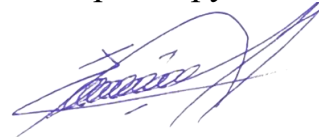


НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН

Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии

УДК 504.064.36

На правах рукописи



ХАКДОДОВ АКБАРДЖОН МАХМАДШАРИФОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО
МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В
УСЛОВИЯХ ГОРОДА ДУШАНБЕ**

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.9.6. Экология

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Амирзода Ориф Хамид

Душанбе - 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	4
ВВЕДЕНИЕ	7
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.....	9
ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА И АНАЛИЗ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ ГОРОДА ДУШАНБЕ	15
1.1. Методы и средства измерения концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе	15
1.2. Методики расчёта индексов качества атмосферного воздуха	30
1.3. Природно-климатические и антропогенные факторы формирования загрязнения атмосферного воздуха города Душанбе.....	42
1.4. Анализ действующей системы экологического мониторинга атмосферного воздуха города Душанбе	58
Выводы по первой главе	66
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ГОРОДА ДУШАНБЕ МЕЛКОДИСПЕРСНЫМИ ЧАСТИЦАМИ PM_{2.5}.....	68
2.1. Обоснование выбора измерительного оборудования для мониторинга концентраций PM _{2.5}	68
2.2 Оценка пригодности оптических датчиков типа SPS30 для измерения PM _{2.5}	72
2.3 Натурные измерения концентраций PM _{2.5} в различных природно- территориальных и метеорологических условиях	81
2.4 Статистический анализ многолетнего временного ряда концентраций PM _{2.5}	90
Выводы по второй главе.....	100
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ И ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В УСЛОВИЯХ ГОРОДА ДУШАНБЕ	102

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АИС** – автоматизированная информационная система
- БД** – база данных
- БПЛА** – беспилотные летательные аппараты
- ВОЗ** – Всемирная организация здравоохранения
- ГБАО** – Горно-Бадахшанская автономная область
- ЕГСЭМ** – единая государственная система экологического мониторинга
- ЕС** – Европейский союз
- ИЗА** – индекс загрязнения атмосферы (воздуха)
- КИЗА** – комплексный индекс загрязнения атмосферы
- МОП** – металл-оксид-полупроводник
- ПДК** – предельно допустимые концентрации
- РИСМКAB** – распределённая информационная система мониторинга качества атмосферного воздуха
- РРП** – районы республиканского подчинения
- РТ** – Республика Таджикистан
- СППР** – система поддержки принятия решений
- СУБД** – система управления базами данных
- ТЭЦ** – теплоэлектроцентраль
- ЦДП** – центральный диспетчерский пункт
- ACF** – автокорреляционная функция (Autocorrelation Function)
- ACK** – подтверждение получения данных (Acknowledgement)
- AOT** – оптическая толщина аэрозоля (Aerosol Optical Thickness)
- API** – программный интерфейс приложения (Application Programming Interface)
- AQC** – категории качества воздуха (Air Quality Categories, Австралия)
- AQHI** – индекс здоровья по качеству воздуха (Air Quality Health Index)
- AQI** – индекс качества воздуха (Air Quality Index)
- ARIMA** – авторегрессионная модель интегрированного скользящего среднего (AutoRegressive Integrated Moving Average)
- ATMO** – индекс качества воздуха (Франция)
- BELATMO** – индекс качества воздуха (Бельгия)
- CAQI** – общий индекс качества воздуха (Common Air Quality Index, ЕС)
- COMEAP** – Комитет по медицинским последствиям загрязнения воздуха (Committee on the Medical Effects of Air Pollutants, Великобритания)

CoV – коэффициент вариации (Coefficient of Variation)

CSV – формат текстовых файлов для табличных данных (Comma-Separated Values)

DAQI – суточный индекс качества воздуха (Daily Air Quality Index, Великобритания)

DEFRA – Министерство по вопросам окружающей среды, продовольствия и сельского хозяйства Великобритании

DRAGON – распределённые региональные сети наблюдений за аэрозолями

EPA (US EPA) – Агентство по охране окружающей среды США (Environmental Protection Agency)

FR – функциональные требования (Functional Requirements)

India-AQI – индекс качества воздуха Индии

IoT – интернет вещей (Internet of Things)

IQR – межквартильный размах (Interquartile Range)

ISO/IEC 25010 – международный стандарт качества программных систем

KNN – метод k ближайших соседей (K-Nearest Neighbors)

LSTM – долгая краткосрочная память (Long Short-Term Memory)

MAPI – Малайзийский индекс загрязнителей воздуха (Malaysian Air Pollutant Index)

ML – машинное обучение (Machine Learning)

MODIS – спектрорадиометр среднего разрешения (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)

NAAQS – национальные стандарты качества атмосферного воздуха США (National Ambient Air Quality Standards)

NB – наивный байесовский классификатор (Naive Bayes)

NFR – нефункциональные требования (Non-Functional Requirements)

NRMSE – нормированная среднеквадратическая ошибка (Normalized Root Mean Square Error)

PACF – частная автокорреляционная функция (Partial Autocorrelation Function)

P-A...P-E – условные обозначения функциональных пакетов вариантов использования

PM – взвешенные твёрдые частицы (Particulate Matter)

PM1 (PM1.0) – взвешенные частицы диаметром до 1 мкм

PM2.5 – взвешенные частицы диаметром до 2,5 мкм

PM4 – взвешенные частицы диаметром до 4 мкм

PM10 – взвешенные частицы диаметром до 10 мкм

PSI – стандартный индекс загрязнителей (Pollutant Standards Index, Сингапур)

QC – контроль качества (Quality Control)

R² – коэффициент детерминации

RBAC – ролевая модель управления доступом (Role-Based Access Control)

RF – случайный лес (Random Forest)

RH – относительная влажность (Relative Humidity)

RMSE – среднеквадратическая ошибка (Root Mean Square Error)

SARIMA – сезонная авторегрессионная модель интегрированного скользящего среднего (Seasonal ARIMA)

SD – стандартное отклонение (Standard Deviation)

SD-01...SD-08 – диаграммы последовательности (Sequence Diagram)

UART – универсальный асинхронный приёмопередатчик

UML – унифицированный язык моделирования (Unified Modeling Language)

WHO – Всемирная организация здравоохранения (англ.; см. ВОЗ)

XGBoost – алгоритм градиентного бустинга (Extreme Gradient Boosting)

YACAQI – годовой индекс качества воздуха (Yearly Air Quality Index)

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Проблема загрязнения атмосферного воздуха относится к числу серьезных экологических проблем, который согласно данным Всемирной организации здравоохранения, приводит к различным заболеваниям сердечно-сосудистой, дыхательной, эндокринной систем, аллергических реакций, онкопатологии и др. Основной вклад в загрязнение качества атмосферного воздуха города Душанбе вносят мелкодисперсные частицы PM_{2.5}, что является ключевым параметром для оценки качества атмосферного воздуха. Традиционная система мониторинга качества атмосферного воздуха основана на стационарных постах наблюдений и периодической обработке данных, что не всегда обеспечивает необходимую пространственно-временную детализацию, оперативность анализа и прогнозирования состояния воздушной среды. Динамичное развитие города требует перехода от фрагментарных наблюдений к интеллектуальным автоматизированным информационным системам мониторинга, что способна осуществлять непрерывный сбор, обработку, хранение, анализ, прогнозирование и визуализацию экологических данных о состоянии качества атмосферного воздуха. Предлагаемая концепция интеллектуальной автоматизированной информационной системы мониторинга качества атмосферного воздуха базируется на интеграции ряда технологий Индустрии 4.0 в единую модульную систему, что является актуальной научно-практической задачей, которая имеет значение как для развития теории экологического мониторинга, так и для повышения эффективности природоохранного управления в условиях города Душанбе.

Степень научной разработанности изучаемой проблемы. Проблематика оценки и мониторинга качества атмосферного воздуха носит междисциплинарный характер и опирается на фундаментальные исследования в области физики атмосферы, метеорологии загрязнения, экологического мониторинга и математического моделирования рассеивания примесей.

Принципы проведения экологического мониторинга освещены учеными Израэль Ю.А. [10], Герасимовым И.П. [128] и Соколовым В.Е. [129]. В трудах Теличенко В.И. [114], Ильичева В.А. [115], Азарова В.Н. [122], Медоуза Д. [21], Форрестера Дж. [20], Стольберга В.Ф. [105], Чистяковой С.Б. [106], Садовниковой Н.П. [210] и др. исследована проблема анализа загрязнения атмосферного воздуха при управлении урбанизированной территорией. Вопросами построения автоматизированных систем экологического мониторинга занимались российские ученые Моисеев Н.Н. [201], Аверин Г.В. [150] и др. В научных трудах Берлянда М.Е. [109], Оникул Р.И., Генихович Е.Л. [110]. и др. сформулированы фундаментальные математические модели загрязнения атмосферы. Вопросы изучения уровней загрязнения воздуха мелкодисперсными частицами в городах посвящены труды С.А. Pore и D.W. Dockery [117], А.Р. Шагидуллина [65] и отечественных ученых Абдуллозода С.Ф. и Тиллозода Х.И. [127].

Анализ существующих исследований показывает, что применительно к условиям города Душанбе проблема построения комплексной автоматизированной информационной системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха остается недостаточно разработанной. Имеющиеся подходы часто ориентированы либо на сбор и хранение данных, либо на отдельные элементы анализа, но не обеспечивают целостной архитектуры, которая объединяет сенсорный сбор данных, метеорологическую информацию, проверку достоверности, прогнозирование, контроль превышений предельно допустимых концентраций, автоматическое формирование уведомлений, интеграцию беспилотных средств и поддержку принятия решений. Это определяет необходимость дальнейшего научного исследования и разработки архитектурных, методических и информационно-технологических решений, которые направлены на совершенствование системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха в городе Душанбе.

Связь исследования с программами и научными темами. Тематика работы связана с Государственной экологической программой Республики

Таджикистан на 2023–2028 годы, которая разработана на основании Национальной стратегии развития Республики Таджикистан на период до 2030 года и 2025-2030 годами развития цифровой экономики и инноваций в Таджикистане, провозглашенный Президентом Республики Таджикистан, уважаемым Эмомали Рахмоном.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Целью диссертационной работы является научное обоснование совершенствования системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха на основе проектирования автоматизированной информационно-аналитической системы.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить основные подходы к измерению концентраций загрязняющих веществ атмосферного воздуха, включая стационарные, мобильные, сенсорные, дистанционные и автоматизированные методы наблюдения;
2. Провести обзор состояния качества атмосферного воздуха в городе Душанбе с учетом основных загрязняющих веществ, факторов формирования загрязнения, сезонной изменчивости и влияния природно-климатических условий;
3. Выполнить анализ существующей системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха в городе Душанбе, выявить ее организационные, технические и информационно-аналитические ограничения;
4. Обосновать применимость низкобюджетных оптических датчиков в системах мониторинга качества атмосферного воздуха;
5. Спроектировать автоматизированную информационную систему мониторинга качества атмосферного воздуха, которая включает функциональные модули сбора, обработки, хранения, анализа,

прогнозирования, контроля превышений, визуализации, уведомлений и формирования отчетов.

Объектом исследования является система экологического мониторинга качества атмосферного воздуха в условиях города Душанбе.

Предметом исследования являются качество атмосферного воздуха и методы, модели, архитектурные и информационно-технологические решения совершенствования системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха на основе проектирования автоматизированной информационной системы.

Научная новизна исследования заключается в:

1. Уточнении структуры современной системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха как многоуровневого цифрового процесса, включающего этапы сбора, верификации, хранения, анализа, прогнозирования, контроля нормативных превышений и поддержки принятия решений;

2. Обосновании необходимости интеграции стационарных, мобильных и специализированных источников данных в единую автоматизированную информационную систему мониторинга атмосферного воздуха в условиях города Душанбе;

3. Обосновании пригодности низкобюджетных оптических датчиков для измерения концентрации PM_{2.5} в городской среде и получении калибровочной модели с учётом относительной влажности, обеспечивающей повышение точности измерений;

4. Разработке архитектуры автоматизированной информационной системы экологического мониторинга, которая отличается включением модулей сенсорного сбора данных, метеорологической информации, базы данных, блокчейн-проверки достоверности, прогнозирования, контроля ПДК, смарт-контрактов, уведомлений и отчётности;

5. Предложении алгоритма слияния данных разнородных источников с учётом коэффициента качества данных и коэффициента пространственно-

временной релевантности, а также логики автоматизированного реагирования на превышение допустимых концентраций загрязняющих веществ, предусматривающей формирование уведомлений, фиксацию события в информационной системе и инициирование дополнительных измерений с применением мобильных или беспилотных средств наблюдения.

Теоретическая и научно – практическая значимость диссертационного исследования. В работе уточнено понимание мониторинга как информационно-аналитического процесса, в котором измерение загрязняющих веществ является только одним из этапов более сложной системы экологической оценки, прогнозирования и поддержки управленческих решений. Разработанная архитектура может быть использована как методическая основа для дальнейших исследований в области интеллектуального экологического мониторинга, цифровых платформ наблюдения за качеством воздуха и систем прогнозирования экологических рисков. Практическая значимость исследования заключается в возможности применения полученных результатов при совершенствовании системы мониторинга качества атмосферного воздуха в городе Душанбе и других городах с аналогичными природно-климатическими и инфраструктурными условиями.

Разработанные решения могут быть использованы при проектировании автоматизированных информационных систем, создании городских экологических панелей мониторинга, внедрении сенсорных сетей, разработке модулей прогнозирования загрязнения воздуха и подготовке аналитических отчетов для органов управления, экологических служб, образовательных и научных организаций.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Научно обоснована необходимость совершенствования системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха в городе Душанбе, обусловленная недостаточной пространственно-временной детализацией

наблюдений, ограниченной оперативностью анализа и потребностью в цифровой поддержке природоохранных решений.

2. Приведены результаты анализа экспериментальных исследований, обосновывающий применимость оптических датчиков в системах мониторинга качества атмосферного воздуха, включая установленные условия достоверности их показаний – среднечасовое усреднение и влажностную калибровку, а также выявленные закономерности пространственной, суточной и сезонной изменчивости концентраций PM_{2.5} в условиях города Душанбе.

3. Предложен проект автоматизированной информационной системы мониторинга качества атмосферного воздуха, обеспечивающей комплексную обработку экологических данных, визуализацию состояния городской воздушной среды, прогнозирование загрязнения и информационную поддержку принятия природоохранных решений.

