источники эмиссии, которые ранее оставались незамеченными из-за разреженности станций [11].

Вместе с тем широкое внедрение бюджетных измерительных средств сталкивается с проблемой их метрологической надежности. Дешевые газоанализаторы и аэрозольные счетчики подвержены перекрестной

чувствительности к метеорологическим факторам, таким как резкие колебания температуры и влажности. В жестких условиях промышленной зоны эти погрешности нарастают, что делает использование необработанных данных недопустимым для принятия природоохранных решений. Для решения этой проблемы необходима разработка интеллектуальных алгоритмов обработки данных. Математические модели, способные выявлять аномалии в потоках данных, фильтровать инструментальные шумы и компенсировать дрейф характеристик, становятся ключевым элементом современной распределенной сети [12], [13]. Сочетание плотной сенсорной сети и современных вычислительных методов позволяет преобразовывать зашумленные сигналы в достоверные данные об экологическом состоянии промышленного района.

Обзор литературы. Оценка экологических рисков для здоровья населения в промышленных регионах требует обязательного учета микрозонной неоднородности атмосферного воздуха. Традиционные государственные системы надзора опираются на стационарные аналитические комплексы, которые, как справедливо отмечают авторы, обеспечивают высокую точность, но страдают от критически низкой пространственной плотности [14-16]. Стационарные посты фиксируют усредненные фоновые концентрации, оставляя вне поля зрения локальные пики загрязнения, формирующиеся под влиянием неорганизованных источников и особенностей городской застройки. Для экологов и эпидемиологов подобный дефицит данных делает невозможной адекватную оценку индивидуальной экспозиции вредных веществ, поскольку реальные концентрации взвешенных частиц и токсичных газов могут многократно меняться на протяжении всего нескольких сотен метров [17], [18].

Преодолеть этот пространственный дефицит позволяет внедрение распределенных сетей низкобюджетных сенсоров. Развитие микроэлектромеханических систем сделало возможным массовое развертывание компактных газоанализаторов, формирующих подобие капиллярной сети измерений. Однако промышленная среда предъявляет к подобным устройствам

предельно жесткие требования. Исследователи обращают внимание на то, что постоянные вибрации, агрессивные химические среды и мощные электромагнитные поля создают экстремальные условия для работы микроэлектроники. В таких локациях бюджетные сенсоры быстро теряют метрологическую стабильность, а их показания неизбежно искажаются из-за перекрестной чувствительности к фоновым газам и резким перепадам температуры [19].

Методологическая сложность состоит в том, что для картирования экологической обстановки необходима высокая плотность измерений, тогда как доступные датчики формируют данные с высоким уровнем шума. Прямое использование сырых сигналов для принятия природоохранных решений недопустимо, поскольку это ведет к ошибочным выводам о состоянии атмосферы и рисках для биоты. Исследователи в области экологической информатики предлагают компенсировать аппаратные ограничения за счет математического моделирования [20]. Современные вычислительные подходы позволяют отделять инструментальный дрейф от реальных изменений концентрации. Особую актуальность в этом контексте приобретает задача выявления залповых выбросов. Кратковременные аномалии, которые не фиксируются разреженной сетью стационарных станций, требуют алгоритмов, способных отделять промышленные помехи от аномальных изменений концентраций в режиме, близком к реальному времени.

Материалы и методы исследования. Объектом анализа является распределённая система регистрации параметров атмосферного воздуха в промышленной и прилегающей к ней городской среде. В состав контролируемых показателей включены $PM_{2,5}$, PM_{10}, NO_2, SO_2, CO и суммарный сигнал летучих органических соединений. Для учёта влияния условий эксплуатации дополнительно регистрируются температура, относительная влажность и параметры ветра. Методическая схема включает совместные измерения низкобюджетных сенсоров и референсного оборудования в течение четырёх

недель, построение корректирующих зависимостей и последующую проверку статистической согласованности.

Проектирование сети мониторинга осуществлялось с учетом характерной для региона розы ветров, расположения основных технологических установок и границ ближайших жилых массивов. Сенсорные узлы располагаются на опорах освещения и фасадах зданий на высоте 3–4 м от поверхности земли. Указанный интервал характеризует высоту размещения оборудования сети мониторинга и не является стандартным определением зоны дыхания человека. Измерения на данной высоте могут использоваться для анализа локальной пространственно-временной изменчивости загрязнения при условии учёта аэродинамики застройки [21]. Критически важным этапом стала совместная установка низкобюджетных датчиков с референсной станцией государственного мониторинга. В течение четырех недель сенсорные модули работали параллельно с эталонным оборудованием, что позволило собрать массив данных для первичной калибровки и построения регрессионных моделей коррекции.

Для исключения влияния метеорологических условий применялся алгоритм многомерной компенсации дрейфа. Показания каждого сенсора корректировались с использованием коэффициентов, рассчитанных на основе локальных изменений температуры и влажности. Далее проводилась предобработка массивов данных, включавшая фильтрацию артефактов связи и сглаживание временных рядов методом скользящего медианного окна.

