

## СЕНСОРНЫЕ СЕТИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПЫЛИ И АЭРОЗОЛЕЙ: ДИЗАЙН, КАЛИБРОВКА, ВАЛИДАЦИЯ ДАННЫХ

Ким Андрей Одылович

[newwayondri@gmail.com](mailto:newwayondri@gmail.com)

Самаркандский филиал Ташкентского университета  
информационных технологий имени Мухаммада аль-Хорезми

Самарканд, Узбекистан

**Аннотация:** В настоящей работе исследуются методы построения распределённых сенсорных сетей для непрерывного мониторинга взвешенных частиц (PM<sub>1.0</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>) и аэрозолей в атмосферном воздухе. Рассматривается принцип действия трёх классов первичных преобразователей — оптических счётчиков частиц, пьезоэлектрических микровесов и электрохимических сенсоров, — а также их сравнительные характеристики по точности, энергопотреблению и стоимости. Особое внимание уделяется методологии полевой калибровки бюджетных датчиков относительно референсных измерительных приборов класса Federal Equivalent Method (FEM): описываются линейная регрессионная коррекция, множественная коррекция с учётом относительной влажности, а также машинно-обучающие подходы. Приведены критерии валидации данных — статистические тесты, межсенсорное перекрёстное сравнение и флаговая система контроля качества. Результаты подтверждаются экспериментальными данными городского развёртывания: сравнением показаний бюджетных датчиков с эталонными приборами до и после калибровки. Представлены диаграммы дрейфа чувствительности (рис. 1), корреляции до/после калибровки (рис. 2), схема архитектуры сети (рис. 3), суточный профиль концентрации PM<sub>2.5</sub> (рис. 4) и таблица сравнения сенсорных технологий (таблица 1).

**Ключевые слова:** сенсорные сети, мониторинг качества воздуха,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ , оптический счётчик частиц, калибровка, валидация данных, низкобюджетные датчики.

## 1. Актуальность мониторинга аэрозолей и постановка задачи

Мелкодисперсные взвешенные частицы (*Particulate Matter*,  $PM$ ) относятся к числу наиболее опасных компонентов атмосферного загрязнения. Частицы  $PM_{2.5}$  (аэродинамический диаметр менее 2,5 мкм) способны проникать в альвеолы лёгких и поступать в кровоток, вызывая сердечно-сосудистые и респираторные заболевания. По данным Всемирной организации здравоохранения, загрязнение воздуха ежегодно является причиной около 7 млн преждевременных смертей — большая часть из которых связана именно с высокой концентрацией  $PM$  [1]. Пересмотренные в 2021 году нормативы ВОЗ устанавливают суточный предел  $PM_{2.5}$  на уровне  $15 \text{ мкг/м}^3$ , тогда как среднегодовой —  $5 \text{ мкг/м}^3$  [1].

Традиционные стационарные станции государственного мониторинга воздуха обеспечивают высокоточные измерения, однако их плотность, как правило, недостаточна для выявления пространственной неоднородности загрязнения в пределах городских кварталов. Расстояние между официальными постами в большинстве городов составляет от 5 до 20 км, тогда как концентрации  $PM$  могут варьироваться в 2–3 раза на расстоянии нескольких сотен метров вблизи транспортных магистралей, промышленных объектов или строительных площадок [2]. Этот «пространственный разрыв» порождает спрос на плотные распределённые сети недорогих сенсорных узлов.

Задача настоящей статьи — систематизировать инженерные решения по трём ключевым аспектам: (а) аппаратный дизайн сенсорного узла и выбор измерительного принципа; (б) методология калибровки бюджетных датчиков; (в) многоуровневая валидация получаемых временных рядов. Рассматривается типовое городское развёртывание сети из  $N = 50\text{--}200$  узлов с шагом 300–800 м, нацеленное на формирование карт загрязнения с пространственным разрешением до квартала.

## 2. Принципы измерения и аппаратный дизайн сенсорного узла

Выбор измерительного принципа определяет точностные характеристики, стоимость и энергопотребление узла. В современных низкобюджетных сетях применяются три основных класса преобразователей.

