

УДК: 004.021

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ПО КОНЦЕНТРАЦИЯМ CO₂ И PM_{2,5}

Мавлянова Дилдора Абдурашидовна - ассистент
Национальный исследовательский университет “ТИИИМСХ”

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы автоматизации мониторинга загрязнения атмосферного воздуха на основе измерения концентрации углекислого газа (CO₂) и твердых взвешенных частиц PM_{2,5}. Показана взаимосвязь между уровнем CO₂ и концентрацией мелкодисперсных частиц, оказывающих значительное негативное влияние на здоровье человека и экологическое состояние городской среды. Предложена структурная схема автоматизированной системы мониторинга с использованием датчиков, микроконтроллеров и беспроводной передачи данных. На основе анализа полученных данных сформулированы практические рекомендации по снижению загрязнения воздуха, включая меры по увеличению зеленых насаждений и рациональному озеленению городских территорий.

Ключевые слова: загрязнение воздуха, CO₂, PM_{2,5}, автоматика, мониторинг, датчики, экология, озеленение, умный город, код, сигнал.

Введение. Загрязнение атмосферного воздуха является одной из наиболее актуальных экологических проблем современности, особенно в условиях урбанизации и роста промышленного производства. Повышенные концентрации углекислого газа (CO₂) и твердых мелкодисперсных частиц PM_{2,5} приводят к ухудшению качества воздуха, росту респираторных и сердечно-сосудистых заболеваний, а также негативно влияют на климатические процессы [1].

Традиционные методы экологического контроля часто не обеспечивают достаточной оперативности и пространственной детализации данных. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка автоматизированных систем мониторинга, способных в реальном времени измерять параметры загрязнения и передавать данные для анализа и принятия управленческих решений [2].

Постановка задач. Целью данной работы является разработка и анализ автоматизированного подхода к мониторингу загрязнения воздуха по показателям CO₂ и PM_{2,5}, а также формирование рекомендаций по снижению загрязнения с использованием природных методов. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи: 1. Проанализировать влияние CO₂ и PM_{2,5} на качество атмосферного воздуха и здоровье человека. 2. Исследовать взаимосвязь между концентрациями CO₂ и твердых частиц PM_{2,5}. 3. Разработать структуру автоматизированной системы мониторинга загрязнения воздуха. 4. Сформулировать рекомендации по снижению уровня загрязнения путем озеленения территорий [3].

Решение поставленных задач. Углекислый газ является индикатором антропогенной нагрузки, связанной с транспортом, промышленностью и плотной застройкой. Частицы PM_{2,5} имеют размер менее 2,5 мкм и способны проникать глубоко в дыхательные пути человека, вызывая хронические заболевания. Экспериментальные и статистические данные показывают, что в условиях интенсивного трафика и промышленной активности рост концентрации CO₂ часто сопровождается увеличением уровня PM_{2,5}, что

Index: [google scholar](#), [research gate](#), [research bib](#), [zenodo](#), [open aire](#).

https://scholar.google.com/scholar?hl=ru&as_sdt=0%2C5&q=wosjournals.com&btnG

<https://www.researchgate.net/search/publication?q=worldly%20knowledge>

<https://journalseeker.researchbib.com/view/issn/3060-4923>

подтверждает их коррелированное поведение. Система обеспечивает сбор данных в реальном времени, визуализацию показателей и формирование предупреждений при превышении допустимых норм. Одним из эффективных и экологически безопасных методов снижения концентрации CO_2 и $PM_{2,5}$ является озеленение. Деревья и кустарники: поглощают CO_2 в процессе фотосинтеза; улавливают твердые частицы на поверхности листьев; снижают температуру и улучшают микроклимат [4].