Обнаружение аномальных выбросов, не связанных с фоновыми колебаниями, реализовывалось с помощью алгоритма изоляционного леса. Данный метод машинного обучения эффективно выявляет точечные отклонения в многомерном пространстве признаков, отделяя кратковременные залповые выбросы от естественной дисперсии концентраций [22]. Для предотвращения утечки данных и независимой проверки модели алгоритм обучали на массиве, собранном в весенне-летний период, а проверку проводили на данных осенне-зимнего сезона, характеризующегося иными условиями дисперсии

загрязняющих веществ и инверсионными явлениями в приземном слое.

Результаты исследования и их обсуждение. Схема размещения узлов мониторинга в санитарно-защитной зоне была разработана с учетом экологических и аэродинамических факторов (рисунок 1).

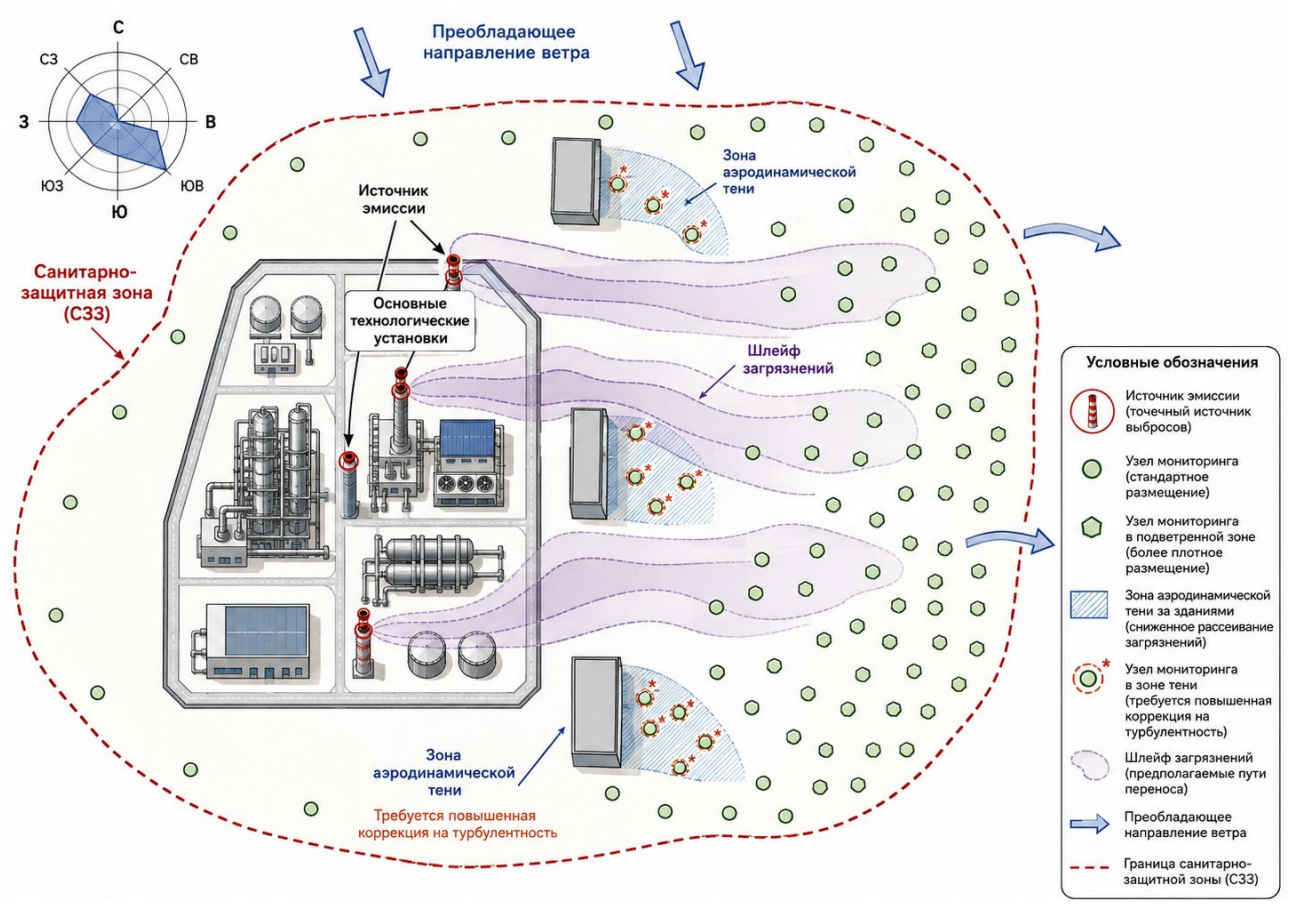


Рисунок 1 - Схема размещения узлов мониторинга в санитарно-защитной зоне с учетом розы ветров и источников эмиссии (источник: разработано авторами)

Совместная установка с референсными приборами выявила существенную зависимость показаний бюджетных сенсоров от микроклимата. Электрохимические ячейки для регистрации NO_2 и SO_2 демонстрировали значительный дрейф при падении температуры ниже 5 °C и росте относительной влажности свыше 80 % (рисунок 2).