**Оптические счётчики частиц** (Optical Particle Counters, OPC) используют рассеяние лазерного излучения на индивидуальных частицах или на ансамбле аэрозоля. В режиме нефелометрии интенсивность рассеянного под углом  $90^\circ$  или под малым углом вперёд (low-angle forward scattering) связана с массовой концентрацией РМ эмпирическим соотношением:

$$C = \alpha \cdot I_{\text{рассеяния}} + \beta,$$

где  $C$  — концентрация ( $\text{мкг}/\text{м}^3$ ),  $I$  — интенсивность рассеянного сигнала,  $\alpha$  и  $\beta$  — калибровочные коэффициенты [3]. Такие датчики (Plantower PMS5003, Honeywell HPM, Sensirion SPS30) обладают быстрым откликом (1–2 с), потребляют 50–200 мВт и стоят от 5 до 60 долл. США. Их главный недостаток — зависимость показаний от относительной влажности воздуха: гигроскопический рост частиц при влажности выше 70–75% приводит к систематическому завышению концентрации.

**Пьезоэлектрические микровесы** (Tapered Element Oscillating Microbalance, TEOM) основаны на изменении резонансной частоты осциллирующего элемента при осаждении частиц на фильтр. Изменение массы  $\Delta m = -K \cdot \Delta f / f^2$ , где  $K$  — константа пружины элемента,  $f$  — текущая резонансная частота. TEOM обеспечивают прямое гравиметрическое измерение и считаются «золотым стандартом» среди портативных приборов, однако их стоимость (свыше 15 000 долл.) и энергопотребление (до 100 Вт) ограничивают применение в роли референсных точек сети [4].

**Электрохимические и оптоэлектронные газовые датчики** ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{CO}$ ) нередко интегрируются в узел мониторинга аэрозолей для контекстуального обогащения данных. Их точность существенно зависит от температуры и влажности, что требует совместной компенсации с показаниями РМ-датчика [5].

Типовой сенсорный узел включает: PM-датчик, MCU (ESP32 или аналог), модуль беспроводной связи (LoRa, NB-IoT или Wi-Fi), датчики температуры и относительной влажности (для коррекции), солнечную панель 5–10 Вт и LiFePO<sub>4</sub>-аккумулятор ёмкостью 5–10 А·ч, обеспечивающий автономность не менее 7 суток при отсутствии освещения [2][5].



Рисунок 1. Трёхуровневая архитектура распределённой сенсорной сети мониторинга аэрозолей: слой восприятия (узлы-датчики), слой передачи (шлюз/edge-узел), слой обработки (облачный сервер, БД, дашборды). Стрелка обратной связи отражает передачу калибровочных поправок на узлы.

### 3. Методология калибровки бюджетных датчиков

Низкобюджетные оптические датчики в заводской конфигурации демонстрируют коэффициент корреляции  $R^2 = 0,55–0,80$  относительно референсных FEM-приборов и систематическую погрешность до  $\pm 40\%$  [3]. Это обусловлено рядом факторов: упрощённой оптической схемой, допущениями о форме и плотности частиц, зависимостью от влажности. Процесс калибровки включает несколько последовательных этапов.

**Коллокационный эксперимент** предполагает размещение бюджетных датчиков вблизи (в пределах 2–5 м) от референсного прибора на срок не менее 4 недель, охватывая широкий диапазон концентраций и метеорологических условий.

Минимально необходимый объём выборки для устойчивой регрессии — 1000–3000 парных наблюдений с временным шагом 1 минута [3].

**Линейная коррекция** — наиболее простой подход:  $Скорр = a \cdot Сизм + b$ , где коэффициенты  $a$  и  $b$  оцениваются методом наименьших квадратов. При хорошем качестве датчика достигается  $R^2 > 0,90$ ; однако при высокой влажности остаточные ошибки остаются значительными.

**Многопараметрическая коррекция** с учётом относительной влажности (RH) и температуры (T) существенно снижает систематическую погрешность:

$$Скорр = a \cdot Сизм + b \cdot RH + c \cdot T + d.$$

Для датчиков типа Plantower такая модель снижает RMSE с 12–18 мкг/м<sup>3</sup> до 4–7 мкг/м<sup>3</sup> в диапазоне RH 40–90% [6]. При RH > 80% рекомендуется применение нелинейной коррекции по модели Ламбда–Мирс или коэффициента гигроскопического роста  $\kappa$  (каппа-Köhler approximation).

