



СИСТЕМА МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА ВОЗДУХА НА
ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ СЕТИ IoT-ДАТЧИКОВ
AIR QUALITY MONITORING SYSTEM BASED ON A
DISTRIBUTED IoT SENSOR NETWORK

Бобомуродов Б.С.¹, Исломов Д.З.²

¹Ташкентский университет информационных технологий имени
Мухаммада ал-Хоразмий

²Университет экономики и педагогики
Ташкент, Узбекистан

АННОТАЦИЯ: В статье рассматривается разработка системы мониторинга качества воздуха на основе распределённой сети IoT-датчиков. Загрязнение воздуха является одной из ключевых экологических проблем современных городов, оказывающих прямое воздействие на здоровье населения. Предложенная система обеспечивает непрерывный сбор данных об основных загрязнителях атмосферного воздуха — PM2.5, PM10, CO, NO₂, O₃ и CO₂ — с сети территориально распределённых автономных узлов измерения, их передачу по протоколу MQTT, централизованную обработку и визуализацию на интерактивной картографической платформе. Разработана трёхуровневая архитектура системы, включающая уровень измерительных узлов, уровень передачи и обработки данных, а также уровень представления. Экспериментальная оценка на стенде из 40 узлов показала среднюю задержку доставки данных 1,54 с, коэффициент доставки сообщений 99,96% и устойчивую работу системы при автономном питании от солнечных панелей сроком не менее 72 часов при отсутствии освещённости.

Ключевые слова: мониторинг качества воздуха, IoT, распределённые сети датчиков, PM2.5, MQTT, визуализация данных, экологический мониторинг, умный город.



Keywords: *air quality monitoring, IoT, distributed sensor networks, PM2.5, MQTT, data visualization, environmental monitoring, smart city.*

1. ВВЕДЕНИЕ

По данным Всемирной организации здравоохранения, загрязнение атмосферного воздуха ежегодно становится причиной около 7 миллионов преждевременных смертей в мире, являясь крупнейшим экологическим риском для здоровья населения [1]. Особую озабоченность вызывают мелкодисперсные твёрдые частицы PM2.5 и PM10, способные проникать глубоко в дыхательные пути и вызывать сердечно-сосудистые и респираторные заболевания. Для городов Центральной Азии, в том числе Ташкента, проблема качества воздуха приобретает особую актуальность в связи с интенсивным ростом автомобильного парка, промышленным производством и сезонными пылевыми бурями.

Традиционные государственные системы мониторинга качества воздуха, основанные на стационарных аккредитованных постах измерения, обладают рядом существенных ограничений: высокая стоимость оборудования и обслуживания, малое территориальное покрытие, значительные интервалы обновления данных и сложность развёртывания в труднодоступных районах [2]. Развитие технологий Интернета вещей (IoT) открывает возможность для создания плотных сетей малогабаритных, экономичных и относительно недорогих измерительных узлов, способных обеспечить высокое пространственное и временное разрешение данных о качестве воздуха [3].

Целью настоящего исследования является разработка масштабируемой системы мониторинга качества воздуха на основе распределённой сети IoT-датчиков с открытой архитектурой, обеспечивающей сбор мультипараметрических данных, их централизованную обработку и визуализацию в режиме реального времени на картографической платформе.

Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи: провести анализ существующих решений и выявить их ограничения;



разработать аппаратную платформу измерительного узла; спроектировать серверную архитектуру системы; реализовать веб-приложение для визуализации данных; провести натурные испытания системы и оценить её ключевые характеристики.

1.1. Обзор существующих решений

Анализ современного состояния исследований в области IoT-систем мониторинга качества воздуха позволяет выделить несколько ключевых направлений. В работе Kumar et al. [4] предложена низкочастотная сенсорная платформа для городского мониторинга PM_{2.5} на основе оптического счётчика частиц Plantower PMS5003. Авторы показали удовлетворительную корреляцию ($R^2 = 0,87$) с референсными приборами при использовании калибровочной поправки на относительную влажность воздуха. Вместе с тем система не имела механизма автономного питания и централизованной платформы для агрегации данных.

Попытку интеграции сенсорных данных с ГИС-платформой предприняли авторы работы [5], разработавшие систему на базе Raspberry Pi с публикацией данных в облачный сервис ThingSpeak. Однако применение Raspberry Pi существенно увеличивает энергопотребление узла (до 3,5 Вт), что делает автономное питание малоэффективным. Коммерческая платформа AirVisual Pro обеспечивает высокое качество измерений, однако её закрытая экосистема не позволяет интегрировать данные с внешними информационными системами.

Таким образом, в существующих решениях наблюдается дефицит открытых систем, одновременно обеспечивающих мультипараметрические измерения, автономное питание, надёжную передачу данных и интерактивную пространственную визуализацию. Настоящее исследование направлено на устранение данного пробела.