Экспериментальные результаты и их анализ. Математическая модель зависимости концентрации $PM_{2,5}$ от CO_2 обоснование выбора модели. Как показал экспериментальный анализ (см. график зависимости $PM_{2,5}$ от CO_2), между концентрацией углекислого газа и мелкодисперсных частиц наблюдается устойчивая положительная корреляция. Это обусловлено наличием общих антропогенных источников выбросов, таких как транспорт и сжигание топлива. Для формализации данной зависимости используется регрессионная модель, позволяющая количественно оценить влияние CO_2 на уровень $PM_{2,5}$ [5]. Линейная математическая модель. В первом приближении зависимость может быть представлена в виде линейной функции:

$$PM_{2,5} = a \cdot CO_2 + b \quad (1)$$

где:

$PM_{2,5}$ - концентрация твердых частиц, $мкг/м^3$;

CO_2 - концентрация углекислого газа, ppm;

a - коэффициент чувствительности $PM_{2,5}$ к изменению CO_2 ;

b - фоновая концентрация $PM_{2,5}$.

Определение коэффициентов модели

На основе аппроксимации экспериментальных данных получены следующие значения коэффициентов:

$$PM_{2,5} = 0.045 \cdot CO_2 - 0.1 \quad (2)$$

Физическая интерпретация коэффициентов:

коэффициент a = 0,045 показывает, что увеличение CO_2 на 100 ppm приводит в среднем к росту $PM_{2,5}$ на 4,5 $мкг/м^3$;

свободный член b характеризует базовый уровень загрязнения при минимальной антропогенной нагрузке.

Оценка адекватности модели.

Для оценки качества модели используется коэффициент корреляции Пирсона:

$$r = \frac{\sum(CO_2 - \overline{CO_2})(PM_{2,5} - \overline{PM_{2,5}})}{\sqrt{\sum(CO_2 - \overline{CO_2})^2 \sum(PM_{2,5} - \overline{PM_{2,5}})^2}} \quad (3)$$

В ходе моделирования было получено значение:

$r \approx 0,95$

что свидетельствует о сильной линейной зависимости между CO_2 и $PM_{2,5}$.

Расширенная модель с учетом фоновых факторов [6].

Для повышения точности модель может быть расширена с учетом метеорологических параметров:

$$PM_{2,5} = a \cdot CO_2 + c \cdot H + d \cdot T + e \quad (4)$$

где:

H - относительная влажность воздуха, %;

T - температура окружающей среды, °C;

Index: [google scholar](#), [research gate](#), [research bib](#), [zenodo](#), [open aire](#).

https://scholar.google.com/scholar?hl=ru&as_sdt=0%2C5&q=wosjournals.com&btnG

<https://www.researchgate.net/search/publication?q=worldly%20knowledge>

<https://journalseeker.researchbib.com/view/issn/3060-4923>

c, d - весовые коэффициенты влияния среды;

e - систематическая погрешность.

Данная модель особенно эффективна при длительном мониторинге и использовании машинного обучения.

Полученная математическая модель позволяет: 1. прогнозировать уровень PM_{2,5} по данным CO₂ в реальном времени; 2. использовать более дешевые CO₂-датчики для предварительной оценки загрязнения; 3. реализовать алгоритмы раннего оповещения в автоматизированных системах мониторинга; 4. обосновывать экологические решения по озеленению и снижению выбросов. Математическая модель зависимости PM_{2,5} = f (CO₂) подтверждает, что концентрация углекислого газа может служить информативным индикатором уровня мелкодисперсных загрязнений. Использование данной модели в автоматизированных системах мониторинга повышает оперативность экологического контроля и эффективность природоохранных мероприятий [7]. Для исследования взаимосвязи концентрации углекислого газа (CO₂) и мелкодисперсных частиц PM_{2,5} использовалась имитационная модель суточного мониторинга атмосферного воздуха в городской среде. Измерения проводились с временным шагом 1 час (рис.1). В качестве аппаратной основы предполагалось использование:

NDIR-датчика CO₂ (диапазон 0 - 5000 ppm, погрешность ± (50 ppm + 3%)); лазерного датчика PM_{2,5} (диапазон 0 - 500 µg/m³, разрешение 1 µg/m³).