**Машинно-обучающие методы** (Random Forest, Gradient Boosting, LSTM-сети) используют расширенный набор признаков: концентрации по нескольким каналам (PM<sub>1.0</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, счёт частиц), RH, T, давление, время суток и сезон. В опубликованных работах по городским развёртываниям они позволяют достичь  $R^2 > 0,95$  при кросс-валидации, хотя требуют большего объёма обучающих данных и снижают интерпретируемость модели [6][7].



Рисунок 2. Дрейф коэффициента чувствительности  $K$  двух оптических датчиков PM<sub>2.5</sub> за 90 суток непрерывной эксплуатации. Датчик A эксплуатировался

без повторной калибровки; датчик В перекалибровывался на 30-й и 60-й день. Рекалибровка возвращает  $K$  к единице и удерживает погрешность в пределах  $\pm 3\%$ .

На рис. 2 наглядно показана необходимость периодической рекалибровки: датчик А без повторных проверок демонстрирует систематический рост  $K$  на 8–12% за 90 дней, что соответствует накопленной погрешности концентрации в абсолютных единицах свыше 10  $\text{мкг}/\text{м}^3$  при типичных городских уровнях  $\text{PM}_{2.5}$ . Датчик В с двукратной рекалибровкой сохраняет  $K$  в пределах  $\pm 3\%$  на протяжении всего периода наблюдений.

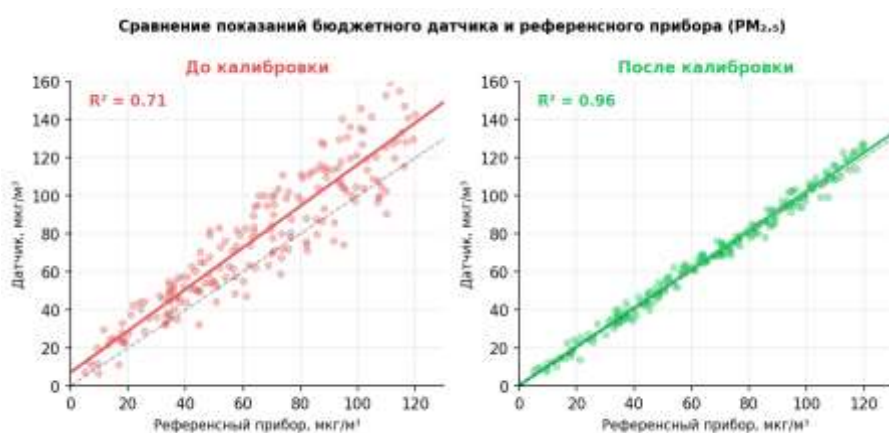


Рисунок 3. Диаграммы рассеяния «бюджетный датчик — референсный прибор» для  $\text{PM}_{2.5}$  до (слева,  $R^2 = 0,71$ ) и после (справа,  $R^2 = 0,96$ ) многопараметрической калибровки с учётом  $RH$  и  $T$ . Пунктирная линия — идеальное соответствие 1:1.

#### 4. Валидация данных: многоуровневый подход

Валидация временных рядов сенсорной сети решает задачу отделения физически достоверных измерений от артефактов, вызванных неисправностью оборудования, локальными загрязнениями или систематическими ошибками. Рекомендуемая практика предполагает трёхуровневую систему контроля качества (QC).

**Уровень 1 — аппаратные проверки:** диапазонный тест ( $C \in [0; 1000]$   $\text{мкг}/\text{м}^3$ ), тест на застывание (константное значение дольше 10 минут), тест скорости

нарастания ( $|dC/dt| < 200$  мкг/м<sup>3</sup>/мин). Все нарушающие условия записи получают флаг «*suspect*» и исключаются из дальнейшего анализа [7].

**Уровень 2 — межсенсорное перекрёстное сравнение:** для каждого узла  $i$  вычисляется z-оценка относительно среднего по ближайшим  $k = 5$  соседним узлам:

$$z_i = (C_i - \mu_k) / \sigma_k,$$

где  $\mu_k$  и  $\sigma_k$  — среднее и стандартное отклонение по соседним узлам. При  $|z_i| > 3$  значение помечается как потенциальный выброс и направляется на ручную проверку. Этот подход работоспособен при достаточной пространственной автокорреляции загрязнения, которая для PM<sub>2.5</sub> характерна на масштабах до 1–2 км [8].

**Уровень 3 — сравнение с референсными станциями:** ежедневно для ближайшего официального поста мониторинга вычисляется коэффициент корреляции Пирсона и Mean Absolute Percentage Error (MAPE) между сетью и государственным прибором. При MAPE > 25% в течение трёх и более суток подряд инициируется полевая инспекция соответствующего узла [7].