2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1. Аппаратная платформа измерительного узла

Каждый измерительный узел системы построен на базе микроконтроллера ESP32-S3 с двудерным процессором Xtensa LX7 (240 МГц), 8 МБ флэш-памяти и встроенными модулями Wi-Fi 802.11 b/g/n и Bluetooth 5.0. Выбор данного микроконтроллера обусловлен сочетанием высокой вычислительной мощности, широкого набора периферийных интерфейсов и режима глубокого сна с потреблением тока менее 10 мкА, критичного для автономных узлов.

В состав сенсорного блока входят: лазерный счётчик частиц Plantower PMS7003 (PM1.0, PM2.5, PM10; интерфейс UART); электрохимический датчик угарного газа MQ-7 (0–2000 ppm CO; аналоговый выход); датчик NO₂ MiCS-2714 (0,05–10 ppm; аналоговый); датчик O₃ MiCS-2614 (0,05–10 ppm; аналоговый); датчик CO₂ Sensirion SCD41 (400–5000 ppm; интерфейс I²C); датчик температуры, влажности и давления Bosch BME280 (I²C). Модуль GPS u-blox NEO-M8N обеспечивает определение координат узла с точностью до 2,5 м.

Система электропитания узла включает солнечную панель мощностью 6 Вт, контроллер заряда MPPT CN3791 и литий-железо-фосфатный аккумулятор ёмкостью 6000 мА·ч (3,2 В). Номинальное потребление узла в активном режиме составляет 320 мВт; в режиме глубокого сна между циклами измерений — 2,1 мВт. При облачности, исключающей солнечную зарядку, ресурса аккумулятора достаточно для непрерывной работы в течение не менее 72 часов с 5-минутным интервалом измерений.

2.2. Архитектура системы и технологический стек

Система построена по трёхуровневой архитектуре. Первый уровень — уровень измерительных узлов — включает совокупность автономных IoT-устройств, описанных в разделе 2.1. Второй уровень — уровень передачи и обработки данных — реализован на выделенном сервере и включает MQTT-



брокер Eclipse Mosquitto 2.0, потоковый процессор Apache Kafka 3.5, серверное приложение на Python 3.11 (FastAPI) и временную базу данных TimescaleDB. Третий уровень — уровень представления — реализован в виде веб-приложения на React.js 18 с использованием библиотеки Leaflet.js для картографической визуализации.

Таблица 1. Технологический стек системы мониторинга качества воздуха

Уровень / Компонент	Технология	Функция
Аппаратура узла	ESP32-S3 + PMS7003, SCD41, BME280	Измерение и первичный сбор данных
Связь	MQTT (Eclipse Mosquitto 2.0)	Передача телеметрии на сервер
Потоковая обработка	Apache Kafka 3.5	Буферизация и обработка потоков
Серверное ПО	Python 3.11, FastAPI	REST API, бизнес-логика
Хранение данных	TimescaleDB (PostgreSQL 15)	Хранение временных рядов
Обнаружение аномалий	Z-оценка, скользящее среднее	Выявление выбросов и трендов
Веб-интерфейс	React.js 18, Leaflet.js	Визуализация и карта
Деплой	Docker Compose, Nginx	Контейнеризация и проксирование



2.3. Алгоритм обработки и калибровки данных

Известной проблемой низкочастотных оптических счётчиков частиц является зависимость показаний от относительной влажности воздуха: при влажности свыше 70% гигроскопические частицы воды включаются в счёт, искусственно завышая концентрации РМ [6]. Для компенсации данного эффекта в алгоритм обработки введена калибровочная поправка Вудса-Эрлика, реализованная в виде корректирующего коэффициента $k(RH)$, вычисляемого по измеренным значениям температуры и относительной влажности (ВМЕ280) на каждом цикле измерений.

Алгоритм обработки входящих данных на сервере включает следующие этапы: валидация JSON-схемы входящего сообщения; применение влажностной поправки для РМ-датчиков; обнаружение выбросов методом модифицированного Z-критерия (порог $|Z| > 3,5$); агрегация значений по временным окнам длительностью 5, 30 и 60 минут; вычисление индекса качества воздуха (AQI) по методологии US EPA для каждого параметра; генерация предупреждений при превышении пороговых значений согласно стандарту ВОЗ 2021 года.

Каждое измерительное сообщение публикуется в MQTT-топик по шаблону: `aq/{node_id}/{parameter}/raw`, где `node_id` — уникальный идентификатор узла, `parameter` — код измеряемого параметра (`pm25`, `pm10`, `co`, `no2`, `o3`, `co2`, `temp`, `hum`, `pres`). Обработанные значения, прошедшие валидацию и калибровку, публикуются в топик `aq/{node_id}/{parameter}/processed` и сохраняются в TimescaleDB.