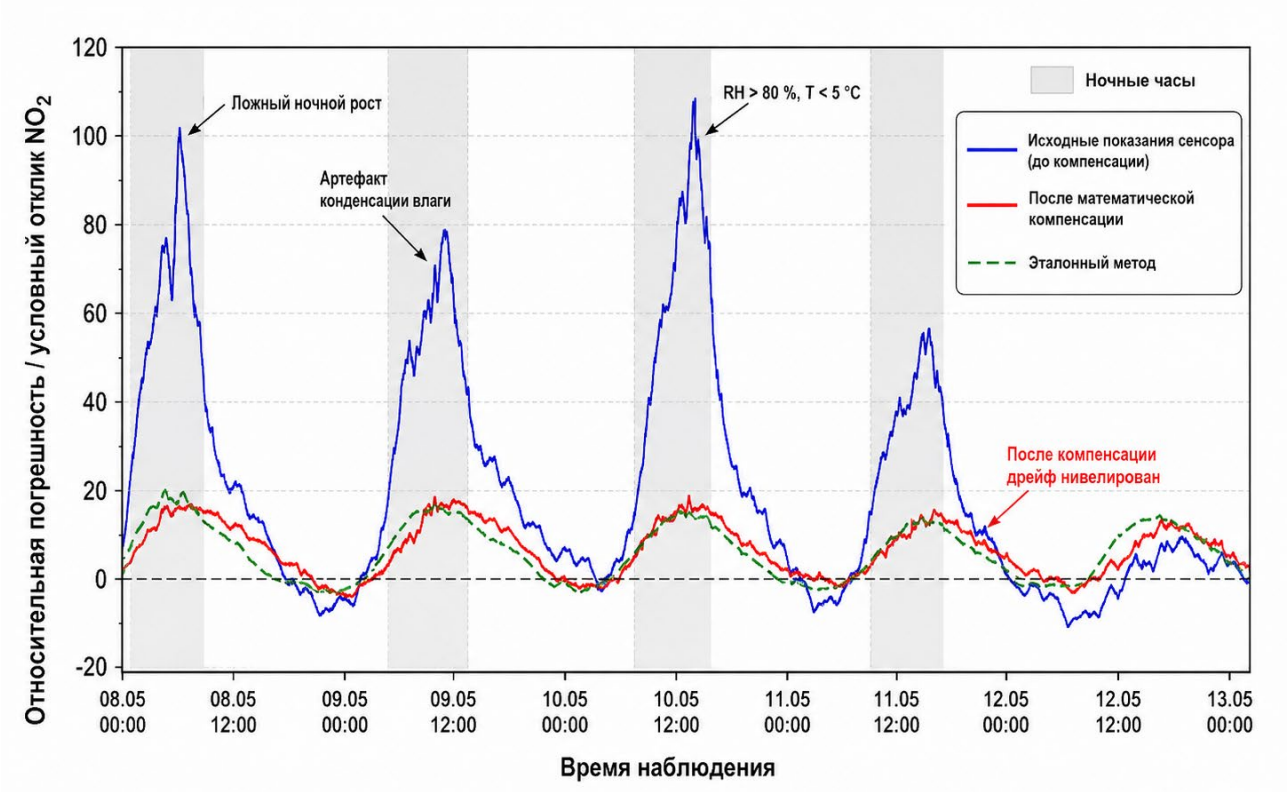


Рисунок 2 - Динамика погрешности измерений диоксида азота до и после математической компенсации температурно-влажностного дрейфа (источник: разработано авторами)

Сравнительные характеристики оборудования и примененных методов коррекции обобщены в таблице 1.

Таблица 1 - Сравнительные характеристики низкобюджетных сенсоров и референсного оборудования после процедуры математической коррекции

Контролируемый параметр	Тип референсного метода	Тип низкобюджетного сенсора	Диапазон измерений	Погрешность до коррекции, %	Погрешность после коррекции, %
$PM_{2,5}$ / PM_{10}	Гравиметрия / Бета-аттенюация	Оптический счетчик (рассеяние света)	0-1000 мкг/м³	35-45	12-18
NO_2	Хемилюминесценция	Электрохимическая ячейка	0-500 мкг/м³	40-60	10-15
SO_2	Флуоресценция (УФ)	Электрохимическая ячейка	0-500 мкг/м³	30-50	8-14
ЛОС	Газовая хроматография	Фотоионизационный детектор (PID)	0-50 мг/м³	25-40	15-20

Источник: разработано авторами.

Вычислительный эксперимент, охвативший шесть месяцев непрерывного

наблюдения, подтвердил эффективность предложенного подхода. Для обнаружения необычных состояний многомерного временного ряда используется алгоритм Isolation Forest, выделяющий наблюдения, отличающиеся от структуры обучающей совокупности. Причинами отклонений могут быть кратковременные изменения концентраций, метеорологические условия, помехи измерительного канала и ошибки передачи данных (таблица 2).

Таблица 2 - Статистические метрики согласованности показаний распределенной сети и эталонной станции за период независимой проверки

Показатель	$PM_{2,5}$	NO_2	SO_2	ЛОС
RMSE (среднеквадратичная ошибка), мкг/м³	4.2	3.8	2.1	0.15
MAE (среднее абсолютное отклонение), мкг/м³	2.9	2.4	1.4	0.09
R^2 (коэффициент детерминации)	0.84	0.88	0.91	0.82
Доля ложных тревог при детекции аномалий, %	4.5	3.2	2.8	6.1
Среднее время обнаружения залпового выброса, мин	2.5	1.8	1.5	3.0

Источник: разработано авторами.