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов диссертационного исследования обеспечивается использованием научно–обоснованных методов анализа, систематизацией современных подходов к экологическому мониторингу, применением нормативных и методических положений в области охраны атмосферного воздуха, анализом фактического состояния качества атмосферного воздуха в городе Душанбе, а также логической согласованностью предложенной архитектуры автоматизированной информационной системы. Достоверность проектных решений обеспечивается внутренней согласованностью функциональных модулей АИС, соответствием разработанной архитектуры задачам мониторинга качества атмосферного воздуха и возможностью практической реализации предложенных решений с использованием современных информационных технологий.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности ВАК при Президенте Республике Таджикистан по специальности 2.9.6. Экология:

п.3.8. Разработка и совершенствование системы экологического мониторинга и контроля на транспорте;

п.3.9. Научные основы управления антропогенным воздействием объектов транспорта на основе информационных систем;

п.4.3. Принципы и механизмы системного экологического мониторинга, аналитического контроля в отраслях промышленности;

п.4.8. Информационные технологии, как инструмент достижения экологической и экономической эффективности работы предприятий отраслей промышленности;

Личный вклад соискателя в получении научных результатов заключается в постановке научной задачи, анализе теоретических и методических основ экологического мониторинга качества атмосферного воздуха, изучении состояния воздушной среды города Душанбе, выявлении ограничений существующей системы мониторинга, разработке архитектуры автоматизированной информационной системы, определении состава ее функциональных модулей и проектировании информационно-аналитической модели мониторинга. Автором в настоящем исследовании опубликованы научные статьи, произведена апробация результатов исследования на научно-практических мероприятиях, разработаны прототипы интерфейсов автоматизированной системы и сформированы практические рекомендации по совершенствованию системы экологического мониторинга атмосферного воздуха в городе Душанбе.

Апробация и реализация результатов исследования. Основные результаты диссертационного исследования докладывались на:

– региональной конференции стран Центральной Азии C5+1, (г. Ташкент, Узбекистан, 2024 г.);

– II-ой международной научно-практической конференции, «Актуальные вопросы металлургии в условиях ускоренной индустриализации страны», посвящённой годам развития промышленности и 20-летию изучения и развития

естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования, (г. Душанбе, Таджикистан, 2025 г.);

– III-ой Международной научно-практической конференции «Природоориентированные решения экологических проблем», г. Ташкент, Узбекистан, 2025 г.);

– XXII-ой Международной научно-практической конференции «Управление информационными ресурсами», (г. Минск, Беларусь, 2026 г.).

Публикации по теме диссертации. По теме диссертационного исследования опубликовано 7 научных работ, в том числе 4 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Высшей Аттестационной Комиссией Республики Таджикистан, 3 публикаций в материалах международных и республиканских научно-практических конференций. Получен малый патент Республики Таджикистан на изобретение современной архитектуры системы экологического мониторинга атмосферного воздуха промышленного региона. В опубликованных работах отражены основные результаты диссертационного исследования, включая анализ состояния атмосферного воздуха, методические основы экологического мониторинга, применение цифровых технологий, проектирование архитектуры автоматизированной информационной системы и разработку подходов к интеллектуальной обработке экологических данных.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованной литературы. Общий объем диссертации составляет 161 страниц машинописного текста. Работа включает 55 рисунков и 30 таблиц. Список использованной литературы содержит 210 наименований.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА И АНАЛИЗ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ ГОРОДА ДУШАНБЕ

1.1. Методы и средства измерения концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе

Проблема загрязнения атмосферного воздуха признана Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) одной из самых серьезных экологических угроз [1]. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу становятся причиной развития заболеваний сердечно-сосудистой, дыхательной, эндокринной систем, аллергических реакций, онкопатологии и др [2]. В условиях Таджикистана загрязнение воздуха может нанести значительный ущерб не только здоровью людей, но вызывать и экономические потери в связи со снижением урожайности сельскохозяйственных культур и ускоренное таяние ледников. В связи с этим постоянный контроль за качеством атмосферного воздуха является важнейшей задачей как на государственном, так и на общемировом уровнях.

Для нормирования загрязнителей атмосферного воздуха с учётом класса опасности существуют «Глобальные рекомендации ВОЗ по качеству воздуха, касающиеся озона (O_3), двуокиси азота (NO_2), двуокиси серы (SO_2), окиси углерода (CO) и твёрдых частиц (PM_{2,5} и PM₁₀)», с учетом которых каждая страна самостоятельно устанавливает свои предельно-допустимые концентрации вредных веществ (ПДК), путём определения значения максимально-разовых, среднесуточных и среднегодовых концентраций загрязняющих веществ [3].

Исходя из этого, многими странами на законодательном уровне устанавливаются ПДК различных загрязнителей и реализуется комплекс мероприятий, направленных на усиление контроля за качеством атмосферного воздуха и снижением уровня загрязнения. Наибольшие успехи в сфере контроля качества атмосферного воздуха достигнуты в странах Европы, США, Китае, жители которых могут получать актуальную информацию о состоянии

атмосферного воздуха в свободном доступе в режиме реального времени [4]. Однако, у развитых и развивающихся стран неодинаково возможности контроля качества атмосферного воздуха и покрытие территории сетью пунктов наблюдения за состоянием атмосферы.

Например, мониторинг качества атмосферного воздуха в странах Центральной Азии проводится в каждой стране и по количеству постов наблюдения, городов, охваченные мониторингом, контролируемым загрязняющим веществам, показателям загрязнения атмосферы и информированием населения находятся на разном уровне [4]. Возможность преодоления этого разрыва связывают с новыми технологиями Р. Kumar и соавт., отмечая, что «недорогие сенсоры позволяют существенно повысить плотность сетей наблюдения за качеством воздуха в городах» [6].

В Республике Таджикистан на законодательном уровне действует единая государственная система экологического мониторинга. Мониторинг состояния атмосферного воздуха проводится в соответствии с законами Республики Таджикистан о гидрометеорологической деятельности от 23 июля 2016 года 1345 и «Об охране атмосферного воздуха» от 28 декабря 2012 года № 915 Агентством по гидрометеорологии Комитета охраны окружающей среды при Правительстве Республики Таджикистан и результаты уровня загрязнения атмосферного воздуха по 5 городам ежедневно публикуется в электронном виде на сайте агентства [7]. Кроме, того одна независимая автоматическая станция мониторинга находится на территории посольства США в г. Душанбе [8]. Под мониторингом окружающей среды понимается «система наблюдений, позволяющая выделить изменения состояния биосферы под влиянием человеческой деятельности» [9], что задаёт исходную рамку для построения любой системы контроля качества атмосферного воздуха.

Так, согласно Закону Республики Таджикистан «Об охране атмосферного воздуха» [10], «мониторинг состояния атмосферного воздуха представляет собой система наблюдений за состоянием атмосферного воздуха, его загрязнением и за происходящими в нем природными явлениями, а также оценка и прогноз

состояния атмосферного воздуха, его загрязнения». Как приводится в [4] Оценка качества атмосферного воздуха проводится как по данным инструментальных замеров с помощью стационарных, маршрутных и передвижных постов наблюдения, так и по расчётным данным с использованием современных компьютерных моделей.

В настоящее время, организация и проведение мониторинга за уровнем загрязнения атмосферы по физическим и химическим показателям на территории Республики Таджикистан осуществляются с помощью 5 стационарных наблюдательных пунктов в городах Душанбе, Бохтар, Турсунзаде, Худжанд и Гулистон (рисунок 1.1). Контролируемые загрязняющие вещества - (PM_{2,5}, PM₁ и PM₁₀) взвешенные частицы (пыль), CO, SO₂, NO_x, NO₂, HF и др. Проводится сбор, обработка и хранение информации как в ручном так в автоматическом режиме, а также составление ежегодных обзоров по качеству атмосферного воздуха, Степень загрязнения атмосферного воздуха оценивается при сравнении концентрации примесей (мг/м³) с ПДК.

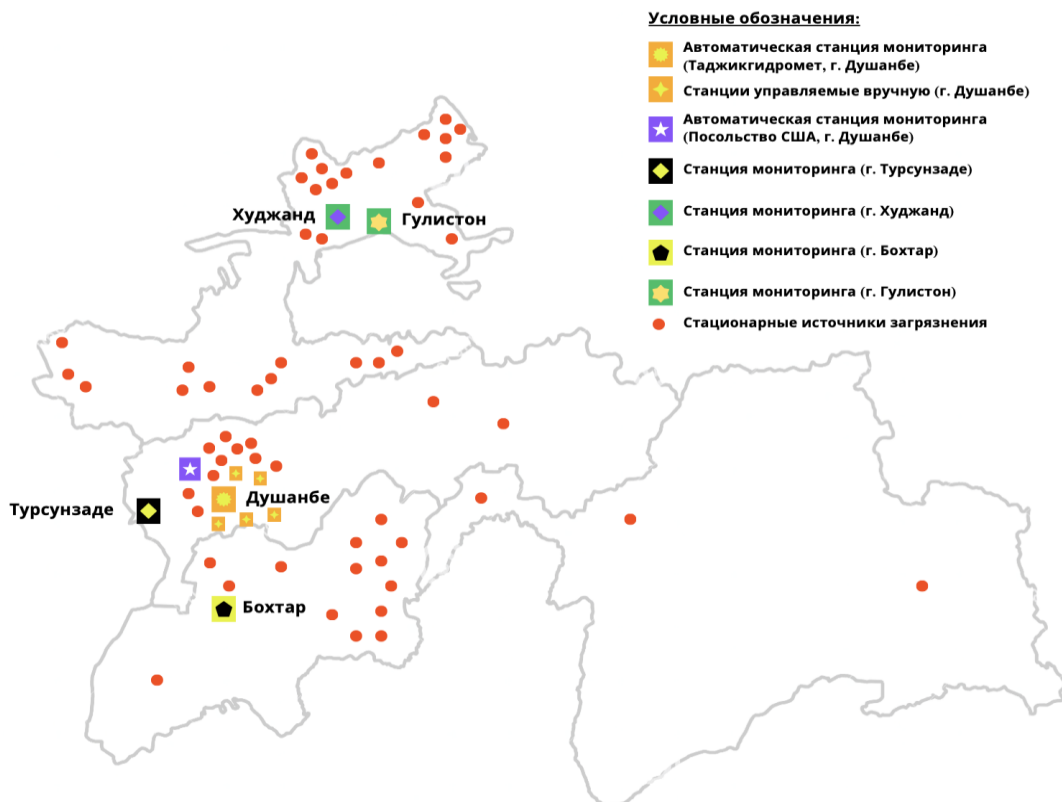


Рисунок 1.1. – Расположение станций мониторинга и стационарные источники загрязнения в Республике Таджикистан

В целях улучшения экологической ситуации в стране, принята Государственная экологическая программа Республики Таджикистан на 2023-2028 годы, утвержденная постановлением Правительства Республики Таджикистан от 1 марта 2023, №53 [11].

Одной из задач этой программы является улучшение качества атмосферного воздуха. Отмечается [11], что основными источниками постоянных выбросов и загрязнения воздуха в Республики Таджикистан являются металлургические и цементные заводы, а также энерго-и теплоцентры, действующие на угле. К основным источникам загрязнения атмосферного воздуха также относятся транспортные выбросы, а наибольшие выбросы вредных веществ из стационарных и передвижных источников наблюдаются в промышленных зонах страны.

Состояние атмосферного воздуха влияет на живые существа, прежде всего, на здоровье человека. По мере роста промышленности и экономики проблема загрязнения воздуха становится все более серьезной. В связи с этим, для улучшения состояния атмосферного воздуха требуется проведение следующих мероприятий:

- анализ состояния атмосферного воздуха в зависимости от каждого источника выброса отходов;
- оценка эффективности мероприятий по охране атмосферного воздуха на каждом предприятии и технологической линии;
- разработка комплекса мероприятий по улучшению ситуации, снижению объема и содержания загрязнителей окружающей среды;
- создание базы данных о состоянии загрязнения атмосферного воздуха в условиях изменения климата;
- контроль и регулирование количества загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу от постоянных источников промышленных предприятий крупных городов;
- строгий контроль за выделением загрязняющих веществ из транспортных средств;

- разработка и внедрение оперативной системы оповещения населения об опасности отравления от добычи ядовитых веществ и др.

Однако, по данным Всемирного банка [12] в республике отсутствует комплексная система мониторинга качества воздуха, т.е. станции неравномерно распределены по городу Душанбе и других районах, чтобы охватить различные источники (фон, автомобильное движение, промышленность и др.), а также доступность данных является недостаточной, позволяющие получить необходимую информацию о качестве атмосферного воздуха.

В связи с ускоренной индустриализацией страны [13], реализацией концепции «Зеленый город» в городе Душанбе, где предусматривается улучшение экологической ситуации в городе, повышение качества и достоверности оценок состояния окружающей среды, улучшение информирования населения за счет применения цифровых технологий [14], а также прогнозирование ситуаций с песчано-пыльных бурь, которые в последние годы в чаще накрывает почти все территории страны [15], возрастает необходимости совершенствование мониторинга качества атмосферного воздуха.

Следовательно, исследование качества атмосферного воздуха с целью снижения воздействия загрязнения воздуха на здоровье людей и экономики требует комплексного подхода с участием всех заинтересованных сторон [16] и применения современных автоматизированных комплексов на основе моделей и компьютерных технологий [17,18]. Методологической основой системного анализа урбанизированных территорий служат работы Дж. Форрестера, показавшего, что «поведение сложной системы определяется её внутренней структурой обратных связей, а не внешними воздействиями» [19], и Д. Медоуза с соавторами, предупреждавших, что «при сохранении существующих темпов роста пределы развития человечества будут достигнуты в течение ближайшего столетия» [20].

Поэтому анализ состояния мониторинга качества атмосферного воздуха в целях повышения его эффективности с применением современных методов и технологий является актуальной задачей.

Качество атмосферного воздуха – «это совокупность физических, химических и биологических свойств воздуха, отражающая степень его соответствия экологическим и гигиеническим нормативам, при которых отсутствует прямое или косвенное вредное воздействие на здоровье человека, последующие поколения и компоненты экосистемы в целом» [21].

Нормирование ведётся через установление максимально-разовых (ПДКм.р.), среднесуточных (ПДКс.с.) и среднегодовых (ПДКс.г.) концентраций, при этом конкретные значения ПДК каждое государство утверждает самостоятельно. Как подчёркивается в [3], «Глобальные рекомендации по качеству воздуха, разработанные ВОЗ, применимы в любой из стран мира, так как данные, касающиеся твердых частиц (PM2.5 и PM10), озона, двуокиси азота, двуокиси серы и окиси углерода, получены на основе экспертных оценок актуальных данных об их влиянии на здоровье».

Нормативы установленные ВОЗ являются «рекомендательными, тогда как национальные стандарты носят обязательный характер» [22]. Предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ атмосферного воздуха приведены в таблице 1.1

Таблица 1.1. – Предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ атмосферного воздуха (мкг/м³)

Страна / система	PM2.5 (год/сут)	PM10 (год/сут)	NO ₂ (год/сут/1ч)	SO ₂ (сут/1ч)	O ₃ (8 ч/1ч)	CO (8 ч), мг/м ³
ВОЗ	5 / 15	15 / 45	10 / 25 / 200	40 / 500	100 / –	10
США	9 / 35	– / 150	53 / – / 188	– / 196	140 / –	10
ЕС	25 / –	40 / 50	40 / – / 200	125 / 350	120 / –	10

Примечания: Все значения приведены в мкг/м³, за исключением CO (мг/м³). Обозначения: год - среднегодовая концентрация, сут - среднесуточная, 1

ч - максимальная разовая (часовая), 8 ч - скользящее среднее за 8 часов, значения для США переведены из ppm/ppb в мкг/м³ (при стандартных условиях).