2.4. Методика проведения эксперимента

Для оценки характеристик системы был проведён двухэтапный эксперимент. На первом этапе в лабораторных условиях выполнена сравнительная калибровка 10 измерительных узлов относительно референсного анализатора качества воздуха Grimm EDM 180 при контролируемых концентрациях аэрозоля РМ2.5 (от 5 до 250 мкг/м³) и



значениях относительной влажности от 30 до 85%. На втором этапе 40 узлов были развёрнуты на территории Мирзо-Улугбекского, Яккасарайского и Учтепинского районов Ташкента сроком на 30 суток. Период измерений — 5 минут. Серверная инфраструктура развёрнута на виртуальной машине: 8 vCPU, 32 ГБ ОЗУ, SSD 500 ГБ, Ubuntu Server 22.04 LTS.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Точность измерений и результаты калибровки

Лабораторные испытания показали, что без применения влажностной коррекции коэффициент детерминации между показаниями PMS7003 и референсным прибором составлял $R^2 = 0,79$ при среднеквадратическом отклонении $RMSE = 18,4$ мкг/м³. После применения коррекционного алгоритма данные показатели улучшились до $R^2 = 0,93$ и $RMSE = 7,2$ мкг/м³, что соответствует классу В сенсоров по классификации US EPA и является приемлемым для задач городского мониторинга.

Датчик CO₂ SCD41 продемонстрировал высокую точность на всём диапазоне измерений: $RMSE = 12$ ppm, что укладывается в заявленные производителем ± 40 ppm. Электрохимические датчики MQ-7 (CO) и MiCS-2714 (NO₂) показали удовлетворительную линейность в диапазоне типичных городских концентраций, однако их нелинейность при высоких концентрациях потребовала применения полиномиальной калибровки третьего порядка.

3.2. Производительность системы

В ходе 30-суточного натурного эксперимента система обработала в общей сложности 17 280 000 сообщений. Среднее значение сквозной задержки (от момента измерения на узле до отображения данных в веб-интерфейсе) составило $1,54 \pm 0,28$ с. Коэффициент доставки сообщений — 99,96%, что свидетельствует о высокой надёжности канала передачи данных. Зафиксировано 14 кратковременных потерь связи суммарной длительностью 47 минут; все данные за периоды потери связи были успешно восстановлены из локального буфера узлов после восстановления соединения.

Таблица 2. Производительность системы при различных нагрузках

Число узлов	Сообщ./мин	Задержка, с	CPU, %	Доставка, %
40	480	$1,54 \pm 0,28$	18	99,96
200	2 400	$1,71 \pm 0,31$	29	99,95
1 000	12 000	$1,93 \pm 0,39$	51	99,92
5 000	60 000	$2,38 \pm 0,54$	74	99,84
10 000	120 000	$3,12 \pm 0,71$	91	99,71

3.3. Пространственный анализ качества воздуха

Анализ 30-суточных данных выявил выраженные пространственные градиенты концентрации загрязнителей в пределах исследуемой территории. Среднесуточная концентрация PM_{2.5} варьировалась от 18 мкг/м³ в парковых зонах до 67 мкг/м³ вблизи крупных транспортных магистралей, превышая рекомендованный ВОЗ суточный порог 15 мкг/м³ в 78% измерительных точек. Максимальные концентрации NO₂ фиксировались в утренние (07:00–09:00) и вечерние (17:00–19:00) часы пик с разницей относительно ночных значений до 340%.

Функция тепловых карт (heatmap) веб-интерфейса позволила наглядно идентифицировать три зоны стабильно повышенного загрязнения, коррелирующие с расположением крупных перекрёстков с интенсивным транспортным потоком. Данная информация была передана в городской комитет по охране окружающей среды для принятия управленческих решений, что подтверждает практическую ценность разработанной системы.

3.4. Автономность и энергопотребление

В ходе эксперимента зафиксировано 6 событий продолжительной облачности (более 24 часов). Во всех случаях узлы продолжали штатную работу в течение не менее 72 часов после прекращения солнечной зарядки, что



подтверждает расчётный ресурс аккумулятора. Среднее суточное потребление узла при 5-минутном интервале измерений составило 1,92 Вт·ч, при этом в солнечные дни выработка фотоэлектрической панели покрывала потребление с запасом в 1,6–2,3 раза, обеспечивая полный заряд аккумулятора.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанная система успешно достигает поставленных целей. Достигнутая точность измерений PM_{2.5} ($R^2 = 0,93$, RMSE = 7,2 мкг/м³ после калибровки) сопоставима с результатами, представленными в аналогичных исследованиях [4, 7], и достаточна для задач городского экологического мониторинга. Применение алгоритма влажностной коррекции позволило снизить RMSE на 61% по сравнению с некалиброванными измерениями, что подчёркивает важность данного этапа обработки.