Примечание. Показатели RMSE и MAE должны выражаться в единицах того сигнала, для которого проводилась калибровка. Диапазон ЛОС 0–50 мг/м³ не позволяет без дополнительных сведений подтвердить, что ошибки 0,15 и 0,09 относятся именно к мкг/м³.

Анализ метрик показывает, что наиболее высоких значений согласованности удалось достичь для диоксида серы, что обусловлено меньшей перекрестной чувствительностью применяемых электрохимических сенсоров к другим газам. Коэффициент детерминации для ЛОС оказался ниже, что объясняется гетерогенностью химического состава летучих органических соединений в зоне влияния нефтехимического производства и специфической калибровкой фотоионизационных детекторов на изомере толуола. Значения, обозначенные в таблице 2 как доля ложных тревог, требуют разграничения статистически выделенных отклонений и независимо подтверждённых событий выброса. Доля ложноположительных срабатываний может быть вычислена только относительно контрольной разметки, позволяющей определить число истинно отрицательных и ложноположительных наблюдений (рисунок 3).

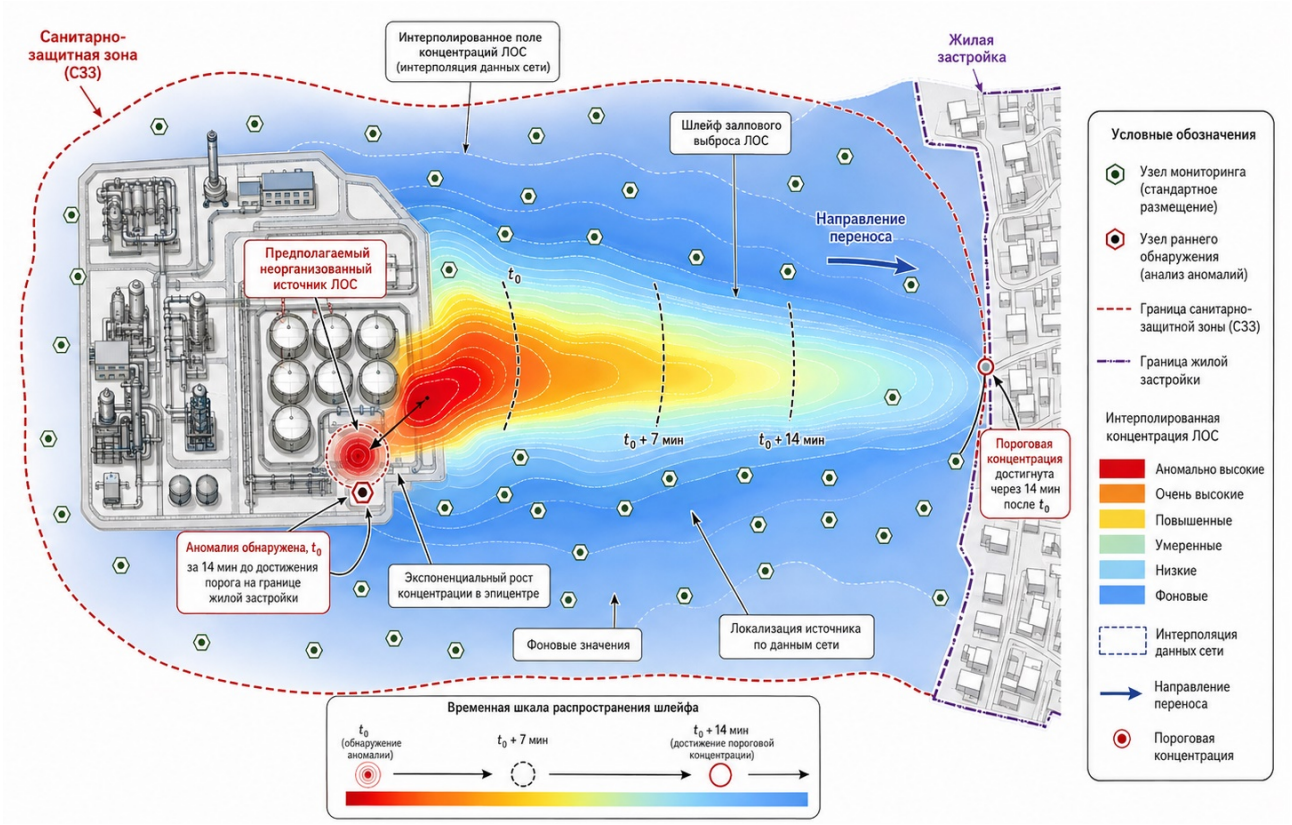


Рисунок 3 - Пространственно-временное распределение аномальных выбросов летучих органических соединений (тепловая карта) (источник: разработано авторами)

Практическое применение полученных данных выходит за рамки простого информирования населения. Построение детализированных тепловых карт загрязнения позволяет экологическим службам предприятия переходить от реагирования на факты загрязнения к превентивному управлению рисками. Автоматическое оповещение о превышениях, формируемое распределенной сетью, позволяет сократить время обнаружения залповых выбросов. Это дает технологическому персоналу возможность оперативно выявить неисправность газоочистного оборудования или нарушение герметичности фланцевых соединений до того, как шлейф загрязнения пересечет границу санитарно-защитной зоны [23].