Источник – Составлено автором на основе международных и национальных нормативных документов: «рекомендаций Всемирной организации здравоохранения (WHO Air Quality Guidelines, 2021)», «стандартов США (EPA NAAQS)» [23], «директив Европейского союза (EU Air Quality Directive)» [24].

В литературных источниках приводятся различные классификации технологий мониторинга качества атмосферного воздуха. Так, на рисунке 1.2 представлена обобщенная классификация технологий, которые применяются в системе мониторинга качества атмосферного воздуха.

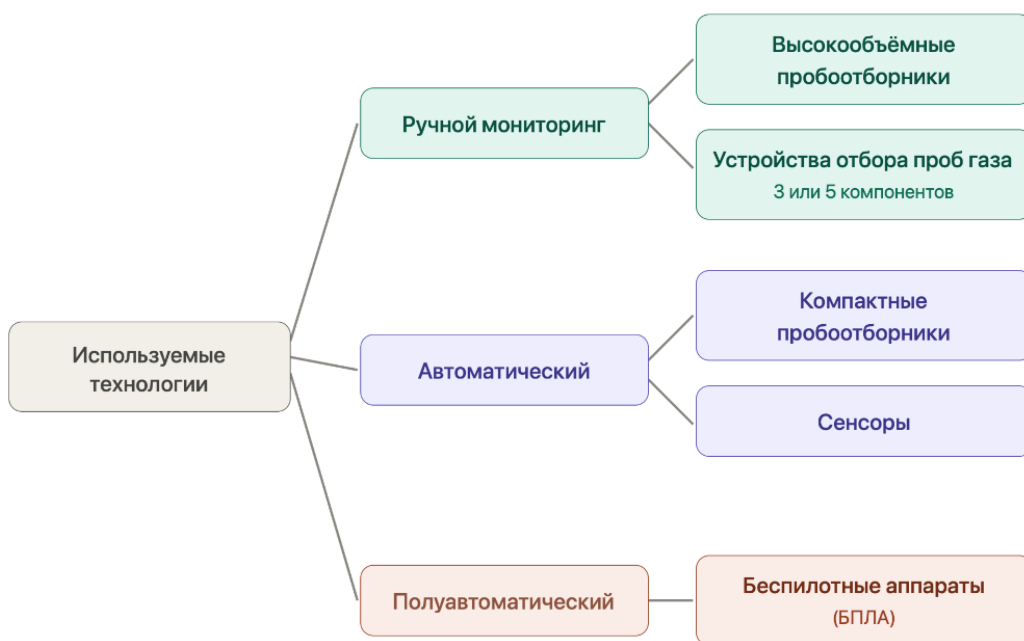


Рисунок 1.2. – Классификация технологий мониторинга качества атмосферного воздуха

Согласно представленной классификации, в литературе приводится так называемые ручные (лабораторные) методы измерения концентраций загрязняющих веществ прошлого столетия XX века, которые исторически лежат в основе развития методов контроля качества атмосферного воздуха [25]. Ручные методы обладали свойствами относительной простоты доступности и

возможности использования в условиях ограниченной технической оснащённости. Смену методической парадигмы контроля воздуха фиксируют Е. G. Snyder и соавт., отмечая, что «переход к компактным сенсорам изменяет саму парадигму мониторинга загрязнения воздуха» [26].

В основе ручных методов лежат химико-аналитические методы, которые основаны на поглощении исследуемого компонента с последующим количественным определением его концентрации с применением фотометрических, титриметрических или гравиметрических процедур. В таблице 1.2 приведены основные ручные методы, которые применялись для определения концентраций загрязняющих веществ.

Таблица 1.2. – Ручные методы измерения загрязнений атмосферного воздуха

Метод	Загрязнитель	Суть метода	Особенности	Недостатки
Парарозанилиновый (West–Gaeke)	SO ₂	Поглощение газа раствором с последующим фотометрическим анализом	Применимо в лабораторных и полевых условиях	Длительное измерение; токсичные реагенты; низкая оперативность
Йодометрия/колориметрия/турбидиметрия	SO ₂	Химические реакции с изменением цвета или мутности раствора	Простые и дешёвые методы	Низкая точность; влияние примесей
Хемилюминесцентный метод (этилен)	O ₃	Озон реагирует с этиленом с результирующим эффектом свечения	Высокая чувствительность; быстрый результат	Требуется оборудование; чувствителен к помехам
Йодидный метод	O ₃	Окисление йодида с образованием йода	Применимо в полевых условиях	Низкая селективность (измеряет сумму окислителей)

Продолжение таблицы 1.2

Осадочная пыль (гравиметрия)	Пыль (PM)	Осаждение частиц на поверхность и взвешивание	Простой метод
---------------------------------	-----------	---	---------------

В XXI веке началось широкое применение современных методов, основанных на различных физических и физико-химических принципах. Следует выделить наиболее распространенные методы, к которым отнесем методы «бета-ослабления, гравиметрический метод пьезобалансового колебательного взвешивания, ультрафиолетовой флуоресценции и абсорбции, хемилюминесценции, а также корреляционные инфракрасные методы» [27-29]. Основные характеристики названных методов представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3. – Автоматические методы измерения загрязнений атмосферного воздуха

Метод	Загрязнитель	Принцип работы	Особенности	Недостатки
Бета-ослабление (Beta Attenuation)	PM10, PM2.5	Ослабление потока β -излучения при прохождении через слой частиц	Высокая точность; широко используется на станциях мониторинга	Требуется калибровка; чувствителен к влажности
Гравиметрический метод пьезобалансового взвешивания	PM10, PM2.5	Изменение частоты колебаний элемента при накоплении массы частиц	Непрерывные измерения; высокая чувствительность	Потери летучих компонентов при нагреве
УФ-флуоресценция	SO ₂ , SO _x	Возбуждение молекул УФ-излучением и последующее свечение	Высокая селективность; точность	Требуется стабильных условий; дорогостоящее оборудование
Хемилюминесценция	NO _x	Реакция NO с O ₃ результирующей излучением света	Быстрый отклик; высокая чувствительность	Чувствительность к примесям; необходимость озонатора

Продолжение таблицы 1.3

УФ-абсорбция	О ₃	Измерение поглощения УФ-излучения	Надежность; стандартный метод мониторинга	Возможны помехи от других газов
Газовая фильтрационная корреляция (GFC)	СО	Поглощение ИК-излучения с использованием газового фильтра	Высокая точность; устойчивость к помехам	Сложность конструкции; высокая стоимость

Сравнение методов измерений используемых для мониторинга качества атмосферного воздуха двух столетий показывает, что те методы, которые применялись в XX веке практически не используются из-за их низкой точности и сложности получения достоверных данных. Подобная тенденция привела к тому, что в XXI веке многие методы стали автоматизированными. Автоматизация данного процесса позволяет получать более качественные данные и минимизировать участие человека в процессах измерения.

В исследованиях приведено, что «для определения концентрации взвешенных частиц используют датчики, работающие на основе метода рассеяния света за счет относительной дешевизны в производстве, низкого энергопотребления и быстрого время отклика» [30, 31, 32]. Из этого следует, что появляется возможность проведения мониторинга с более высоким пространственно-временным разрешением. Данный вывод согласуется с результатами обзора F. Karagulian и соавт., отмечающих, что низкобюджетные оптические сенсоры «могут дополнять эталонные измерения и повышать пространственное разрешение сетей мониторинга» [33]. Поздняков М.В. отмечает, что «при определении концентрации взвешенных частиц с помощью датчиков, работающих на основе метода рассеяния источник света освещает частицы, а затем с помощью фотометра измеряется рассеянный свет от них» [4]. Возможность передачи полученных данных по беспроводным каналам связи посредством Wi-Fi, Bluetooth и др. на вычислительные устройства и мобильные приложения, которые выполняют обработку сигналов и их цифровое

преобразование в режиме реального времени создает предпосылки для формирования распределенных сетей мониторинга качества атмосферного воздуха [34–36].

В зависимости от размера частиц описанная методика имеет некоторые ограничения. Так, например, «для частиц диаметром более 0,3 мкм количество рассеянного света примерно пропорционально их массовой/численной концентрации, однако “частицы диаметром менее 0,3 мкм не рассеивают достаточно света и не могут быть обнаружены этим методом» [37, 38]. Для разделения обнаруживаемых частиц диаметром более 0,3 мкм предлагается следующий подход: «использовать алгоритм, основанный на анализе сигнала рассеянного света, либо на входе устройства устанавливать импактор или фильтр» [4].

Рассмотрим два типа датчиков для измерения газообразных загрязнителей воздуха. В датчиках типа металл-оксид-полупроводник (МОП) используется оксид металла, который при воздействии целевого газа меняет свои электрические свойства. Согласно [39] изменение электрических свойств легко измерить, и оно соответствует концентрации газа. Датчики типа МОП «малогобаритные, недорогие (10 долларов США), имеют быстрое время отклика, низкие пределы обнаружения и потребляемую мощность (~100 мВт)» [34, 35]. Существенным недостатком датчиков типа МОП является «высокая чувствительность к изменениям условий окружающей среды, мешающим газам и многие датчики имеют нелинейную кривую отклика» [36, 37].

Принципиальное отличие электрохимических датчиков от датчика типа МОП заключается в том, что «целевой газ подвергается процессу электролиза на рабочем электроде и в результате генерируется электрический ток, который уравнивается реакцией на противоэлектрод, а измеренный электрический ток соответствует концентрации газа» [39]. Авторы работы [4] утверждают, что «электрохимические датчики имеют более низкие пределы обнаружения, требования к мощности (~100 мкВт) и чувствительность к изменениям условий окружающей среды и мешающим газам, чем датчики типа МОП» [4]. Однако для

них характерны большие габариты (несколько десятков миллиметров) и более высокая цена (~100 долларов США) [4].

Поздняков М.В. [4] отмечает, что «в последние годы беспилотные летательные аппараты (БПЛА) оснащаются различными автоматическими датчиками для получения информации о качестве атмосферного воздуха *in situ*, что позволяет собирать данные в местах, недоступных для традиционных средств наблюдения». Высокая точность анализа пространственного распределения загрязняющих веществ и верификации полученных данных от БПЛА достигается лишь за счёт регистрации траектории полета и параметров движения. Впоследствии на основе математического моделирования формируется так называемый объем загрязнения, что обеспечивает более наглядное представление о влиянии загрязняющих веществ в конкретных зонах [41, 42, 43, 44]. Для минимизации участия оператора в запуске БПЛА можно запрограммировать автоматический взлет и посадку, передачу данных с датчиков в процессе полета в режиме реального времени и их сохранение во внутренней памяти для последующего анализа в случае потери сигнала с воздушным судном [45, 46]. Как подчёркивают Т. F. Villa и соавт., «беспилотные летательные аппараты обеспечивают гибкий сбор данных о качестве воздуха в трёх измерениях» [47], что делает их перспективным дополнением к стационарной сети наблюдений.

Группой ученых из Италии и Франции в научной статье [48] была «сделана попытка описания 112 моделей станций мониторинга качества атмосферного воздуха от 77 производителей». Согласно статистическим данным ВОЗ [49] «в 117 стран мира установлены стационарные наблюдательные посты, что в эквиваленте составляет 6000 городов».

По всему миру «в рамках проекта World Air Quality Index публикуются данные от 12 000 станций мониторинга, в том числе персональных, а общее их количество составляет более 30000» [50]. Поздняков М.В. отмечает, что «наряду с наземными станциями слежения на практике применяются спутниковые системы дистанционного зондирования, которые измеряют оптическую

толщину аэрозоля (Aerosol Optical Thickness, AOT, или Aerosol Optical Depth, AOD)» [4]. Также он приводится, что «для измерения оптической толщины аэрозоля применяются спектрорадиометрические технологии (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) [4, 51]. Фактический пространственный охват AOD «ограничен облачным покровом и данные поступающие из спутника актуальны по времени только для момента прохождения спутника, интегральны по всему атмосферному столбу» [52]. Как показывают А. van Donkelaar и соавт., «спутниковые наблюдения позволяют оценивать приземные концентрации мелкодисперсных частиц на территориях, не охваченных наземной сетью» [53].

По оценке W. Snyder и соавт., «традиционная парадигма мониторинга воздуха, основанная на редких дорогостоящих станциях, сменяется распределёнными измерениями высокого разрешения» [27].

«С целью повышения точности и надёжности спутниковые данные объединяют с наземными или воздушными: США, Китаем, Россией и другими странами развернуты полевые кампании распределенных региональных сетей наблюдений за аэрозолями (Distributed Regional Aerosol Ground-based Observation Networks, DRAGON)» [53, 54].

Цифровая трансформация отразилась на представлении данных о состоянии качества атмосферного воздуха. Так, «многими странами были разработаны онлайн-сервисы для получения актуальной информации о состоянии качества воздуха в любой точке мира» [4].

В таблице 1.4 приведены основные платформы с основными контролируемыми параметрами.

Таблица 1.4 – Популярныe онлайн-сервисы о состоянии качества атмосферного воздуха

Название и сайт	Страна	Контролируемые загрязнители
BreezoMeter	Израиль	PM2.5, PM10, NO ₂ , NO _x , NO, O ₃ , SO ₂ , CO
CityAir / AirVoice	Россия	PM2.5, PM10, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , CO, H ₂ S

IQAir (AirVisual)	Швейцария	PM2.5
Казгидромет	Казахстан	PM2.5, PM10, NO ₂ , NO, O ₃ , SO ₂ , CO
Nebo.live	Россия	PM2.5, PM10, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , CO
OpenAQ	США / международн ый проект	PM2.5, PM10, BC, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , CO
Plume Labs	Франция	PM2.5, PM10, NO ₂ , O ₃
SILAM	Финляндия	PM2.5, PM10, пыль, SOA, SIA, NO ₂ , NO, O ₃ , SO ₂ , CO
Ventusky	Чехия	PM2.5, PM10, пыль, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , CO
Windy	Чехия	PM2.5, SOA, SIA, NO ₂ , O ₃
WAQI (World Air Quality Index)	Китай / международн ая сеть	PM2.5, PM10, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , CO

Из всех перечисленных онлайн-сервисов широкий географический охват платформ OpenAQ и WAQI обусловлен агрегацией данных из различных источников. Точность данных платформ OpenAQ и WAQI зависит от плотности размещения наземных станций мониторинга. В свою очередь, специализированные модели, например SILAM, учитывают физико-химические процессы переноса и трансформации загрязняющих веществ, но для предоставления точных и достоверных данных требуют значительных вычислительных ресурсов и наличия качественных входных данных. Платформенные решения ориентированы преимущественно на ретроспективный или текущий анализ состояния атмосферного воздуха, в то время как функции прогнозирования и интеллектуального управления остаются ограниченными, что особенно актуально для городов с недостаточно развитой сетью мониторинга, таких как Душанбе, где наблюдается дефицит пространственно распределенных измерений. Из классификации Позднякова М.В. следует, что «прогнозные модели качества атмосферного воздуха делятся на статистические, интеллектуальные и гибридные» [4]. При этом авторами подчёркивается, что «в основе статистических моделей лежат математико-

статистические методы, которые в основном учитывают статистическую взаимосвязь между концентрацией загрязнителей воздуха и историческими данными о различных влияющих факторах» [4]. К наиболее распространённым статистическим моделям в [56] отнесены модели временных рядов и регрессионные модели.