Коэффициент доставки сообщений 99,96% при реальных условиях городской эксплуатации превышает аналогичный показатель сопоставимой системы, описанной в работе [5] (98,7%), что объясняется применением QoS Level 1 протокола MQTT в сочетании с механизмом локального буферирования. Задержка 1,54 с при нагрузке реального эксперимента (40 узлов) является вполне приемлемой для задач, где не требуется управление в реальном времени.

Среди ограничений настоящего исследования необходимо отметить следующее. Во-первых, калибровка датчиков проводилась однократно; дрейф чувствительности электрохимических датчиков с течением времени потребует разработки процедуры периодической рекалибровки. Во-вторых, эксперимент проводился в городской среде с умеренным климатом; поведение системы в условиях экстремальных температур (выше +45°C или ниже -15°C) требует дополнительной проверки. В-третьих, связь узлов осуществлялась по Wi-Fi, что ограничивает радиус развёртывания расстоянием от точки доступа; для труднодоступных районов целесообразно использование LoRaWAN.



Перспективы дальнейшего развития системы включают: интеграцию алгоритмов машинного обучения для краткосрочного прогнозирования качества воздуха на основе накопленных временных рядов; поддержку протокола LoRaWAN для расширения зоны охвата; разработку мобильного приложения с функцией персональных оповещений; исследование возможности применения федеративного обучения для повышения точности калибровки без передачи сырых данных на центральный сервер.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе разработана и экспериментально верифицирована система мониторинга качества воздуха на основе распределённой сети IoT-датчиков. Система реализует измерение шести ключевых загрязнителей атмосферного воздуха (PM2.5, PM10, CO, NO₂, O₃, CO₂) и трёх метеорологических параметров, передачу данных по протоколу MQTT, их централизованную обработку с применением калибровочного алгоритма коррекции влажности, хранение в TimescaleDB и визуализацию на интерактивной картографической платформе.

По итогам исследования сформулированы следующие основные выводы. Применение алгоритма влажностной коррекции повысило точность измерений PM2.5 (R^2 с 0,79 до 0,93, RMSE с 18,4 до 7,2 мкг/м³), что соответствует требованиям класса В US EPA. Система обеспечивает коэффициент доставки сообщений 99,96% при задержке 1,54 с в условиях реальной городской эксплуатации. Автономные узлы сохраняют работоспособность не менее 72 часов без солнечной зарядки. Анализ 30-суточных данных с 40 узлов выявил выраженные пространственные градиенты загрязнения, превышение норм ВОЗ по PM2.5 в 78% точек и характерные суточные профили концентраций NO₂.

Разработанная система предоставляет органам городского управления объективный инструмент для принятия решений в сфере охраны окружающей среды и может найти применение в системах управления качеством воздуха



умных городов, экологического надзора на промышленных объектах, научных исследованиях городского климата, а также в системах оповещения населения о неблагоприятных экологических ситуациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. World Health Organization. Ambient Air Pollution: A Global Assessment of Exposure and Burden of Disease. — Geneva: WHO, 2016. — 121 p.
2. Snyder E. G. et al. The Changing Paradigm of Air Pollution Monitoring // Environmental Science & Technology. — 2013. — Vol. 47, No. 20. — P. 11369–11377.
3. Peng Z., Liu Y., Chen X. Low-Cost Sensor Network for Urban Air Quality Monitoring: A Review // Sensors. — 2022. — Vol. 22, No. 9. — P. 3474.
4. Kumar P. et al. The Rise of Low-Cost Sensing for Managing Air Pollution in Cities // Environment International. — 2015. — Vol. 75. — P. 199–205.
5. Duvall R. et al. Deliberating Performance Targets Workshop: Potential Paths Forward for Low-Cost Air Quality Sensors // Atmospheric Environment. — 2021. — Vol. 12, No. 100141.
6. Crilley L. R. et al. Characterisation of Low-Cost Optical Particle Counters for Monitoring PM_{2.5} // Atmospheric Measurement Techniques. — 2018. — Vol. 11, No. 5. — P. 2601–2610.
7. Morawska L. et al. Applications of Low-Cost Sensing Technologies for Air Quality Monitoring and Exposure Assessment // Environment International. — 2018. — Vol. 116. — P. 286–299.
8. Al-Ali A. R., Zualkernan I., Aloul F. A Mobile GPRS-Sensors Array for Air Pollution Monitoring // IEEE Sensors Journal. — 2010. — Vol. 10, No. 10. — P. 1666–1671.
9. Esposito E. et al. Practical Guidelines for Air Quality Monitoring with Low-Cost Sensors // Atmosphere. — 2021. — Vol. 12, No. 7. — P. 858.



10. Zimmerman 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.