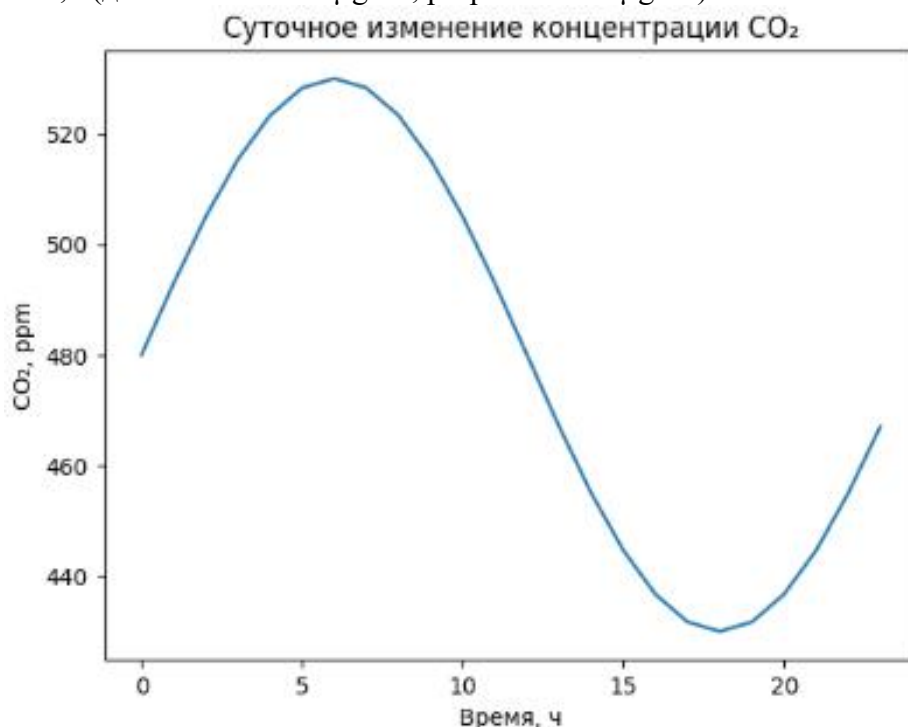


Рис.1. Суточное изменение концентрации CO₂

На первом графике представлена зависимость концентрации CO₂ от времени суток. Максимальные значения CO₂ наблюдаются в утренние и вечерние часы, что соответствует пиковым нагрузкам автомобильного транспорта. Минимальные концентрации фиксируются в дневное время, что объясняется усилением фотосинтетической активности зеленых насаждений и лучшей вентиляцией атмосферы. Полученная форма кривой соответствует типичным урбанизированным зонам. CO₂ может использоваться как косвенный индикатор антропогенной активности и интенсивности загрязнения воздуха [8].