В отличие от статистических моделей, интеллектуальные модели учитывают источники загрязнителей (например, промышленные предприятия, транспорт, техногенные аварии, природные источники, такие как лесные пожары и т.д.). В работе [56] приводится, что «пакет компьютерных программа SILAM, созданный Финским метеорологическим институтом, применяется для изучения воздействия лесных пожаров, природных и техногенных катастроф, извержений вулканов на состояние атмосферного воздуха, а также для моделирования распространения в атмосфере газовых примесей, пыли, радиоактивных изотопов, взвешенных частиц различного диаметра и природных аллергенов».

Анализ, проведенный в работе [57] показывает, что «группой ученых из России предложены модели для прогнозирования загрязнения атмосферного воздуха, создаваемого автотранспортом в городской среде с учетом застройки».

В литературе [58, 59, 60] доказано, что «прогноз модели качества воздуха не лишена погрешности, даже если входные данные были идеально измеренными, так при сравнение смоделированных и наблюдаемых концентраций в пространстве и времени указаны погрешности и ошибки при моделировании абсолютных уровней концентраций загрязняющих веществ на отдельных участках мониторинга». Исследователями [59] были «смоделированы содержания мелкодисперсных частиц PM10 в атмосферном воздухе с использованием данных наблюдений за 2012–2016 гг. в урбанизированном и густонаселенном штате Малайзии Селангоре на основании данных дистанционного зондирования и данных от четырех наземных измерительных станций». Так, учеными [60] «при пространственном моделировании содержаний мелкодисперсных частиц PM10 были использованы алгоритмы Naive Bayes (NB), Random Forest (RF) и K-Nearest Neighbour (KNN)».

Отмечается, что «точность моделирования оценена авторами как высокая (0,96; 0,98; 0,91 для каждого из методов соответственно)» [61].

Авторами [62] сделан вывод о том, что «высокая схожесть данных прогностического моделирования с данными натурных измерений не означает отказа от использования широкой сети станций измерений, так как именно широкая сеть станций измерений позволит получить наиболее точные данные о концентрации загрязнителей атмосферного воздуха в текущий период времени». Отмечается [62], что «полученная информация в ходе натурных измерений лежит в основе создания базы для развития расчетных методов и считаются единственным средством их объективной верификации результатов расчетных методов» [62].

Практика разных стран показывает [63], что для оценки качества атмосферного воздуха используются как данные инструментальных замеров с помощью стационарных, маршрутных и передвижных постов наблюдения, так и по расчетным данным с использованием современных компьютерных моделей.

В совокупности системы натурных измерений, каналов связи и автоматизированной информационной системы обеспечивают процессы сбора, передача и обработки информации с последующим анализом полученных результатов и дальнейшим прогнозированием изменений качества компонентов окружающей среды. Роль сенсорных платформ в такой системе оценивают N. Castell и соавт., указывая, что «недорогие сенсорные платформы пригодны для индикативной оценки, но требуют осторожности при интерпретации абсолютных концентраций» [64].

1.2. Методики расчёта индексов качества атмосферного воздуха

Атмосферный воздух загрязняется одновременно множеством веществ, состав которых меняется во времени и неодинаков в разных точках территории. В связи с этим возникает практическая необходимость выразить суммарную загрязнённость воздуха и сопутствующий ей риск для здоровья населения одним сопоставимым и наглядным числом, осреднённым за выбранный период. Как

отмечают А. Plaia и М. Ruggieri, индексы качества воздуха «представляют собой инструмент преобразования сложных данных о загрязнении в единый показатель, понятный населению» [65].

Мерой такой суммарной оценки служат интегральные показатели – индексы качества (загрязнения) атмосферы [66]. Как указывает Э. Ю. Безуглая, комплексный индекс загрязнения атмосферы «позволяет сравнивать уровень загрязнения воздуха разными веществами и в разных городах» [67]. Публикация значений подобных индексов сегодня практикуется во многих странах и остаётся одним из основных способов оповещения населения о состоянии окружающей среды [68]. По оценке М. В. Позднякова и соавт., «индекс качества воздуха служит инструментом информирования населения и органов управления о степени загрязнения атмосферы» [4]. Ахтиманкиной А.В. и другими учеными отмечается, что «методика их построения, как правило, опирается на несколько факторов: продолжительность превышения нормативов, класс опасности вещества и характер его воздействия на организм; при этом подчёркивается, что надёжный показатель должен основываться на результатах эпидемиологических исследований» [68, 69, 70, 71]. Обобщая мировую практику, Kanchan, A. K. Gorai и P. Goyal констатируют, что «универсального, пригодного для всех ситуаций метода расчёта индекса качества воздуха не существует» [72].

В настоящем подразделе рассмотрены подходы к расчёту таких индексов, принятые в России и странах СНГ (ИЗА, КИЗА, показатель Р), США и Австралии (AQI, AQC), Великобритании (DAQI), государствах Европейского союза (CAQI, YACAQI, ATMO, BELATMO), Канаде и Гонконге (AQHI), Сингапуре (PSI), Китае (API), а также в ряде других стран.

В СССР «для интегральной оценки загрязнения был введён комплексный показатель – индекс загрязнения атмосферы (ИЗА); его применение в службах мониторинга закрепилось после выхода в 1979 г. Руководства по контролю загрязнения атмосферы» [73]. В России порядок информирования о состоянии воздуха регулируется руководящим документом РД 52.04.667-2005,

устанавливающим общие требования к подготовке и содержанию соответствующих документов.

В основу показателя положено допущение, что на уровне ПДК разные вещества воздействуют на человека сопоставимо, а с ростом концентрации их вредность нарастает по-разному – в зависимости от класса опасности [66]. Различают частный ИЗА, вычисляемый по отдельному веществу, и комплексный индекс КИЗА, отражающий совокупное загрязнение воздуха несколькими примесями. Теоретические основания подобного агрегирования заложены W. R. Ott, показавшим, что «экологический индекс есть функция свёртки нескольких переменных в единую безразмерную величину» [74]. Расчёт ИЗА для одного i -го вещества I_i проводится по формуле 1.1:

$$I_i = \left(\frac{\bar{C}_i}{\text{ПДК}_{\text{с.с.},i}} \right)^{K_i} \quad (1.1)$$

где,

I_i – индекс загрязнения по i -му веществу;

$\bar{C}_i$ – средняя концентрация вещества (среднегодовая или среднемесячная), мг/м³;

$\text{ПДК}_{\text{с.с.},i}$ – среднесуточная предельно допустимая концентрация;

K_i – коэффициент приведения по классу опасности.

Из полученных значений I_i строят убывающий вариационный ряд. Комплексный индекс для m веществ, присутствующих в атмосфере, определяется суммированием частных индексов по формуле (1.2).

$$I_m = \sum_{i=1}^m \left(\frac{\bar{C}_i}{\text{ПДК}_{\text{с.с.},i}} \right)^{K_i} \quad (1.2)$$

где,

m – количество учитываемых загрязняющих веществ.

Величина КИЗА отражает, во сколько раз наблюдаемое загрязнение воздуха совокупностью примесей превышает допустимый уровень (в пересчёте

на ПДК диоксида серы). Чтобы результаты по разным станциям были сопоставимы, индекс рассчитывают по фиксированному числу веществ. Поскольку основной вклад в высокий уровень загрязнения городов вносят в среднем четыре–пять примесей, обычно принимают $m = 5$ [66, 68]. Уровень загрязнения по значению КИЗА оценивают по шкале, приведённой в таблице 1.5 [67].

Таблица 1.5 – Шкала оценки степени загрязнения атмосферного воздуха по ИЗА

КИЗА	Уровень загрязнения атмосферного воздуха
≤ 5	Низкий
5–7	Повышенный
7–14	Высокий
≥ 14	Очень высокий

По значениям ИЗА и КИЗА в России ранжируют города по уровню загрязнения и составляют ежегодные перечни наиболее неблагоприятных из них; при неизменных ПДК показатель также позволяет отслеживать динамику ситуации в отдельном населённом пункте [68].

Многолетнее использование КИЗА в Беларуси (регулярный расчёт с 1982 г.) выявило несколько слабых сторон показателя [66]. Во-первых, его величина определялась преимущественно малыми примесями, прежде всего формальдегидом, доля которого в суммарном ИЗА белорусских городов достигала 50–80 % (в среднем за 1991–2004 гг. – около 62 %), из-за чего вклад диоксида азота, оксида углерода и пыли оказывался заниженным. Сходная картина отмечалась и в России, где в 2008 г. «формальдегид возглавлял перечень веществ в 12 из 30 наиболее загрязнённых городов, а ещё в 8 занимал второе место» [75]. Во-вторых, опора на среднегодовые (или среднемесячные) концентрации исключает оперативный контроль. В-третьих, показатель чувствителен к пересмотру ПДК: после увеличения в Беларуси в 2005 г. среднесуточной ПДК формальдегида с 3 до 12 мкг/м³ значения ИЗА резко снизились и стали несопоставимы с прежними. На это ограничение указывают и другие авторы, отмечая, что «среднегодовой характер ИЗА не позволяет оценивать краткосрочное воздействие загрязнения на здоровье» [4]. По этим

причинам в Беларуси после 2006 г. от ИЗА фактически отказались, тогда как в России интегральная оценка по-прежнему базируется на КИЗА [76].

Предлагались и альтернативные показатели. Так, в системе социально-гигиенического мониторинга Беларуси «применяется суммарный показатель загрязнения P (формула 1.3), однако практика его использования заметных преимуществ перед ИЗА не выявила» [66, 76].

$$P = \sqrt{\sum_{i=1}^n K_i^2} \quad (1.3)$$

где,

P – суммарный показатель загрязнения;

K_i – нормированная концентрация i -го вещества;

n – число загрязняющих веществ.

Законодательство США «предусматривает регулярную публикацию индекса качества воздуха (AQI) – не реже пяти дней в неделю» [77]. Показатель рассчитывается по шести веществам: озону, PM_{10} , $PM_{2,5}$, оксиду углерода, диоксиду серы и диоксиду азота. Процедура включает четыре шага: «из измерений по каждой территории выбирают наибольшую концентрацию и округляют её; определяют табличный интервал, в который она попадает; по формуле (1.4) вычисляют субиндекс; результат округляют до целого».

$$I_p = \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} (C_p - BP_{Lo}) + I_{Lo} \quad (1.4)$$

где,

I_p – субиндекс загрязнения;

C_p – измеренная концентрация загрязнителя;

BP_{Hi}, BP_{Lo} – верхняя и нижняя границы диапазона концентраций;

I_{Hi}, I_{Lo} – соответствующие значения индекса AQI.

Итоговый AQI принимается равным наибольшему из субиндексов. Шкала охватывает диапазон 0–500 с цветовой кодировкой: 0–50 – «хорошее» качество воздуха, 51–100 – «удовлетворительное», 101–150 – «неблагоприятное для чувствительных групп», 151–200 – «плохое», 201–300 – «очень плохое», от 301 – «опасное» [77]. Согласно методическому руководству Агентства по охране окружающей среды США, «итоговый индекс качества воздуха определяется наибольшим из рассчитанных подиндексов загрязнителей» [78], что и составляет суть принципа доминирующего загрязнителя. Ограниченность такого принципа отмечают В. Bishoi, А. Prakash и V. K. Jain, по мнению которых «индекс, определяемый по доминирующему загрязнителю, не учитывает совокупного действия остальных примесей» [79].

В 2020 г. штат Новый Южный Уэльс (Австралия) заменил применявшийся двенадцать лет AQI новой системой категорий качества воздуха AQC [77]. Состояние атмосферы обозначается пятью цветами – от зелёного («хорошее») до бордового («чрезвычайно плохое»); шкала сопровождается рекомендациями по планированию активности, ориентированными прежде всего на уязвимые группы: пожилых, детей, беременных женщин и людей с болезнями органов дыхания и сердца. Категория присваивается «сравнением концентрации каждого из шести веществ (озон, NO₂, CO, SO₂, PM₁₀, PM_{2,5}) с табличными порогами; например, «хорошему» качеству по часовому осреднению отвечают значения О₃ ниже 0,13 мг/м³, NO₂ ниже 0,15 мг/м³, SO₂ ниже 0,35 мг/м³, PM₁₀ ниже 0,05 мг/м³ и PM_{2,5} ниже 0,025 мг/м³» [80].

Управление по вопросам окружающей среды, продовольствия и сельского хозяйства Великобритании (DEFRA) ежедневно публикует индекс DAQI, обновлённый в 2012 г. по рекомендациям Комитета COMEAP [81, 82]. Индекс опирается «на концентрации пяти веществ – озона, диоксида азота, диоксида серы, PM₁₀ и PM_{2.5} – и получается сопоставлением измеренных значений с табличными; при осреднении за час, восемь часов и сутки требуется не менее 75% данных за период» [78].

Значения DAQI выражаются числами от 1 до 10 и объединены в четыре группы: 1–3 – низкий уровень загрязнения (зелёный), 4–6 – умеренный (жёлтый), 7–9 – высокий (красный), 10 – очень высокий (фиолетовый); границы установлены исходя из воздействия каждого вещества на здоровье [83]. По суточному индексу метеослужба страны каждое утро формирует прогноз загрязнения на текущий день и ближайшие четыре дня [79].

Процедура оценки качества атмосферного воздуха в странах Евросоюза регулируется статьёй 6 Директивы Совета 96/62/ЕС [84], однако директивами ЕС не регламентируется процедура использования конкретных приёмов интегральной оценки качества воздуха (в виде формул, шкал и т. д.). В рамках Европейского регионального инициативного проекта разработан индекс CAQI (Common Air Quality Index) – Общий индекс качества воздуха, используемый странами ЕС для информирования граждан о состоянии атмосферы с 2006 г. Цель разработки индекса – «представление ситуации с качеством воздуха в европейских городах в сравнительном и понятном виде» [83].

Статья 6 Директивы Совета 96/62/ЕС «регламентирует саму процедуру оценки качества воздуха в ЕС, но не задаёт конкретных формул и шкал интегральных показателей» [83]. В отчете о загрязнении воздуха в Великобритании приводится, что «в рамках европейского инициативного проекта с 2006 г. используется Общий индекс качества воздуха CAQI, назначение которого – представить ситуацию в городах ЕС в сравнимом и понятном виде» [83].