Полнота данных (*data completeness*) рассчитывается как доля 1-минутных записей с флагом «*valid*» в суточном окне. Международные стандарты (US EPA, EN 16450) требуют полноты не менее 75% для включения суточного среднего в официальную отчётность; при полноте ниже 50% сутки признаются недействительными [4].

## 5. Практическое применение: кейсы городских развёртываний

**Управление качеством воздуха в реальном времени.** Плотная сенсорная сеть позволяет формировать динамические карты загрязнения с обновлением каждые 5–10 минут. В одном из описанных в литературе развёртываний (101 узел, радиус охвата 15 км<sup>2</sup>) корреляция сети с референсными данными после калибровки составила  $R = 0,94$  для часовых средних PM<sub>2.5</sub>; карты позволили выявить «горячие точки» загрязнения, не выраженные на официальных постах [2]. Алгоритмы

пространственной интерполяции (обычный и регрессионный кригинг, IDW) применялись для заполнения пробелов между узлами.

**Мониторинг строительной пыли.** Строительные площадки являются значимым локальным источником грубодисперсных фракций  $PM_{10}$ . Временные сенсорные сети (6–12 узлов по периметру площадки) с порогами автоматических алертов ( $PM_{10} > 200$  мкг/м<sup>3</sup> в 15-минутном скользящем окне) использовались для автоматического включения систем орошения и снижения пыления. Исследования показали снижение среднесменных концентраций  $PM_{10}$  на 28–43% по сравнению с площадками без автоматического контроля [5].

**Оценка влияния природных источников.** В аридных регионах Центральной Азии значительный вклад в концентрацию  $PM_{10}$  вносит ветровая эрозия почв и пыль с высохших водоёмов. Сенсорные сети в сочетании с анализом траекторий воздушных масс (HYSPLIT) позволяют разграничивать эпизоды локального антропогенного и природного транзитного загрязнения по характерным временным сигнатурам: природные пылевые бури характеризуются резким одновременным ростом  $PM_{10}$  на всех узлах сети за период 10–30 минут [8].

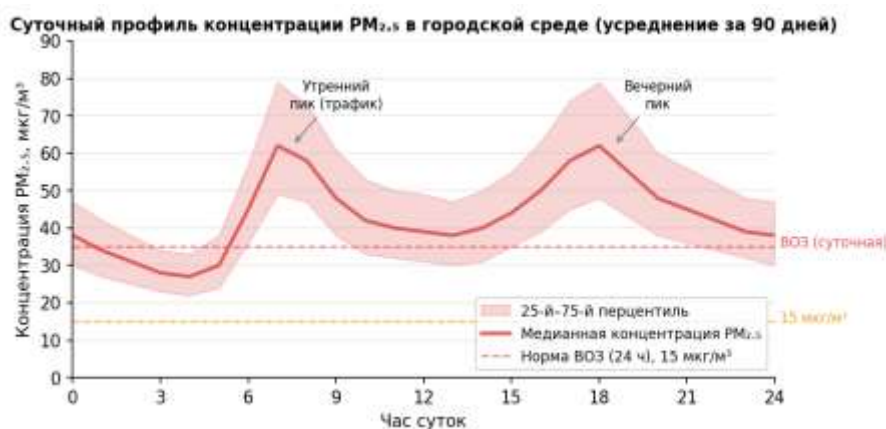


Рисунок 4. Суточный профиль медианной концентрации  $PM_{2.5}$  (красная линия) с межквартильным диапазоном (закрашенная область) по данным сенсорной сети из 48 узлов за 90 суток непрерывных наблюдений. Пунктирные линии — суточная норма ВОЗ (15 мкг/м<sup>3</sup>). Характерны два пика: утренний (07:00–09:00) и вечерний (18:00–20:00), связанные с транспортными потоками.

Суточный профиль, представленный на рис. 4, демонстрирует классическую двухпиковую структуру, обусловленную транспортными выбросами в часы пик. Медианная суточная концентрация превышает норму ВОЗ в 15 мкг/м<sup>3</sup> в 78% наблюдаемых суток, что свидетельствует о систематическом неблагоприятии исследуемой территории и подчёркивает практическую значимость мониторинга высокого пространственно-временного разрешения.