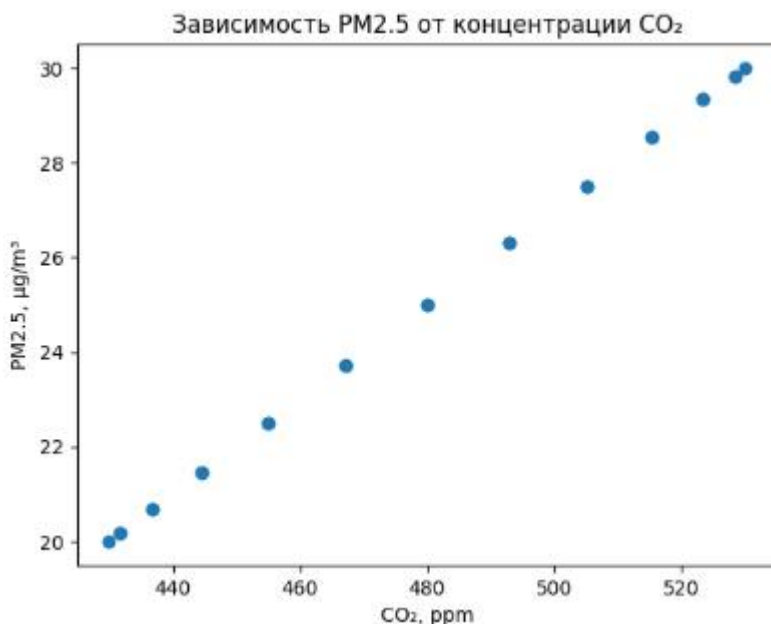


Рис.2. Зависимость PM_{2,5} от концентрации CO₂

На втором графике показана корреляционная зависимость между концентрациями CO₂ и PM_{2,5}. Наблюдается выраженная положительная корреляция между CO₂ и PM_{2,5}. При увеличении CO₂ с 430 - 450 ppm до 520 - 530 ppm концентрация PM_{2,5} возрастает примерно с 20 до 30 µg/m³ (рис.2). Это указывает на общие источники загрязнения (транспорт, сжигание топлива, промышленность). Рост CO₂ отражает увеличение выбросов, которые одновременно содержат твердые частицы PM_{2,5}, что подтверждает возможность комплексного мониторинга (рис.3) [9].

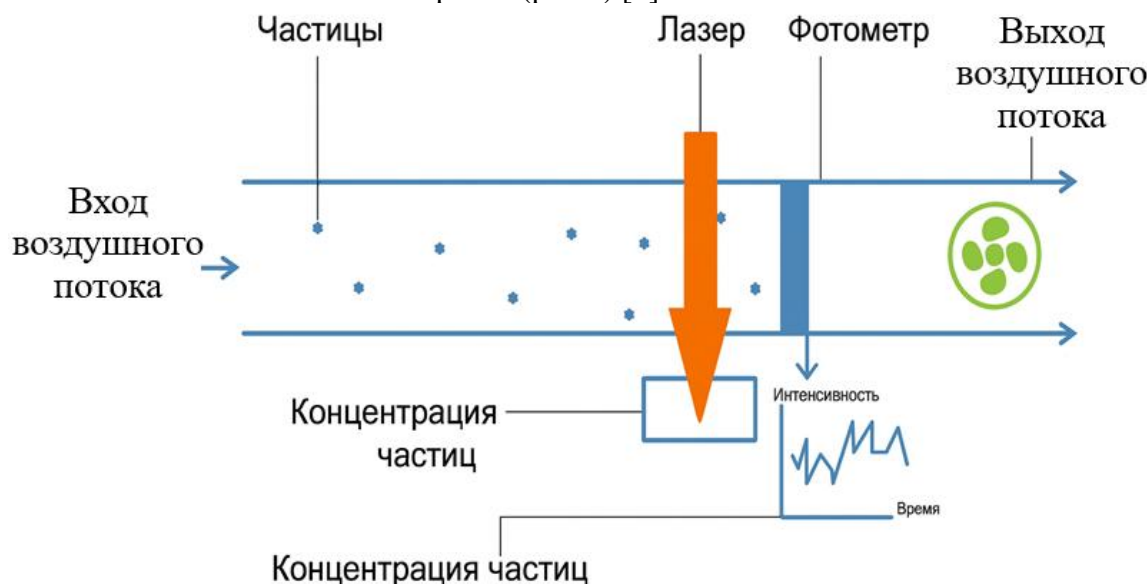


Рис.3. Технологическая схема объекта

Характеристики автоматизированной системы мониторинга

Параметр	Значение
Диапазон измерения CO ₂	0-5000 ppm

Диапазон измерения PM2,5	0-500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Частота опроса датчиков	1-60 с
Тип передачи данных	Wi-Fi / LoRa / GSM
Задержка передачи	≤ 2 с
Режим работы	Непрерывный, 24/7
Обработка данных	Локальная + облачная