Индекс рассчитывается в трёх временных масштабах: часовом (обновляется ежечасно), суточном (характеризует прошедшие сутки) и годовом (оценивает качество воздуха города за год относительно нормативов ЕС); первые два отражают краткосрочное воздействие, годовой – долгосрочно. Базовыми веществами служат NO_2 , PM_{10} и O_3 , при доступности данных добавляются $\text{PM}_{2,5}$, CO и SO_2 . Данные разделены на фоновые городские и придорожные, для которых индексы вычисляются отдельно. Сначала находят субиндексы по каждому веществу, а общий индекс задаёт тот загрязнитель, концентрация

которого относительно норматива наибольшая; точное значение определяется по табличной сетке. Часовая и суточная шкалы пятиуровневые: 0–25 – очень низкий, 25–50 – низкий, 50–75 – средний, 75–100 – высокий, свыше 100 – очень высокий [83].

В статье В.М. Ерошкиной приводится, что «годовой индекс $YACAQI$ выражает отношение среднегодовых концентраций к предельным значениям и рассчитывается для фоновых и придорожных условий по формуле (1.5) [68]. Обязательными для него являются данные по NO_2 , PM_{10} и озону, вспомогательными – $PM_{2,5}$, бензол, SO_2 и CO .

$$YACAQI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n YACAQI_i \quad (1.5)$$

где,

$YACAQI_i$ – субиндекс по загрязняющему веществу;

n – количество учитываемых показателей.

Целевое значение субиндекса равно единице: превышение единицы означает несоблюдение норматива хотя бы по одному веществу, значение меньше единицы – соответствие нормативам в целом. Субиндексы определяются как отношение фактических показателей к нормативам (например, для NO_2 – среднегодовая концентрация, делённая на 40 мкг/м^3) [84]. Значения индексов «рассчитываются по данным AIRBASE и публикуются на портале airqualitynow.eu; при этом отмечается, что они служат для демонстрации динамики загрязнения и не предназначены для оценки соответствия нормативным требованиям» [85].

Во Франции применяется индекс АТМО, закреплённый постановлением от 22 июля 2004 г. [86]. Он рассчитывается по четырём веществам – SO_2 , NO_2 , O_3 и PM_{10} : для каждого определяют первичный индекс, а суточное значение получают как наибольший из них. Шкала имеет десять ступеней – от «очень хорошего» (1–2) до «плохого» (8–10) [86]. В Бельгии используется индекс BELАТМО, близкий по методике к американскому AQI [87]; он опирается на

концентрации озона (8-часовое среднее), NO₂ (максимум за час), SO₂ и PM₁₀ (среднесуточные) и меняется от 1 («отличное» качество) до 10 («ужасное»).

Какарека С.В. отмечает, что «в Бельгии для интегральной оценки состояния воздушной среды применяется индекс качества атмосферного воздуха BELATMO, сходный по методике расчёта с AQI АООС США» [66, 87]. Так, Какарека С.В. приводит, что «индекс определяется исходя из замеренных на станциях сети мониторинга концентраций озона (среднее за 8 ч), диоксида азота (максимальное за 1 ч), диоксида серы и ВЧ₁₀ (среднесуточные)» [66]. В зависимости от замеренного содержания компонентов значение индекса варьирует в пределах от 1 (отличное качество воздуха) до 10 (ужасное качество); например, для SO₂ индексу 1 соответствует среднесуточная концентрация 0–15 мкг/м³, индексу 10 – более 250 мкг/м³ [87].

Метеослужба Канады представляет результаты наблюдений в виде индекса AQI со шкалой 0–100 (чем выше значение, тем больше риск): 0–25 – хорошее качество (зелёный), 26–50 – умеренное (жёлтый), 51–100 – плохое (оранжевый), свыше 100 – очень плохое (красный); расчёт ведётся по шести веществам [66, 68]. В.М. Ерошкиним отмечается, что «дополнительно в стране разработан индекс здоровья по качеству воздуха AQHI, помогающий населению принимать решения для снижения кратковременного воздействия загрязнения и ориентированный на группы риска – детей, пожилых, людей с сердечно-сосудистыми и дыхательными заболеваниями» [68]. По заключению R. Brook и соавт., «воздействие мелкодисперсных частиц причинно связано с сердечно-сосудистой заболеваемостью и смертностью» [88]. Методической основой AQHI служит подход D. M. Stieb и соавт., согласно которому «беспороговый многокомпонентный индекс строится на наблюдаемых краткосрочных связях загрязнения со смертностью» [89]. AQHI рассчитывается лишь по трём веществам (O₃, NO₂, PM) в двух вариантах – с учётом PM_{2,5} и PM₁₀ – по формулам (1.6) и (1.7); используются средние концентрации за последние три часа, значения округляются до целых, а результат менее 0,5 приравнивается к единице [90].

$$AQHI_{PM_{2.5}} = \frac{1000}{10.4} [(e^{0.000871 C_{NO_2}} - 1) + (e^{0.000537 C_{O_3}} - 1) + (e^{0.000487 C_{PM_{2.5}}} - 1)] \quad (1.6)$$

$$AQHI_{PM_{10}} = \frac{1000}{11.7} [(e^{0.000871 C_{NO_2}} - 1) + (e^{0.000537 C_{O_3}} - 1) + (e^{0.000487 C_{PM_{10}}} - 1)] \quad (1.7)$$

где C_{NO_2} , C_{O_3} , C_{PM} – средние концентрации загрязняющих веществ за последние три часа.

C – средняя концентрация загрязнителя за последние три часа. Единицами измерения для взвешенных веществ являются мкг/м³, а для газов – ppb (частицы на миллиард). Полученные значения округляют до целых чисел, а при $AQHI < 0,5$ приравнивают его к единице [89].

Существенно, что канадский индекс построен на статистике обращений в больницы и смертности за полтора десятилетия и не привязан к национальным ПДК; поэтому коэффициенты его формул при переносе на другой регион требуется определять заново [89].

Национальное агентство окружающей среды Сингапура в 2014 г. обновило стандартный индекс загрязнителей PSI [91]. Он рассчитывается по шести веществам (O_3 , PM_{10} , $PM_{2.5}$, CO , SO_2 , NO_2) по формуле (1.8) и принимает значения от 0 («хорошее» состояние) до 500 («опасное»); по подходу к вычислению индекс практически совпадает с американским AQI [66, 68].

$$I_i = \frac{I_{i,j+1} - I_{i,j}}{X_{i,j+1} - X_{i,j}} (X_i - X_{i,j}) + I_{i,j} \quad (1.8)$$

где, I_i – индекс загрязнения;

X_i – измеренная концентрация;

$X_{i,j}$, $X_{i,j+1}$ – нижняя и верхняя границы концентрационного диапазона;

$I_{i,j}$, $I_{i,j+1}$ – соответствующие значения индекса.

В Гонконге с 1995 г. применялся индекс API – общий и придорожный, оценивавшийся ежечасно с прогнозом на сутки по шести веществам (SO_2 , NO_2 ,

ВЧ, CO, O₃, Pb) [92]. В настоящее время там используется индекс здоровья и качества воздуха AQHI, вычисляемый по средним за три часа концентрациям O₃, NO₂, SO₂ и взвешенных частиц как сумма процентного добавочного риска по четырём компонентам (формулы 1.9 и 1.10) [66, 68].

$$AR_i = (e^{\beta_i C_i} - 1) \times 100\% \quad (1.9)$$

где AR_i – процентный добавочный риск;

C_i – средняя концентрация загрязняющего вещества;

β_i – коэффициент регрессии.

где i – загрязнитель; AR – процентный добавочный риск для отдельного загрязнителя; C – средняя концентрация загрязнителя за последние три часа, мкг/м³; β – измеренный коэффициент регрессии, относящийся к каждому загрязнителю.

Суммарный процентный добавочный риск рассчитывается по формуле:

$$AR = \sum_{i=1}^n AR_i \quad (1.10)$$

где n – количество веществ, равное 4.

Итоговому AQHI = 1 (низкий риск) соответствует добавочный риск в диапазоне 0–1,88 %, а значению AQHI ≥ 10 (серьёзная угроза) – риск свыше 19,37 % [92]. В материковом Китае Мониторинговый центр по охране окружающей среды ежедневно публикует индекс API по трём веществам (SO₂, NO₂, PM10) с интервалом расчёта с 12 часов предыдущего дня до 12 часов, текущего; значение определяется по веществу с наибольшим уровнем загрязнения (формула 1.11) [92].

$$API = \max(I_1, I_2, \dots, I_n) \quad (1.11)$$

где I_i – субиндекс для i -го загрязняющего вещества;

API определяется по максимальному из рассчитанных субиндексов.

Шкала API в Китае трактует диапазон 0–50 как отличное качество воздуха, 51–100 – хорошее, а далее по нарастанию – от незначительно загрязнённого до сильнозагрязнённого при значениях свыше 300 [93].

Индийский индекс India-AQI разрабатывался с опорой на опыт США, Великобритании, Малайзии и Канады и охватывает взвешенные частицы, SO₂, NO₂, CO, озон и PM₁₀ [94]. В Малайзии первая система индексов MAPI появилась в 1993 г., а после доработки 1996 г. была приближена к американскому AQI; в отличие от него MAPI может превышать 500, что соответствует объявлению чрезвычайной ситуации [95]. Аналогичные показатели рассчитываются в Новой Зеландии [96], Ирландии, Мексике, Таиланде, Корее и ряде других стран, причём в большинстве случаев их построение восходит к методике AQI США [66, 68].

Проведённое сравнение показывает, что интегральные показатели применяются повсеместно, однако методики их расчёта заметно различаются. Обычно значение получают по максимальной часовой, восьмичасовой или среднесуточной концентрации ограниченного набора регулярно контролируемых веществ (от трёх до шести): по каждому находят частный индекс в соответствии с национальными нормативами, а итог задаёт вещество с наибольшим относительным превышением. Показатели, основанные на суммировании воздействия нескольких примесей, распространены меньше из-за трудностей обоснования. Полученному значению по четырёх- или пятиступенчатой шкале ставят в соответствие уровень загрязнения и цвет для отображения на картах и в таблицах [66, 68, 96, 97, 98].

Российский подход отличается от большинства зарубежных прежде всего периодом осреднения, что связано с назначением индексов. По ИЗА и КИЗА в России сравнивают города и оценивают многолетнюю динамику, но краткосрочные эффекты воздействия при этом не улавливаются [66, 68]. Индексы Канады, США, Австралии и Великобритании, напротив, дают оперативный прогноз и снабжают население советами по планированию активности; они хорошо информируют о текущем состоянии воздуха, однако

плохо подходят для анализа за длительный срок, поскольку рассчитаны на краткосрочное влияние поллютантов. В целом интегральные показатели целесообразно рассматривать как средство оперативного информирования, тогда как для изучения причин и последствий загрязнения первоочередное значение имеют данные о фактических концентрациях веществ [66, 68].

1.3. Природно-климатические и антропогенные факторы формирования загрязнения атмосферного воздуха города Душанбе

По данным Всемирной организации здравоохранения, «загрязнение атмосферного воздуха является одним из основных факторов риска преждевременной смертности в мире» [99]. В городе Душанбе сосредоточена 12% всего населения Республики Таджикистан. На состояние 1 января 2024 года населения столицы составила 1242,6 человек, а площадь была расширена с 126,6 км² до 203,2 км². При данном соотношении плотность населения составляет 6115 человек на квадратный километр. Влияние городской застройки на локальный климат обобщено Т. Р. Оке, показавшим, что «городская поверхность формирует собственный микроклимат, отличный от климата окружающей местности» [100].

В. Ф. Стольберг рассматривает город как специфическую экосистему, отмечая, что «городская среда представляет собой природно-техногенную систему, качество которой определяет условия жизни населения» [101]. Соответственно, в отчете Всемирного Банка приводится, что «несмотря на то, что за последние 30 лет площадь застройки не сильно увеличилась, плотность населения удвоилась, что увеличило количество людей, подвергающихся загрязнению воздуха» [12]. С. Б. Чистякова связывает охрану воздушного бассейна с градостроительным планированием, указывая, что «предотвращение загрязнения окружающей среды должно закладываться на стадии планировочных решений города» [102]. Территориально город Душанбе расположена на западе Республики Таджикистан в окружении горных хребтов Гиссарской долины и в городе сливаются реки Варзоб и Кофарнихон (рисунок 1.2).

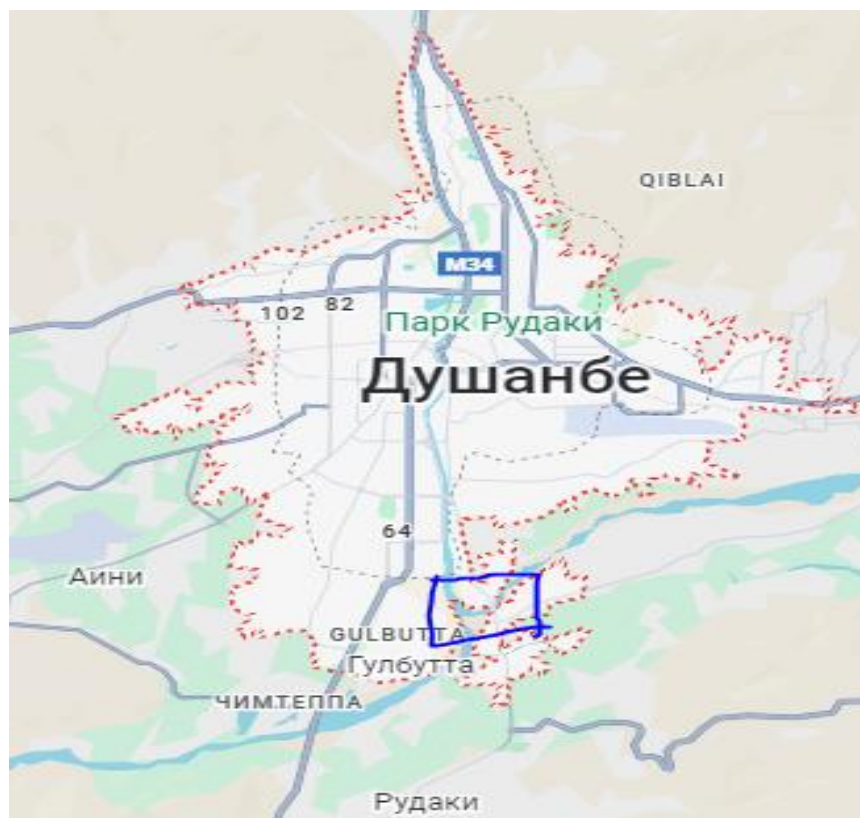


Рисунок 1.2. – Территориальная расположенность города Душанбе на карте

Климатические характеристики города Душанбе были проанализированы на основе смоделированных данных Meteoblue [103]. Так, по статистическим данным Meteoblue [103] среднегодовое количество осадков составляет 755 мм. Осадки в основном наблюдаются в зимние, весенние и осенние месяцы. В летние месяцы осадки почти не наблюдаются (рисунок 1.3).