Кроме того, накопленный массив пространственных данных высокого разрешения служит надежной основой для пересмотра границ санитарно-защитной зоны. Традиционные расчеты СЗЗ часто опираются на усредненные

модели дисперсии, которые не учитывают реальную микрозонную неоднородность и влияние застройки [24]. Данные, полученные с помощью сети низкобюджетных датчиков, подтверждают, что в отдельных секторах, защищенных лесополосами или рельефом, фактические концентрации загрязняющих веществ стабильно ниже нормативных, тогда как в других направлениях, совпадающих с путями стока холодного воздуха, наблюдаются устойчивые пики. Это указывает на необходимость корректировки конфигурации СЗЗ с учетом реальных экологических условий территории, в том числе формирования асимметричных границ. Таким образом, интеграция доступных сенсорных технологий с методами машинного обучения формирует новый, более гибкий и информативный инструментарий для решения сложных задач промышленной экологии.

Выводы. Проведенное исследование подтверждает, что распределенные сенсорные системы способны существенно повысить пространственное разрешение данных о качестве атмосферного воздуха в условиях промышленной зоны. Однако практическая эксплуатация подобных комплексов неизбежно выявляет фундаментальные ограничения, присущие бюджетной измерительной аппаратуре. Дешевые электрохимические и оптические ячейки демонстрируют выраженную перекрестную чувствительность к фоновым газам и метеорологическим параметрам. В агрессивной среде промышленного предприятия, характеризующейся высокими вибрационными нагрузками, запыленностью и резкими перепадами температур, деградация чувствительных элементов происходит значительно быстрее, чем в лабораторных условиях. Это напрямую влияет на достоверность фиксируемых концентраций взвешенных частиц и газообразных примесей, особенно в диапазоне предельно допустимых значений, где требуется максимальная точность для оценки рисков здоровью населения [25].

Преодоление инструментальных погрешностей требует регулярного метрологического сопровождения сети. Процедура калибровки, включающая

проверку нулевой точки и настройку по эталонному газу, на практике оказывается крайне ресурсоемкой. Как показывают зарубежные и отечественные наблюдения, затраты на логистику, техническое обслуживание и периодическую замену вышедших из строя узлов зачастую многократно превышают первоначальную стоимость самих сенсорных устройств. Более того, отсутствие единого стандарта на чистый воздух для настройки базовых показателей усложняет полевые работы. Исследователям и экологам приходится разрабатывать собственные протоколы адаптации показаний, опираясь на данные референсных станций, что снижает оперативность развертывания новых измерительных линий и требует привлечения дополнительного квалифицированного персонала.

Отдельного внимания заслуживает неспособность существующих массовых оптических счетчиков регистрировать ультрадисперсные фракции аэрозолей и техногенные наноматериалы. Именно эти компоненты обладают наибольшим токсикологическим потенциалом и способны проникать через биологические барьеры организма, накапливаясь в тканях. Текущий уровень миниатюризации не позволяет создавать доступные приборы для точного определения размерного распределения частиц в нанодиапазоне непосредственно в полевых условиях. Это ограничение снижает полноту оценки реальных экологических рисков для жителей санитарно-защитных зон и требует применения более сложного аналитического оборудования для точечного контроля наиболее опасных загрязнителей.

Перспективы дальнейшего развития систем экологического контроля связаны с совершенствованием математических методов и повышением автономности аппаратных средств. Внедрение алгоритмов машинного обучения, способных в автоматическом режиме компенсировать температурно-влажностный дрейф и отсеивать инструментальные артефакты, позволит существенно снизить нагрузку на обслуживающий персонал и повысить качество собираемых данных. Параллельно идет поиск альтернативных

источников энергопитания для удаленных узлов. Использование технологий сбора рассеянной энергии из окружающей среды, например за счет преобразования вибраций промышленного оборудования или перепадов температур, может обеспечить практически непрерывную работу автономных постов без необходимости частой замены аккумуляторных батарей, что особенно важно для труднодоступных участков промышленной зоны.

Интеграция плотно размещенных сенсорных массивов с существующими системами диспетчеризации промышленных предприятий открывает путь к превентивному управлению экологическими рисками. Формирование детализированных карт рассеивания выбросов в режиме, близком к реальному времени, дает природоохранным службам и надзорным органам действенный инструмент для локализации неорганизованных источников загрязнения. В перспективе замена точечного нормативного контроля непрерывным распределенным мониторингом позволит перейти от констатации фактов превышения предельно допустимых концентраций к активному регулированию технологических процессов. Такой подход минимизирует антропогенную нагрузку на окружающую среду и обеспечивает подлинную экологическую безопасность прилегающих территорий.

Список литературы

1. Гусак Д. В. Концепция прибора для организации сети мониторинга // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2023. Т. 31. № 2. С. 241–250. DOI: 10.22363/2313-2310-2023-31-2-241-250.

2. Cavaliere A., Brilli L., Andreini B. P., Carotenuto F., Gioli B., Giordano T., Stefanelli M., Vagnoli C., Zaldei A., Gualtieri G. Development of low-cost air quality stations for next-generation monitoring networks: calibration and validation of NO_2 and O_3 sensors // Atmospheric Measurement Techniques. 2023. Vol. 16. P. 4723–4740. DOI: 10.5194/amt-16-4723-2023.