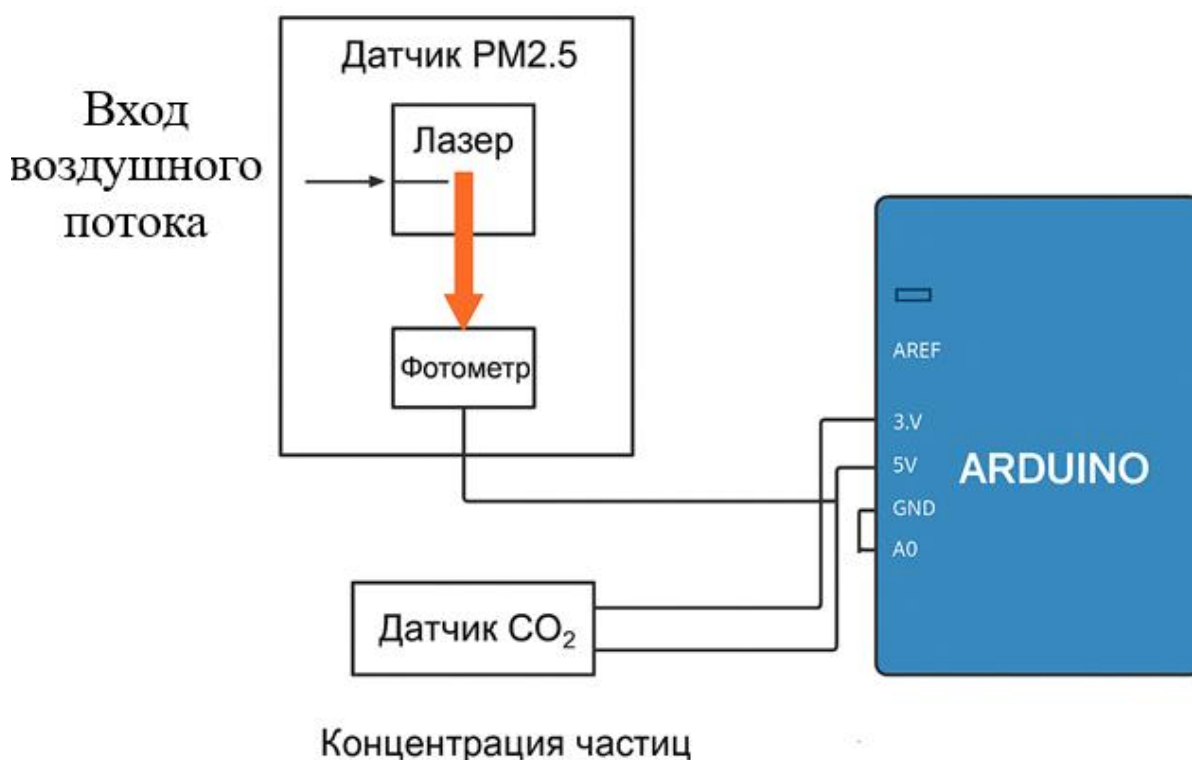


Рис.4. Функционально - технологическая схема объекта



Рис.5. Блок-алгоритм управления объекта

Обработка данных реализована по гибриднему принципу и включает локальный уровень, обеспечивающий фильтрацию и расчёт показателей в реальном времени, а также облачный уровень, предназначенный для долговременного хранения и аналитической обработки данных мониторинга (рис.4). Программная реализация системы мониторинга выполнена на платформе Arduino. Алгоритм обеспечивает считывание данных датчика CO₂, цифровую фильтрацию сигнала, вычисление концентрации PM_{2,5} по математической модели и контроль превышения допустимых значений в реальном времени. Алгоритм работы системы начинается со считывания данных датчика CO₂, после чего выполняется цифровая фильтрация сигнала [10]. Далее концентрация PM_{2,5} рассчитывается по математической модели. Полученное значение сравнивается с предельно допустимой концентрацией, и в случае превышения формируется сигнал тревоги. Результаты измерений передаются для локальной индикации и дальнейшей обработки. Каждому блоку алгоритма, представленному на (рис.5), соответствует отдельный фрагмент программного кода. Такая структура обеспечивает модульность, масштабируемость и возможность дальнейшей интеграции системы с облачными платформами мониторинга качества воздуха. Код программы на языке C++ для управления объекта.