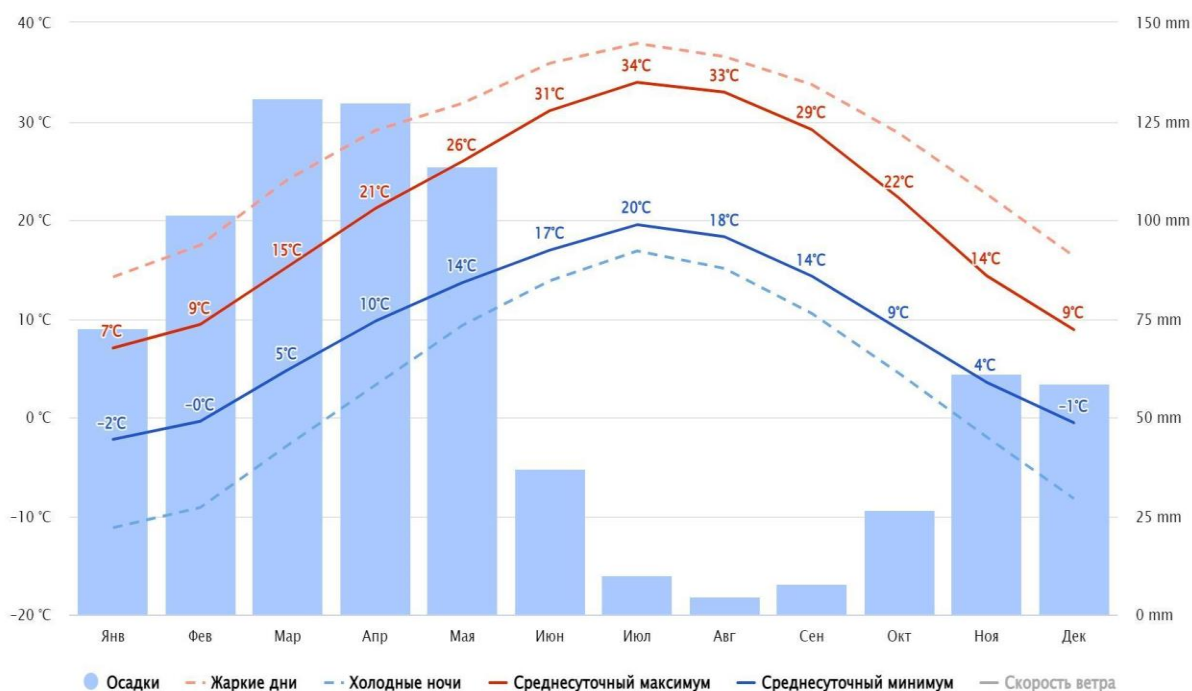


Рисунок 1.3. – Средние температуры и количество осадков (г. Душанбе)

На основе данных реанализа ERA5T [103] была получена картина розы ветров (рисунок 1.4), которая отражает распределение направлений и скоростей ветра для города Душанбе (38.54° с.ш., 68.78° в.д.) на высоте 767 м над уровнем моря.

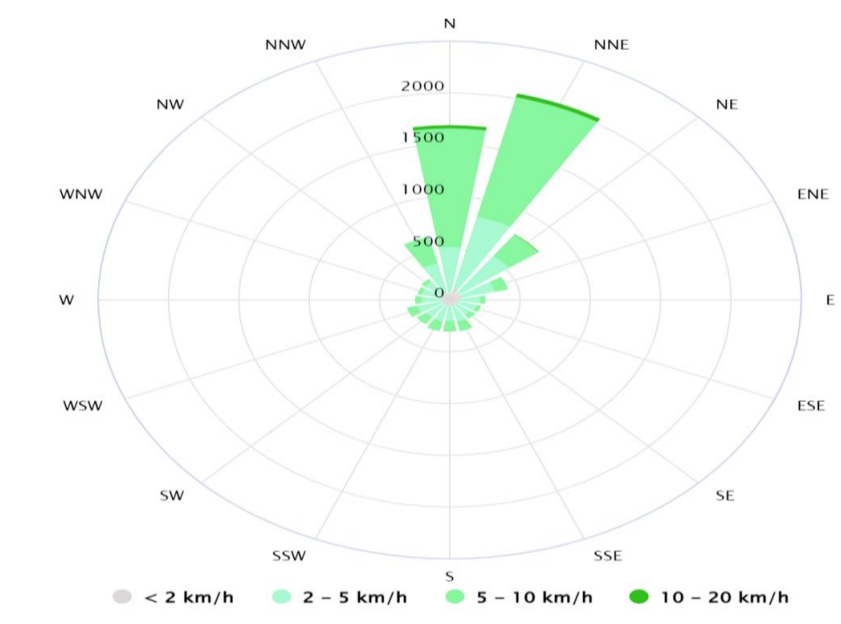


Рисунок 1.4. – Диаграмма розы ветров (г. Душанбе)

При анализе диаграммы розы ветров было установлено ярко выраженное доминирование северных и северо-восточных направлений ветра. Повторяемость направлений северо-северо-восток (NNE) значительно превосходит остальные румбы. На западных, южных и юго-западных секторах наблюдается низкая повторяемость, что указывает на редкость ветров, которые поступают из этих направлений. В силу орографических особенностей региона наблюдается подобная асимметрия распределения направлений ветра. Расположенность города Душанбе в межгорной котловине, ограниченная горными хребтами, формирует устойчивые каналы воздушного переноса и ограничивает поступление воздушных масс из южных и западных направлений. В условиях межгорных котловин, как подчёркивается в литературе, «температурные инверсии препятствуют вертикальному рассеиванию примесей и способствуют их накоплению у поверхности» [104]. Фундаментальные основы теории атмосферной диффузии и прогноза загрязнения воздуха заложены М. Е. Берляндом, показавшим, что «распределение концентраций примеси от источника определяется метеорологическими условиями рассеивания в приземном слое атмосферы» [105]. Развитие этих идей сотрудниками Главной геофизической обсерватории (Р. И. Оникул, Е. Л. Генихович и др.) позволило создать нормативные методы расчёта, в основу которых положено представление о том, что «максимальная приземная концентрация примеси достигается при неблагоприятных метеорологических условиях на определённом расстоянии от источника выброса» [106]. Специфику горно-котловинных условий раскрывает С. D. Whiteman, отмечающий, что «в горных долинах формируются локальные системы циркуляции, определяющие перенос и застой воздушных масс» [107].

Согласно скоростным характеристикам основной вклад в общее распределение вносят ветры со скоростью 5–10 км/ч, особенно в северном и северо-восточном секторах. Ветры со скоростью 10–20 км/ч наблюдаются существенно реже и также приурочены преимущественно к доминирующим направлениям (N и NNE). Слабые ветры в диапазоне 2–5 км/ч характерны для

второстепенных направлений, в том числе восточного и южного секторов. Практически штилевые условия (менее 2 км/ч) занимают незначительную долю и не оказывают существенного влияния на общий ветровой режим.

Выявленный ветровой режим указывает на ограниченные условия для рассеивания загрязняющих веществ. Слабый и умеренный ветер при устойчивых направлениях создает зоны накопления примесей, особенно в условиях температурных инверсий, которые характерны для холодного периода года. Доминирование северных и северо-восточных направлений ветра при преимущественно слабых и умеренных скоростях (5–10 км/ч) формирует специфические условия для переноса, накопления и трансформации основных атмосферных загрязнителей. Концентрации основных загрязнителей зависят от условий атмосферного рассеивания. Так, например, при умеренных и слабых ветрах в условиях города Душанбе эффективный вынос загрязняющих веществ за пределами городской территории ограничен, что ведет к их накоплению в приземном слое атмосферы, зачастую там где преобладает интенсивное движение автотранспорта и плотная застройка. Как отмечается в докладе Всемирного банка по Центральной Азии, «котловинный рельеф и температурные инверсии усиливают накопление загрязнителей в зимний период» [108], что характерно и для условий города Душанбе. Физическую природу этого ограничения раскрывает R. B. Stull, по определению которого «устойчивая стратификация подавляет турбулентный обмен и препятствует вертикальному переносу примеси» [109].

Применительно к городской среде В. И. Теличенко обосновал концепцию биосферной совместимости, согласно которой «город должен развиваться в согласии с биосферой, не разрушая её и создавая условия для развития человека» [110]. Эту же идею развивает В. А. Ильичёв, подчёркивая, что «параметры городской среды должны задаваться исходя из требований биосферной совместимости и развития человека» [111].

При переносе аэрозольных загрязнений вдоль городской застройки обусловленный северо-восточным направлением часто происходит ресуспензия,

т.е. повторное вовлечение ранее осевших частиц, что особенно является характерным для твердых частиц PM10. Под влиянием ослабления ветра и температурных инверсий наблюдается резкий рост твердых частиц PM2.5., которые способны длительное время удерживаться в воздухе. Вклад невыхлопных источников в этот процесс подчёркивают А. Thorpe и R. M. Harrison, установившие, что «ресуспензия дорожной пыли и износ покрытий формируют значительную долю городской взвеси» [112].

Значимость контроля мелкодисперсных частиц подтверждается выводом С. А. Pore и D. W. Dockery о том, что «воздействие мелкодисперсных частиц связано с ростом сердечно-сосудистой и лёгочной смертности» [113].

К числу основных стационарных источников загрязнения воздушного бассейна города Душанбе относятся цементный завод и ТЭЦ (таблица 1.5).

Таблица 1.5. – Стационарные источники загрязнения воздуха в городе Душанбе

Источник	Основная продукция	Загрязнитель
Цементный завод	Цемент	Диоксид серы и азота, пыль
ТЭЦ	Тепло и электроэнергия	Диоксид серы, оксид углерода и азота

Автор [114] отмечает, что «на долю ТЭЦ Душанбе-2 приходится более 76% от общего объема выбросов от стационарных источников». Структурный состав выбросов ТЭЦ Душанбе-2 за 2015–2019 годы представлен в таблица 1.6.

Таблица 1.6. – Объем выбросов загрязняющих веществ ТЭЦ Душанбе–2 (2015–2019 гг.)

Год	Общий объем, т	Твердые частицы (т / %)	SO ₂ (т / %)	CO (т / %)	NO _x (т / %)
2015	2092,6	161,6 / 8%	1123,4 / 53%	688,4 / 33%	119,2 / 6%
2016	3386,4	275,2 / 8%	1876,9 / 56%	1057,8/ 31%	176,5 / 5%
2017	10607,3	827,7 / 8%	7122,6 / 67%	2360,2/ 22%	296,9 / 3%
2018	12348,8	1301,9 / 11%	7276,5 / 59%	3367,3/ 27%	403,2 / 3%
2019	13678,2	1722,9 / 13%	7914,1 / 58%	3602,4/ 26%	438,8 / 3%

Как видно из представленных данных, наибольший вклад в структуру выбросов в течение всего рассматриваемого периода вносят газообразные загрязнители, прежде всего диоксид серы (SO_2) на долю которого приходится 53–67 %. С 2017–2019 гг. наблюдается резкое увеличение абсолютных значений выбросов всех компонентов, что свидетельствует о росте объемов сжигаемого топлива.

Согласно оценке Всемирного банка, в городах Центральной Азии «основной вклад в загрязнение воздуха мелкодисперсными частицами вносят отопление жилого сектора, транспорт и промышленность» [12]. Также в [12] приведено процентное соотношение распределения выбросов $\text{PM}_{2.5}$ по источникам, где на долю выбросов от отопления индивидуальных жилых домов приходится 31%, сектора энергетики 9% (включая ЦТС), отходов 7%, промышленности 4% и транспорта 3%» соответственно. Схематичное представление процентного соотношения источников выбросов $\text{PM}_{2.5}$ представлена на рисунке 1.5



Рисунок 1.5. – Процентное соотношение источников выбросов $\text{PM}_{2.5}$

Источник – “*GBD-MAPS-Global (Макдаффи и др., 2021 г.)*” [Глобальная модель] <https://zenodo.org/record/4739100#.YbhkLb1Bw2w>.

Эти данные согласуются с результатами S. Papagiannis, S. F. Abdullaev и соавт., установивших, что в Душанбе «значительный вклад в концентрацию PM_{2.5} вносят сжигание топлива для отопления и перенос пыли» [115].

Как отмечает А. Р. Шагидуллин, «мелкодисперсные взвешенные частицы являются приоритетным загрязнителем воздуха высокоурбанизированных территорий» [62]. По представленному процентному соотношению наибольших вклад выбросов PM_{2.5} приходится на пыль, переносимая ветром (33%), что «подтверждается данными наблюдений Комитета охраны окружающей среды при Правительстве Республики Таджикистан (рисунок 1.6) согласно которым количество пыльных дней на состояние 2023 года составило 241 дней» [116]. Региональную природу этого фактора раскрывают R. Indoitu, L. Orlovsky и N. Orlovsky, показавшие, что «пустыни Центральной Азии образуют устойчивый пылевой пояс – мощный источник минеральных и солевых аэрозолей» [117].

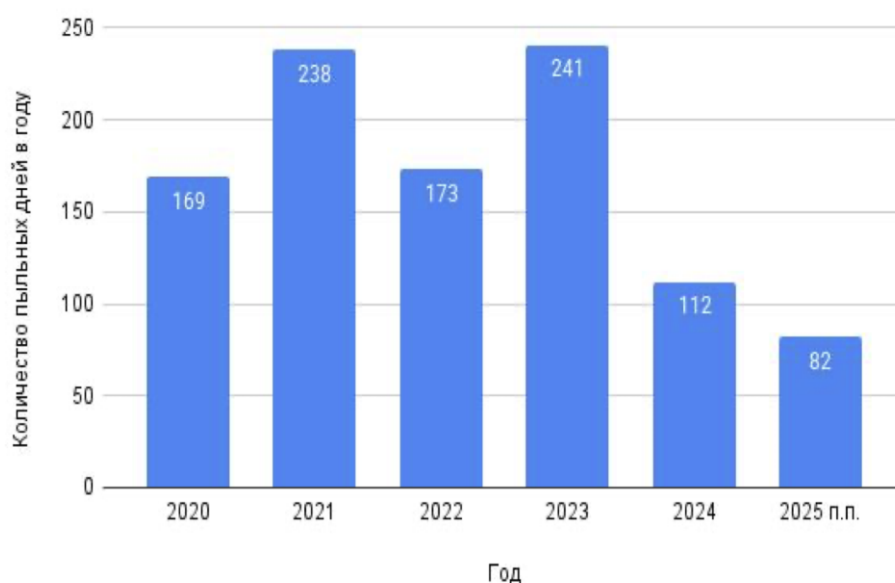


Рисунок 1.6. – Количество пыльных дней в г. Душанбе (по годам)

Вопросы пылевого загрязнения атмосферы урбанизированных территорий подробно исследованы В. Н. Азаровым, разработавшим методику «комплексной оценки пылевой обстановки и снижения запылённости воздушной среды промышленных предприятий» с учётом дисперсного состава пыли [118]. Вертикальную структуру пылевого загрязнения непосредственно над Душанбе охарактеризовали J. Hofer и соавт., установившие, что «минеральная пыль над

Душанбе регистрируется от приземного слоя до уровня перистых облаков» [119]. Как показывают Р. Ginoux и соавт., «перенос минеральной пыли из аридных источников способен существенно повышать фоновые концентрации частиц на удалённых территориях» [120].