3. Aix M.-L., Schmitz S., Bicout D. J. Calibration methodology of low-cost sensors

for high-quality monitoring of fine particulate matter // Science of the Total Environment. 2023. Vol. 889. Article 164063. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.164063.

4. Papaconstantinou R., Demosthenous M., Bezantakos S., Hadjigeorgiou N., Costi M., Stylianou M., Symeou E., Savvides C., Biskos G. Field evaluation of low-cost electrochemical air quality gas sensors under extreme temperature and relative humidity conditions // Atmospheric Measurement Techniques. 2023. Vol. 16. P. 3313–3329. DOI: 10.5194/amt-16-3313-2023.

5. Gamboa V. S., Kinast É. J., Pires M. System for performance evaluation and calibration of low-cost gas sensors applied to air quality monitoring // Atmospheric Pollution Research. 2023. Vol. 14. No. 2. Article 101645. DOI: 10.1016/j.apr.2022.101645.

6. González Rivero R. A., Schalm O., Alvarez Cruz A., Hernández Rodríguez E., Morales Pérez M. C., Alejo Sánchez D. et al. Relevance and Reliability of Outdoor SO_2 Monitoring in Low-Income Countries Using Low-Cost Sensors // Atmosphere. 2023. Vol. 14. No. 6. Article 912. DOI: 10.3390/atmos14060912.

7. Bousiotis D., Allison G., Beddows D. C. S., Harrison R. M., Pope F. D. Towards comprehensive air quality management using low-cost sensors for pollution source apportionment // npj Climate and Atmospheric Science. 2023. Vol. 6. Article 122. DOI: 10.1038/s41612-023-00424-0.

8. Roy P., Chen L.-W. A., Gebreselassie A., Li Y., Chow J. C., Watson J. G., Chen Y. High time-resolution fenceline air quality sensing and dispersion modeling for environmental justice-centered source attribution // Atmospheric Environment. 2023. Vol. 305. Article 119778. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2023.119778.

9. Чудинова О. Н., Чередова Т. В., Бутакова А. А., Беспрозванных А. П. Оценка загрязнения атмосферного воздуха продуктами сгорания угля и мазута на примере квартальных котельных г. Улан-Удэ // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2024. Т. 32. № 2. С. 184–197. DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-2-184-197.

10. Samad A., Kieser J., Chourdakis I., Vogt U. Developing a Cloud-Based Air Quality

Monitoring Platform Using Low-Cost Sensors // Sensors. 2024. Vol. 24. No. 3. Article 945. DOI: 10.3390/s24030945.

11. Zafra-Pérez A., Medina-García J., Boente C., Gómez-Galán J. A., Sánchez de la Campa A., de la Rosa J. D. Designing a low-cost wireless sensor network for particulate matter monitoring: Implementation, calibration, and field-test // Atmospheric Pollution Research. 2024. Vol. 15. No. 9. Article 102208. DOI: 10.1016/j.apr.2024.102208.

12. Hayward I., Martin N. A., Ferracci V., Kazemimanesh M., Kumar P. Low-Cost Air Quality Sensors: Biases, Corrections and Challenges in Their Comparability // Atmosphere. 2024. Vol. 15. No. 12. Article 1523. DOI: 10.3390/atmos15121523.

13. Lee Y.-M., Lin G.-Y., Le T.-C., Hong G.-H., Aggarwal S. G., Yu J.-Y., Tsai C.-J. Characterization of spatial-temporal distribution and microenvironment source contribution of $PM_{2.5}$ concentrations using a low-cost sensor network with artificial neural network/kriging techniques // Environmental Research. 2024. Vol. 244. Article 117906. DOI: 10.1016/j.envres.2023.117906.

14. Федоров В. Н., Ковшов А. А., Тихонова Н. А., Новикова Ю. А., Копытенкова О. И., Мясников И. О. Мониторинг качества атмосферного воздуха в городах — участниках федерального проекта «Чистый воздух» Дальневосточного экономического района // Гигиена и санитария. 2024. Т. 103. № 6. С. 510–518. DOI: 10.47470/0016-9900-2024-103-6-510-518.

15. Кислицына В. В., Суржиков Д. В., Ликонцева Ю. С., Штайгер В. А. Динамика показателей риска для здоровья населения, обусловленного загрязнением атмосферного воздуха промышленного центра // Гигиена и санитария. 2024. Т. 103. № 4. С. 358–364. DOI: 10.47470/0016-9900-2024-103-4-358-364.

16. Koziel S., Pietrenko-Dabrowska A., Wojcikowski M., Pankiewicz B. Field calibration of low-cost particulate matter sensors using artificial neural networks and affine response correction // Measurement. 2024. Vol. 230. Article 114529. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114529.

17. Симанович С. В., Гаврилин И. И. Некоторые аспекты адаптации средств

измерений для инструментального контроля выбросов с использованием БПЛА // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2025. Т. 33. № 3. С. 312–327. DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-3-312-327.

18. MacDonald M. K., Champion W. M., Thoma E. D. SENTINEL: A Shiny App for Processing and Analysis of Fenceline Sensor Data // Environmental Modelling & Software. 2025. Vol. 189. Article 106462. DOI: 10.1016/j.envsoft.2025.106462.