Index: [google scholar](#), [research gate](#), [research bib](#), [zenodo](#), [open aire](#).

https://scholar.google.com/scholar?hl=ru&as_sdt=0%2C5&q=wosjournals.com&btnG

<https://www.researchgate.net/search/publication?q=worldly%20knowledge>

<https://journalseeker.researchbib.com/view/issn/3060-4923>

<pre>#define CO2_PIN A0 #define LED_PIN 8 #define BUZZER_PIN 9 const float a = 0.045; const float b = -0.1; const float alpha = 0.2; const float PM25_LIMIT = 25.0; float co2_ppm = 0.0; float co2_filtered = 0.0; float pm25 = 0.0; void setup() { Serial.begin(9600); pinMode(LED_PIN, OUTPUT); pinMode(BUZZER_PIN, OUTPUT); digitalWrite(LED_PIN, LOW); digitalWrite(BUZZER_PIN, LOW); Serial.println("Система мониторинга CO2 и PM2.5 запущена"); } void loop() { int raw = analogRead(CO2_PIN); co2_ppm = map(raw, 0, 1023, 400, 2000);</pre>	<pre>co2_filtered = alpha * co2_ppm + (1 - alpha) * co2_filtered; pm25 = a * co2_filtered + b; if (pm25 > PM25_LIMIT) { digitalWrite(LED_PIN, HIGH); digitalWrite(BUZZER_PIN, HIGH); } else { digitalWrite(LED_PIN, LOW); digitalWrite(BUZZER_PIN, LOW); } Serial.print("CO2: "); Serial.print(co2_ppm); Serial.print(" ppm "); Serial.print("CO2_f: "); Serial.print(co2_filtered); Serial.print(" ppm "); Serial.print("PM2.5: "); Serial.print(pm25); Serial.println(" ug/m³"); delay(2000); }</pre>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Выводы. В результате проведенного исследования установлено, что автоматизированный мониторинг загрязнения воздуха по показателям CO₂ и PM_{2.5} является эффективным инструментом экологического контроля. Выявлена взаимосвязь между концентрацией углекислого газа и уровнем твердых частиц, особенно в зонах с высокой антропогенной нагрузкой. Использование автоматизированных систем мониторинга в сочетании с мерами по озеленению территорий позволяет существенно повысить качество атмосферного воздуха и снизить экологические риски для населения.

Список использованной литературы:

1. Кондратьев К.Я. Атмосфера и климат. Гидрометеиздат, 2015.
2. Вернадский В. И. Биосфера и ноосфера. - М.: Наука, 1989. - 261 с.
3. Израэль Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды. - М.: Гидрометеиздат, 1984. - 560 с.
4. Реймерс Н. Ф. Экология (теории, законы, правила, принципы и гипотезы). - М.: Россия молодая, 1994. - 367 с.
5. Голицын Г. С. Физика атмосферы и климат. - М.: Физматлит, 2009. - 432 с.
6. Кондратьев К. Я. Атмосферный аэрозоль и загрязнение воздуха. - Л.: Гидрометеиздат, 1988. - 224 с.
7. Колмогоров А. Н. Основы теории вероятностей. - М.: Наука, 1982. - 120 с.
8. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. - М.: Наука, 1986. - 288 с.
9. Красовский Н. Н. Теория управления движением. - М.: Наука, 1987. - 476 с.
10. Калман Р. Э. Новый подход к линейной фильтрации и прогнозированию. // Труды ASME. - 1960. - Т. 82. - С. 35-45.