В таблице 1.7 представлены данные за период 2012–2022 гг., которые отражают многолетнюю динамику выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух по регионам Республика Таджикистан.

Таблица 1.7. Объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферных воздуха от стационарных источников по регионам, тыс.тонн (2012 – 2022 гг.)

Год	РТ	Согд	Хатлон	ГБАО	РРП	Душанбе
2012	39,2	7,4	3	0	26,5	2,3
2013	31,2	8,5	2,1	0	19,2	1,4
2014	34,4	10,7	1,8	0	16,8	5,1
2015	27	8,8	1,7	0	12,1	4,4
2016	36,8	10,4	1,8	0	17,6	7
2017	46,7	10,9	1,8	0	19,5	14,5
2018	48,2	11,7	2,8	0	18,5	16,2
2019	64,8	11,6	18,6	0	17,4	17,2
2020	61,5	15,1	8,5	0	19,1	18,8
2021	66,5	12,8	20	0	16,5	17,3
2022	66,4	14,4	16,3	0	18,6	17,1
Итого:	522,7	122,3	78,4	0	201,8	121,3

При анализе представленных данных выявили, что по городу Душанбе наблюдается устойчивый рост выбросов с 2,3 тыс. т в 2012 г. до 17,1 тыс. т в 2022 г. Заметный рост после 2016 года коррелирует с увеличением плотности населения, развитием энергетической инфраструктуры и урбанизацией. Стабилизация выбросов в период 2018–2022 гг. на уровне 16–18 тыс.тонн, свидетельствует о выходе на новый уровень антропогенной нагрузки.

Компонентное разделение выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздуха в отличие от регионального распределения раскрывает качественный состав загрязнения и доминирующие источники формирования антропогенной нагрузки. Объем выбросов загрязняющих веществ в

атмосферных воздуха от стационарных источников по ингредиентам (2012 – 2022 гг.) представлена в таблица 1.8

Таблица 1.8. – Объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферных воздуха от стационарных источников по ингредиентам, тыс.тонн (2012 – 2022 гг.)

Год	твёрдые	сернистый ангидрид	оксид углерода	оксиды азота	углеводороды	прочие	Всего
2012	13,5	1,6	21,6	0,6	0,8	1,1	39,2
2013	11	1,6	16,4	0,6	0,7	0,9	31,2
2014	14,8	2,3	15	0,4	1,2	0,7	34,4
2015	11,8	2,1	10,4	0,5	1,3	0,9	27
2016	16,9	4	13,9	0,8	0,1	1,1	36,8
2017	18	9,3	14,7	0,9	2,1	1,7	46,7
2018	16,4	9,2	17,8	1,1	1,4	2,3	48,2
2019	33,2	10,4	17,6	1	1,1	1,5	64,8
2020	25,2	11,2	18,5	1,7	2,9	2	61,5
2021	35,6	9,7	15,3	1,5	2,5	1,9	66,5
2022	35,2	9	16,7	1,5	1,9	2,2	66,4
Итого	231,6	70,4	177,9	10,6	16	16,3	522,7
Соотношение	44%	13%	34%	2%	3%	3%	100%

За рассматриваемый период суммарный объем выбросов составил 522,7 тыс. тонн. В структуре загрязнения имеется ярко выраженная диспропорция, где наибольшую долю занимают твердые вещества составляя 231,6 тыс. т (44%), что делает их основным загрязнителем атмосферного воздуха. Особенно актуально высокая доля твердых частиц (включая пыль и сажу) для энергетических объектов (на твердом топливе), строительной деятельности и дорожной пыли в условиях города Душанбе. Выбросы оксида углерода занимают второе место в общем компонентном составе выбросов составляя 177,9 тыс. т, что эквивалентно 34% от общего количества выбросов. Преимущественно выброс оксида углерода сопровождается процессами неполного сгорания топлива (автотранспорт, ТЭЦ, бытовое отопление). Так, наличие высокой доли оксида углерода СО указывает на низкую эффективность сгорания топлива и устаревшие технологии, которые применяются в энергетике и транспорте. Третью позицию занимает сернистый

ангидрид (SO₂) с общим количеством 70,4 тыс. т (13%) соответственно. Анализ динамики показывает, что рост выбросов сернистого ангидрида (SO₂) становится заметнее после 2016 г., где значения увеличиваются с 4 тыс. т до 9-11 тыс. т в последующие годы, что напрямую связано с увеличением использования серосодержащего топлива, в частности угля, на теплоэлектростанциях.

За период 2012–2022 гг. (таблица 1.9) суммарный объем выбросов загрязняющих веществ от передвижных источников составил 4003 тыс. т, что почти в 8 раз превышает выбросы от стационарных источников. Согласно такой динамике подтверждается доминирующая роль транспортного сектора в формировании загрязнения атмосферного воздуха.

Таблица 1.9. – Объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферных воздуха от передвижных источников по регионам, тыс.тонн (2012 – 2022 гг.)

Год	РТ	Согд	Хатлон	ГБАО	РРП	Душанбе
2012	260,2	92,1	66,1	6,3	63,9	31,8
2013	275	97,4	69,8	6,6	67,7	33,5
2014	330,4	129,1	73,3	8,3	70,2	49,5
2015	275,1	110,1	78,1	3,9	30,4	52,6
2016	344,7	133,4	75,5	9,3	72	54,5
2017	307,9	120,7	69	7,7	62,2	48,3
2018	561,1	218,8	125,9	14,7	114,3	87,4
2019	253,4	93	54	7,1	55,7	43,6
2020	449,1	164,8	97,9	12,6	98,4	75,4
2021	466,1	166,9	95,8	16,2	78,1	106
2022	480	163,2	91,2	9,6	105,6	110,4
Итого:	4003	1489,5	896,6	102,3	818,5	693

Динамика выбросов загрязняющих веществ в атмосферных воздуха от передвижных источников волнообразный характер. Согласно представленным данным, на начальном этапе (2012–2016 гг.) наблюдается постепенный рост с 260,2 до 344,7 тыс. т., далее в 2018 г. фиксируется аномальный пик размером 561,1 тыс. т, после чего в 2019 г. происходит резкое снижение до 253,4 тыс. т. В последующие годы (2020–2022 гг.) вновь наблюдается рост до 480 тыс. т. Нестабильность выбросов от передвижных источников во много связано с

изменением интенсивности транспортных потоков или переходом на электромобили, что подтверждается данным Министерства Республики Таджикистан, где приводится, что общее количество электротранспорта в Таджикистане к 1 июня 2025 года составило 34354 единицы. Активный переход на электротранспорт во многом связан с принятием «Программы развития электротранспорта в Республике Таджикистан на 2023-2028 годы», где «предусмотрено создание базы для производства электромобилей и их комплектующих, строительство инфраструктуры для электроснабжения и обслуживания электромобилей, разработку технологии утилизации аккумуляторов и предоставление дополнительных льгот и иных преференций водителям электротранспорта» [121, 122].

В отличие от стационарных источников, структура выбросов транспорта имеет ярко выраженную доминанту продуктов сгорания топлива. Структура выбросов выбросов загрязняющих веществ в атмосферных воздуха от передвижных источников по ингредиентам приведена в таблица 1.10

Таблица 1.10. – Объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферных воздуха от передвижных источников по ингредиентам, тыс.тонн (2012 – 2022 гг.)

Год	оксид углерода	карбогидриды	оксид азота	свинец	диоксид серы	Всего
2012	184,3	38,1	34,6	0,4	2,8	260,2
2013	194,8	40,3	36,6	0,4	2,9	275
2014	236,9	48,9	44,4	0,1	0,1	330,4
2015	178,1	37,2	33,8	0	0,2	249,3
2016	265,2	55	20,9	0	0,2	341,3
2017	257,2	27,6	20	0	0,2	305
2018	380,4	70,7	108,6	0	0,5	560,2
2019	139,6	25,4	7,9	0	0	172,9
2020	185,1	33,7	10,5	0	0	229,3
2021	330,4	71,2	28,4	35,7	0,4	466,1
2022	363,7	78,6	31,5	0	0,4	474,2
Итого	2715,7	526,7	377,2	36,6	7,7	3663,9
Соотношение	74,1%	14,4%	10,3%	1,0%	0,2%	100%

За рассматриваемый период (2012–2022 гг.) суммарный объем выбросов составил 3663,9 тыс. т. Исходя из общей структуры загрязнения оксида углерода (СО) выделяется наиболее доминирующим объемом которого достигает 2715,7 тыс. т, что составляет 74,1% всех выбросов. Доминирующая доля свидетельствует о широком распространении процессов неполного сгорания топлива, которые характерны автотранспортом с низкой экологической эффективностью.

Структура выбросов от передвижных источников характеризуется критическим доминированием оксида углерода и значительным вкладом углеводородов и оксидов азота, которые в совокупности формируют более 98% загрязнения подтверждая тот факт, что транспортный сектор является ключевым источником формирования городского загрязнения воздуха.

В статье отечественных ученых [123] приводятся результаты исследования временной вариации концентраций частиц PM_{2.5} в период 2014-2024 гг. (таблица 1.11) выполненных в рамках проекта МАГАТЭ. В течении указанного периода каждый третий день в течение 24 часов отбирались пробы (789 проб за весь период проведения экспериментов).

Таблица 1.11. – Статистика концентрации частиц PM_{2.5} в период 2014–2024 гг.

Год	⟨C⟩, мкг/м³	C _{max} , мкг/м³	C _{min} , мкг/м³	пробы N
2014	170,58	688,78	30,13	48
2015	125,01	417,12	18,12	49
2016	108,00	510,00	16,67	95
2018	154,78	653,00	18,12	43
2019	98,72	1210,62	1,99	102
2020	61,95	169,99	1,00	91
2021	81,44	121,06	36,98	15
2022	68,86	312,27	10,92	122
2023	106,61	694,60	12,69	121
2024	46,94	177,63	1,00	103

На рисунке 1.7 представлена долгосрочная динамики загрязнения атмосферного воздуха взвешенными частицами PM2.5 за период 2014–2024 гг.

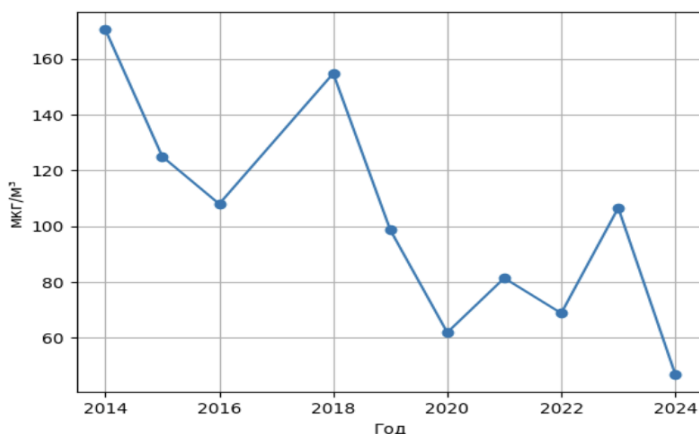


Рисунок 1.7. – Среднегодовые концентрации PM2.5 (2014–2024 гг.)

Как видно из представленного графика, в период 2014–2024 гг. наблюдается общая тенденция к снижению среднегодовой концентрации PM2.5. Однако в 2023 г. наблюдается локальный рост, что указывает на нестабильность экологической ситуации связанное с учащением пыльных бурь.

С целью анализа экстремальных уровней загрязнения воздуха была рассмотрена динамика максимальных среднесуточных концентраций PM2.5 представленная на рисунке 1.8, которое характеризует наихудшие эпизоды загрязнения и имеет ключевое значение при оценке экологических рисков для здоровья населения.

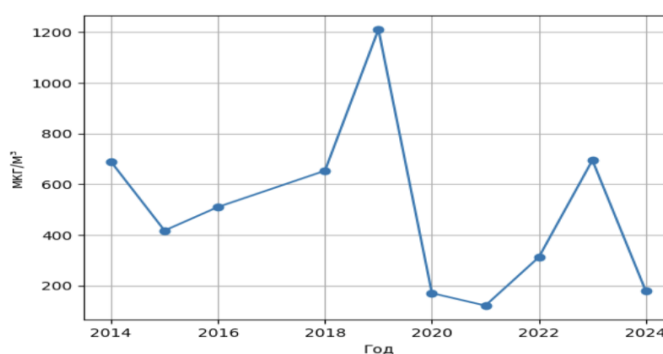


Рисунок 1.8. – Максимальные значения концентрация PM2.5 (2014–2024 гг.)

Анализ вышеприведенного графика показывает значительную вариативность максимальных концентраций PM2.5 по годам. Так, в 2019 год было зафиксировано экстремально высокое значение (более 1200 мкг/м³), что по

данным АЭРОНЕТ связано с пылевым вторжением. В 2020–2021 гг. наблюдается резкое снижение экстремальных значений, однако в 2023 г. вновь фиксируется их рост, что свидетельствует о сохранении риска кратковременных, но опасных загрязнений воздуха.

Для оценки фоновой уровня загрязнения атмосферного воздуха были проанализированы минимальные значения концентраций PM_{2.5}, который отражает состояние атмосферы в условиях минимального воздействия источников загрязнения (рисунок 1.9).

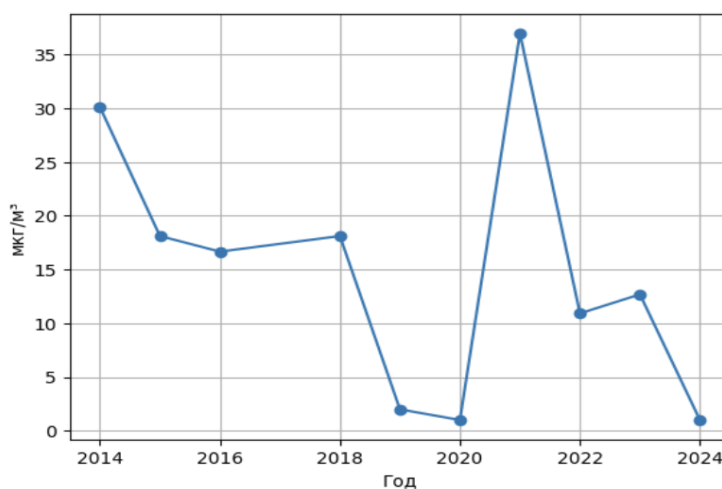


Рисунок 1.9. – Минимальные значения концентрация PM_{2.5} (2014–2024 гг.)

Из представленного графика следует, что минимальные концентрации PM_{2.5} в отдельные годы достигают крайне низких значений (до 1 мкг/м³), что соответствует практически фоновому уровню. Наиболее высокое минимальное значение наблюдается в 2021 г., что свидетельствует о повышенном базовом уровне загрязнения в течение года. Динамика минимальных значений концентраций PM_{2.5} указывает на значительную изменчивость фоновое состояние атмосферы, что подтверждает необходимость учета метеорологических факторов при интерпретации мониторинговых данных.