19. Kim K., Chun D., Yang W. IoT-based filter management system using reinforced ANFIS for VOCs reduction in urban industrial facilities // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Article 17455. DOI: 10.1038/s41598-025-02435-8.

20. Sousan S., Wu R., Popoviciu C., Fresquez S., Park Y. M. Advancing low-cost air quality monitor calibration with machine learning methods // Environmental Pollution. 2025. Vol. 374. Article 126191. DOI: 10.1016/j.envpol.2025.126191.

21. Taştan M. Machine Learning–Based Calibration and Performance Evaluation of Low-Cost Internet of Things Air Quality Sensors // Sensors. 2025. Vol. 25. No. 10. Article 3183. DOI: 10.3390/s25103183.

22. Мясников И. О., Новикова Ю. А., Кизеев А. Н., Федоров В. Н., Склизкова Н. А. Оценка существующей системы мониторинга качества атмосферного воздуха на территории населённых пунктов — портов Северного морского пути // Гигиена и санитария. 2025. Т. 104. № 8. С. 966–973. DOI: 10.47470/0016-9900-2025-104-8-966-973.

23. Bagkis E., Hassani A., Schneider P., DeSouza P., Shetty S., Kassandros T. et al. Evolving trends in application of low-cost air quality sensor networks: challenges and future directions // npj Climate and Atmospheric Science. 2025. Vol. 8. Article 335. DOI: 10.1038/s41612-025-01216-4.

24. Стефанович Д. О., Аликбаева Л. А., Филатова С. А., Якубова И. Ш., Хурцилава О. Г. Гигиеническая оценка факторов, определяющих содержание взвешенных частиц в атмосферном воздухе городов // Гигиена и санитария. 2026. Т. 105. № 2. С. 140–148. DOI: 10.47470/0016-9900-2026-105-2-140-148.

25. Yan C. A review of machine learning approaches for improving calibration and

performance of low-cost air quality sensor networks // Sensor Review. 2026. Advance online publication. DOI: 10.1108/SR-10-2025-0761.

References

1. Gusak D. V. Kontseptsiya pribora dlya organizatsii seti monitoringa // Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2023. T. 31. № 2. S. 241–250. DOI: 10.22363/2313-2310-2023-31-2-241-250.

2. Cavaliere A., Brilli L., Andreini B. P., Carotenuto F., Gioli B., Giordano T., Stefanelli M., Vagnoli C., Zaldei A., Gualtieri G. Development of low-cost air quality stations for next-generation monitoring networks: calibration and validation of NO_2 and O_3 sensors // Atmospheric Measurement Techniques. 2023. Vol. 16. P. 4723–4740. DOI: 10.5194/amt-16-4723-2023.

3. Aix M.-L., Schmitz S., Bicout D. J. Calibration methodology of low-cost sensors for high-quality monitoring of fine particulate matter // Science of the Total Environment. 2023. Vol. 889. Article 164063. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.164063.

4. Papaconstantinou R., Demosthenous M., Bezantakos S., Hadjigeorgiou N., Costi M., Stylianou M., Symeou E., Savvides C., Biskos G. Field evaluation of low-cost electrochemical air quality gas sensors under extreme temperature and relative humidity conditions // Atmospheric Measurement Techniques. 2023. Vol. 16. P. 3313–3329. DOI: 10.5194/amt-16-3313-2023.

5. Gamboa V. S., Kinast É. J., Pires M. System for performance evaluation and calibration of low-cost gas sensors applied to air quality monitoring // Atmospheric Pollution Research. 2023. Vol. 14. No. 2. Article 101645. DOI: 10.1016/j.apr.2022.101645.

6. González Rivero R. A., Schalm O., Alvarez Cruz A., Hernández Rodríguez E., Morales Pérez M. C., Alejo Sánchez D. et al. Relevance and Reliability of Outdoor SO_2 Monitoring in Low-Income Countries Using Low-Cost Sensors // Atmosphere. 2023. Vol. 14. No. 6. Article 912. DOI: 10.3390/atmos14060912.

7. Bousiotis D., Allison G., Beddows D. C. S., Harrison R. M., Pope F. D. Towards

comprehensive air quality management using low-cost sensors for pollution source apportionment // npj Climate and Atmospheric Science. 2023. Vol. 6. Article 122. DOI: 10.1038/s41612-023-00424-0.

8. Roy P., Chen L.-W. A., Gebreselassie A., Li Y., Chow J. C., Watson J. G., Chen Y. High time-resolution fenceline air quality sensing and dispersion modeling for environmental justice-centered source attribution // Atmospheric Environment. 2023. Vol. 305. Article 119778. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2023.119778.

9. Chudinova O. N., Cheredova T. V., Butakova A. A., Besprozvannykh A. P. Otsenka zagryazneniya atmosfernogo vozdukha produktami sgoraniya uglya i mazuta na primere kvartal'nykh kotel'nykh g. Ulan-Ude // Vestnik RUDN. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2024. T. 32. № 2. S. 184–197. DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-2-184-197.

10. Samad A., Kieser J., Chourdakis I., Vogt U. Developing a Cloud-Based Air Quality Monitoring Platform Using Low-Cost Sensors // Sensors. 2024. Vol. 24. No. 3. Article 945. DOI: 10.3390/s24030945.