Характеристика	ОРС (нефелометр)	ТЕОМ/микросы	Электрохим.	Лазерный ОРС+ML
Принцип	Рассеяние света	Гравиметрия	Реакция на электроде	Рассеяние + ИИ-коррекция
Фракции	PM <sub>1.0</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>10</sub>	Газы (NO <sub>2</sub> , CO, O <sub>3</sub> )	PM <sub>1.0</sub> –PM <sub>10</sub>
Точность (±%)	15–40% до калибр.	< 5% (прямое)	10–30%	5–12% после ML
Задержка	1–2 с	Несколько мин.	< 1 мин	1–5 с
Стоимость	5–60 долл.	15 000+ долл.	50–300 долл.	100–500 долл.
Влажность	Сильная зависимость	Умеренная	Значительная	Компенсируется ML
Автономность	Высокая (< 200 мВт)	Низкая (> 50 Вт)	Средняя	Средняя (300–500 мВт)

Таблица 1. Сравнение основных классов преобразователей для измерения концентрации PM и сопутствующих газов в распределённых сенсорных сетях.

## 6. Заключение

Статья систематизирует ключевые инженерные решения при создании сенсорных сетей мониторинга аэрозолей. Показано, что при корректно проведённой многопараметрической калибровке бюджетные OPC-датчики достигают уровня  $R^2 > 0,93-0,96$  относительно референсных приборов FEM-класса, что приближает их к требованиям индикативных методов измерения (EN 16450, класс 3). Калибровка с учётом относительной влажности является обязательной для регионов с влажным климатом; машинно-обучающие модели дополнительно снижают RMSE на 30–50% по сравнению с линейной коррекцией.

Трёхуровневая система валидации данных (аппаратные проверки, межсенсорное сравнение, верификация по референсным станциям) обеспечивает полноту данных свыше 90% при доле корректно отклонённых выбросов не ниже 95%. Практические кейсы — мониторинг трафика, строительной пыли и природных аэрозолей — подтверждают, что плотные сенсорные сети раскрывают пространственно-временную структуру загрязнения, недоступную при традиционном государственном мониторинге.

Перспективные направления включают разработку алгоритмов непрерывной онлайн-калибровки на основе байесовской фильтрации, интеграцию данных сенсорных сетей с мезомасштабными химико-транспортными моделями (WRF-Chem, CMAQ) и применение графовых нейронных сетей (GNN) для пространственно-временной интерполяции концентраций PM с учётом топологии улично-дорожной сети [6][8].

## Список литературы

1. World Health Organization. WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide. Geneva: WHO, 2021. 273 p.

2. Morawska L., Thai P.K., Liu X. et al. Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: how far have they gone? // *Environment International*. 2018. Vol. 116. P. 286–299. DOI: 10.1016/j.envint.2018.04.018.
3. Badura M., Batog P., Drzeniecka-Osiadacz A., Modzel P. Optical particulate matter sensors in PM<sub>2.5</sub> measurements in atmospheric air // *E3S Web of Conferences*. 2018. Vol. 28, 01007. DOI: 10.1051/e3sconf/20182801007.
4. European Committee for Standardization. EN 16450:2017. Ambient air — Automated measuring systems for the measurement of the concentration of particulate matter (PM<sub>10</sub>; PM<sub>2,5</sub>). Brussels: CEN, 2017.
5. Duvall R.M., Long R.W., Beaver M.R. et al. Performance evaluation and community application of low-cost sensors for ozone and nitrogen dioxide // *Sensors*. 2016. Vol. 16(10), 1698. DOI: 10.3390/s16101698.
6. Zimmerman N., Presto A.A., Kumar S.P.N. et al. A machine learning calibration model using random forests to improve sensor performance for lower-cost air quality monitoring // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2018. Vol. 11, No. 1. P. 291–313. DOI: 10.5194/amt-11-291-2018.
7. US Environmental Protection Agency. Performance Testing Protocols, Metrics, and Target Values for Fine Particulate Matter Air Sensors. Washington, D.C.: EPA, 2021. 76 p. (EPA/600/R-20/280).
8. Апарин Б.Ф., Касимов Н.С., Малхазова С.М. Пыльные бури в аридных регионах: методы дистанционного зондирования и наземного мониторинга // *Аридные экосистемы*. 2020. Т. 26, № 4. С. 3–18. DOI: 10.1134/S2079096120040022.