11. Zafra-Pérez A., Medina-García J., Boente C., Gómez-Galán J. A., Sánchez de la Campa A., de la Rosa J. D. Designing a low-cost wireless sensor network for particulate matter monitoring: Implementation, calibration, and field-test // Atmospheric Pollution Research. 2024. Vol. 15. No. 9. Article 102208. DOI: 10.1016/j.apr.2024.102208.

12. Hayward I., Martin N. A., Ferracci V., Kazemimanesh M., Kumar P. Low-Cost Air Quality Sensors: Biases, Corrections and Challenges in Their Comparability // Atmosphere. 2024. Vol. 15. No. 12. Article 1523. DOI: 10.3390/atmos15121523.

13. Lee Y.-M., Lin G.-Y., Le T.-C., Hong G.-H., Aggarwal S. G., Yu J.-Y., Tsai C.-J. Characterization of spatial-temporal distribution and microenvironment source contribution of $PM_{2.5}$ concentrations using a low-cost sensor network with artificial neural network/kriging techniques // Environmental Research. 2024. Vol. 244. Article 117906. DOI: 10.1016/j.envres.2023.117906.

14. Fedorov V. N., Kovshov A. A., Tikhonova N. A., Novikova Yu. A., Kopytenkova

O. I., Myasnikov I. O. Monitoring kachestva atmosfernogo vozdukha v gorodakh — uchastnikakh federal'nogo proekta «Chistyi vozdukh» Dal'nevostochnogo ekonomicheskogo raiona // Gigiena i sanitariya. 2024. T. 103. № 6. S. 510–518. DOI: 10.47470/0016-9900-2024-103-6-510-518.

15. Kislitsyna V. V., Surzhikov D. V., Likontseva Yu. S., Shtaiger V. A. Dinamika pokazatelei riska dlya zdorov'ya naseleniya, obuslovlennogo zagryazneniem atmosfernogo vozdukha promyshlennogo tsentra // Gigiena i sanitariya. 2024. T. 103. № 4. S. 358–364. DOI: 10.47470/0016-9900-2024-103-4-358-364.

16. Koziel S., Pietrenko-Dabrowska A., Wojcikowski M., Pankiewicz B. Field calibration of low-cost particulate matter sensors using artificial neural networks and affine response correction // Measurement. 2024. Vol. 230. Article 114529. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114529.

17. Simanovich S. V., Gavrilin I. I. Nekotorye aspekty adaptatsii sredstv izmerenii dlya instrumental'nogo kontrolya vybrosov s ispol'zovaniem BPLA // Vestnik RUDN. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2025. T. 33. № 3. S. 312–327. DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-3-312-327.

18. MacDonald M. K., Champion W. M., Thoma E. D. SENTINEL: A Shiny App for Processing and Analysis of Fenceline Sensor Data // Environmental Modelling & Software. 2025. Vol. 189. Article 106462. DOI: 10.1016/j.envsoft.2025.106462.

19. Kim K., Chun D., Yang W. IoT-based filter management system using reinforced ANFIS for VOCs reduction in urban industrial facilities // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Article 17455. DOI: 10.1038/s41598-025-02435-8.

20. Sousan S., Wu R., Popoviciu C., Fresquez S., Park Y. M. Advancing low-cost air quality monitor calibration with machine learning methods // Environmental Pollution. 2025. Vol. 374. Article 126191. DOI: 10.1016/j.envpol.2025.126191.

21. Taştan M. Machine Learning–Based Calibration and Performance Evaluation of Low-Cost Internet of Things Air Quality Sensors // Sensors. 2025. Vol. 25. No. 10. Article 3183. DOI: 10.3390/s25103183.

22. Myasnikov I. O., Novikova Yu. A., Kizeev A. N., Fedorov V. N., Sklizkova N. A.

Otsenka sushchestvuyushchei sistemy monitoringa kachestva atmosfernogo vozdukha na territorii naselennykh punktov — portov Severnogo morskogo puti // Gigiena i sanitariya. 2025. T. 104. № 8. S. 966–973. DOI: 10.47470/0016-9900-2025-104-8-966-973.

23. Bagkis E., Hassani A., Schneider P., DeSouza P., Shetty S., Kassandros T. et al. Evolving trends in application of low-cost air quality sensor networks: challenges and future directions // npj Climate and Atmospheric Science. 2025. Vol. 8. Article 335. DOI: 10.1038/s41612-025-01216-4.

24. Stefanovich D. O., Alikbaeva L. A., Filatova S. A., Yakubova I. Sh., Khurtsilava O. G. Gigienicheskaya otsenka faktorov, opredelyayushchikh soderzhanie vzveshennykh chastits v atmosfernom vozdukhe gorodov // Gigiena i sanitariya. 2026. T. 105. № 2. S. 140–148. DOI: 10.47470/0016-9900-2026-105-2-140-148.

25. Yan C. A review of machine learning approaches for improving calibration and performance of low-cost air quality sensor networks // Sensor Review. 2026. Advance online publication. DOI: 10.1108/SR-10-2025-0761.

Статья поступила в редакцию 09.12.2025; одобрена после рецензирования 20.01.2026; принята к публикации 01.09.2026.

The article was submitted 09.12.2025; approved after peer review 20.01.2026; accepted for publication 01.09.2026.