Данные, полученные от автоматизированной станции мониторинга, расположенной на территории посольства США в период 2019 – 2024 гг. приведены в (таблица 1.12).

Таблица 1.12. – Среднегодовые, макс-мин среднесуточные значения концентрации PM2.5 (2019 – 2024 гг.)

Год	Среднегодовые значения	Максимальное среднесуточное значение	Минимальное среднесуточное значение	Количество дней мониторинга
2019	132,88	474	61	187
2020	115	328	50	364
2021	127	338	61	363
2022	108,72	343	7	347
2023	120,55	437	23	345
2024	106,19	385	29	349

С целью сравнения в таблице 1.13 приведем сравнение среднегодовых концентраций PM2.5 по данным, полученным от автоматизированной станции мониторинга США и экспериментальных данных полученными отечественными учеными в рамках проекта МАГАТЭ [123].

Таблица 1.13. – Сравнение среднегодовых концентраций PM2.5

Год	Данные со станции (мкг/м³)	Экспериментальные данные (мкг/м³)	Разница
2019	132.88	98.72	–34.16
2020	115.00	61.95	–53.05
2021	127.00	81.44	–45.56
2022	108.72	68.86	–39.86
2023	120.55	106.61	–13.94
2024	106.19	46.94	–59.25

Данные, полученные в рамках экспериментальных исследований, носят характер выраженного смещения в сторону занижения среднегодовых концентраций PM2.5 (до 59 мкг/м³). Вероятно, что высокая вариативность экстремальных значений данных эксперимента обусловлена недостаточной частотой наблюдений и отсутствием равномерного временного покрытия, что не позволяет корректно оценить уровень хронического воздействия на население, поэтому интеграция экспериментальных данных в систему непрерывного мониторинга является необходимым условием для объективной оценки качества атмосферного воздуха.

1.4. Анализ действующей системы экологического мониторинга атмосферного воздуха города Душанбе

С научной точки зрения экологический мониторинг рассматривается как «информационная система, обеспечивающая наблюдение, оценку и прогноз состояния окружающей среды в интересах управления» [65]. Теоретические основы наблюдения за состоянием природной среды заложены Ю. А. Израэлем, определившим мониторинг как «систему наблюдений, позволяющую выделить изменения состояния биосферы под влиянием человеческой деятельности» [10]. Развивая это направление, И. П. Герасимов трактовал мониторинг как «информационную систему, обеспечивающую наблюдение, оценку и прогноз состояния окружающей среды в интересах управления» [124]. Значительный вклад в становление концепции внёс и В. Е. Соколов, совместно с Ю. А. Израэлем и И. П. Герасимовым разрабатывавший принципы экологического мониторинга и обосновавший роль биосферных заповедников как эталонных территорий для оценки «влияния антропогенной деятельности на биоту и выработки мероприятий по защите населения от токсического воздействия веществ-поллютантов» [125].

В Республике Таджикистан на законодательном уровне действует единая государственная система экологического мониторинга (ЕГСЭМ). Мониторинг состояния атмосферного воздуха проводится «в соответствии с законами Республики Таджикистан о гидрометеорологической деятельности от 23 июля 2016 года 1345 и «Об охране атмосферного воздуха» от 28 декабря 2012 года №915 Агентством по гидрометеорологии Комитета охраны окружающей среды при Правительстве Республики Таджикистан и результаты уровня загрязнения атмосферного воздуха по 5 городам ежедневно публикуется в электронном виде на сайте агентства» [126]. Мониторинговые данные о состоянии качества воздуха собираются одной автоматической станцией мониторинга, расположенной в здании Агентства по гидрометеорологии Комитета охраны окружающей среды при Правительстве Республики Таджикистан и пятью станциями, расположенными в г. Душанбе, которые управляются вручную.

Помимо названных станций имеется еще одна автоматическая станция мониторинга, которая находится на территории посольства США в г. Душанбе (рисунок 1.10).

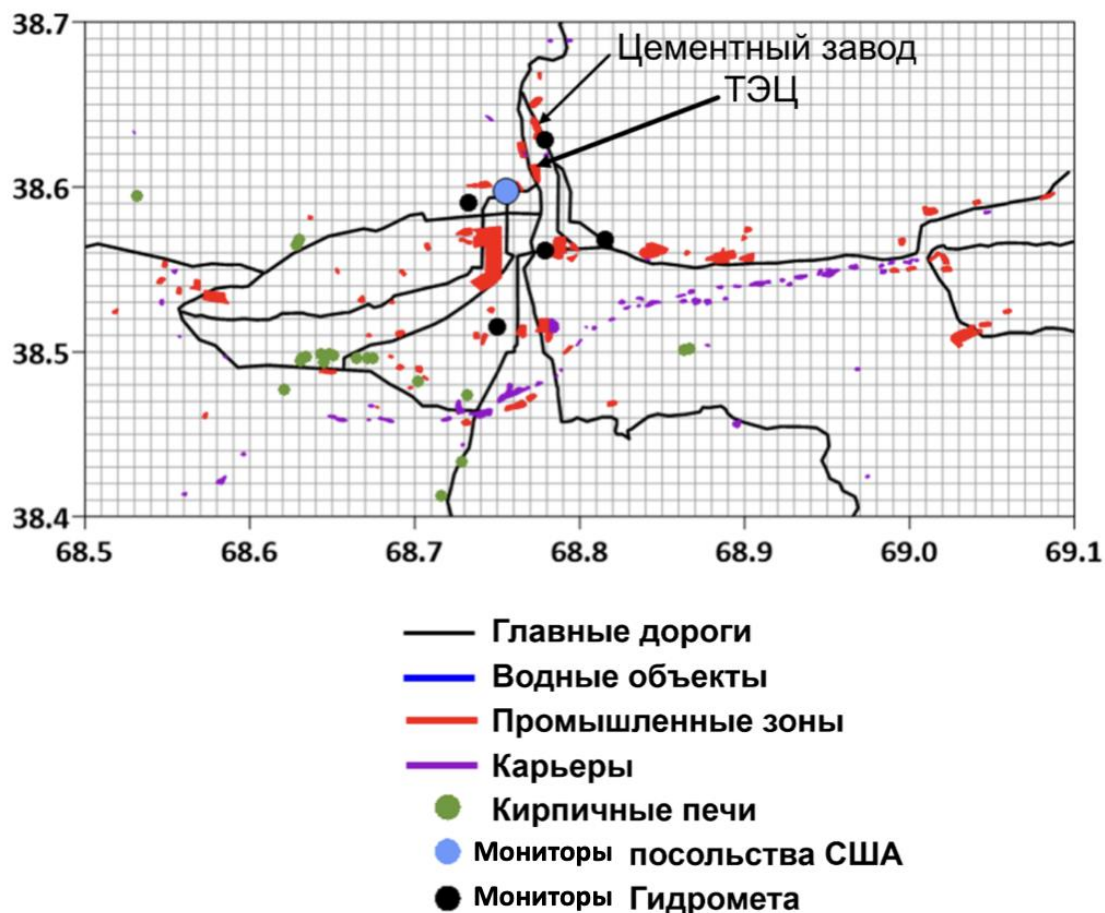


Рисунок 1.10. – Основные стационарные источники загрязнения и станции мониторинга в г. Душанбе

Анализ существующей системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха в городе Душанбе целесообразно проводить как исследование целостного организационно-функционального механизма, который включает нормативно-правовую базу, институциональную архитектуру, наблюдательную сеть, методы получения и распространения данных и способность системы обеспечивать переход от фиксации загрязнения к его оценке, прогнозированию и управленческому реагированию. При таком подходе выявляется «не только формальное наличие элементов мониторинга, но и реальная степень их достаточности для крупного и быстро развивающегося города, каким является Душанбе» [127 - 132]. Как отмечает В. В. Снакин,

«эффективность природоохранного управления определяется полнотой и достоверностью данных экологического мониторинга» [133].

Правовую основу системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха составляют «Закон Республики Таджикистан «Об экологическом мониторинге» [127], Закон Республики Таджикистан «Об охране атмосферного воздуха» [10], Закон Республики Таджикистан «О гидрометеорологической деятельности» [128] и нормы экологического законодательства в котором закреплены права граждан на благоприятную окружающую среду и на доступ к экологической информации» [129].

Закон Республики Таджикистан «Об охране атмосферного воздуха» [10] прямо связывает «государственное регулирование в данной сфере не только с природоохранными мерами, но и с единым порядком государственного учета вредных воздействий, мониторингом состояния атмосферного воздуха, формированием республиканского банка данных и единой информационной системы», что является фактом того, что на уровне законодательства мониторинг рассматривается не как изолированная измерительная деятельность, а как информационная основа государственного управления качеством воздуха [127].

Субъектом мониторинга с институциональной точки зрения выступает «Агентство по гидрометеорологии Комитета по охране окружающей среды при Правительстве Республики Таджикистан» [130]. За данным агентством на официальном уровне закреплены функции национальной гидрометеорологической службы, что включает как предоставление данных о текущем, так и о прогнозируемом состоянии природной среды. Согласно материалами самого Агентства подчеркивается, что «к его важнейшим задачам относятся мониторинг качества атмосферного воздуха и радиационного загрязнения» [130]. На портале Агентства со стороны информационно-аналитического подразделения «публикуется ежедневный экологический обзор загрязнения атмосферного воздуха по данным Управления мониторинга окружающей среды для ряда городов республики, включая город Душанбе» [131]. Следовательно, именно гидрометеорологическая служба является ядром

действующей государственной системы наблюдений за качеством атмосферного воздуха в столице Республики Таджикистан [130 – 132].

В действующей системе мониторинга качества атмосферного воздуха города Душанбе отслеживаются признаки многокомпонентного мониторинга, что подтверждается публично доступным экологическим обзор Агентства, где показано, что для города отслеживаются не только традиционные газовые загрязнители, но и взвешенные частицы PM10 и PM2.5, оксид и диоксид азота, оксид углерода, диоксид серы, озон, формальдегид, фенол, фтористый водород, а также радиационный γ -фон [132]. Многокомпонентный мониторинг «свидетельствует о стремлении системы охватить как наиболее массовые урбанистические загрязнители, которые связаны с транспортом и сжиганием топлива, так и вещества более характерные для отдельных технологических и химических воздействий». По Н. Ф. Реймерсу, «мониторинг сам по себе не улучшает состояние среды, а служит информационной основой для принятия управленческих решений» [134]. Требования к проектированию наблюдательных сетей формализованы S. Larssen и соавт., по которым «сеть мониторинга должна проектироваться исходя из целей оценки, а не из наличия площадок» [135].

В системе мониторинга качества атмосферного воздуха помимо стационарных наблюдений используется и мобильный компонент. По данным Агентства по гидрометеорологии, «мобильная станция мониторинга загрязнения атмосферного воздуха была приобретена в 2014 году, а с 2015 года осуществляется регулярный маршрутный мониторинг, в том числе, в городе Душанбе» [136]. Указывается, что «мобильная станция формирует 14 химических, 5 метеорологических и 2 физических наблюдений и применяется в населенных пунктах, на автомобильных стоянках, вблизи промышленных предприятий, рынков и теплоэлектростанций». Особая значимость мобильных станций для условий города Душанбе объясняется великой пространственной неоднородностью загрязнения, т.е. концентрации вблизи магистралей, рынков, промышленных площадок и в жилой застройке принципиально различаются.

Недостаток редкой сети стационарных наблюдений «частично компенсируется маршрутным мониторингом, что расширяет представление о пространственной структуре загрязнения» [136], но именно на этом этапе выявляется и первое фундаментальное ограничение существующей системы. Мобильная лаборатория не заменяет непрерывные автоматические измерения на плотной городской сети. Проблему репрезентативности редкой сети формулируют J. Duyzer и соавт., указывая, что «данные отдельного поста репрезентативны лишь для ограниченной области, размеры которой зависят от типа источника» [137].

Действительно, при использовании мобильных лабораторий возможна получение пространственных срезов, но она не обеспечивает одинаково устойчивого временного ряда для всех точек городской территории, т.е. мобильный мониторинг повышает территориальную охватываемость, но не устраняет полностью проблему непрерывности и репрезентативности наблюдений, т.к. крупному городу характерны быстро меняющиеся метеоусловия, интенсивные транспортные потоки и выраженная суточной динамикой выбросов [136].

В официальном экологическом обзоре [132] степень загрязнения интерпретируется через сопоставление концентраций с ПДК и через фиксацию случаев высокого и экстремально высокого загрязнения, что показывает выраженную ориентацию на нормативно-санитарную модель оценки состояния воздуха. Подобный подход применялся в постсоветской системе экологического контроля. При надзорной практики она удобна в применении, но в современных условиях он уже не исчерпывает задач городского экологического мониторинга, т.к. «для управления качеством воздуха урбанизированной территории важны не только факты превышения ПДК, но и оценка экспозиции населения, пространственная вариабельность концентраций, прогноз на ближайшие часы и сутки, оценка уязвимости отдельных районов и трансформация данных в понятные для органов власти и населения индикаторы риска» [131, 132].

Всемирный банк в докладе Air Quality Management in Central Asia «относит Душанбе к числу ключевых городских «горячих точек» загрязнения воздуха в

Центральной Азии и указывает, что «годовые средние концентрации PM_{2.5} превышают руководство ВОЗ, согласно которому рекомендуемое среднегодовое значение для PM_{2.5} составляет 5 мкг/м³» [108, 138, 139]. Согласно их прогнозу «наибольший потенциал сокращения воздействия PM_{2.5} в сценарии чистого воздуха к 2040 г. связан прежде всего с жилым отоплением (49%), затем с дорожным транспортом (25%), муниципальными отходами (12%), промышленностью (7%) и электростанциями (4%)» [108, 138, 139]. Сходную структуру источников для Душанбе получили S. Paragiannis и соавт. методом рецепторного моделирования, установив, что «зимой доминируют сжигание угля и биомассы, тогда как в тёплый сезон возрастает вклад транспорта и энергетики» [115].

Приведенные данные важны не только для характеристики загрязнения, но и для оценки самой системы мониторинга, т.е. если мониторинг не обеспечивает достаточной детализации по секторам происхождения загрязнения и по зонам экспозиции населения, он остается наблюдательным, но не становится полноценно управленческим. По определению L. Morawska и соавт., «низкобюджетные сенсорные технологии открывают возможность оценки индивидуального воздействия загрязнения воздуха на человека» [140].

В одном из опубликованных мониторинговых материалов указывается, что «около 70% загрязнения воздуха в Душанбе приходится на автотранспорт, а вклад стационарных источников составляет около 30%» [120]. Принимая эту пропорцию как обобщенную оценку, а не как универсальную константу для всех сезонов и метеоусловий позволяет сделать вывод, что существующая система мониторинга должна быть в высокой степени чувствительной к транспортно-обусловленным эпизодам загрязнения, к дорожным коридорам, перекресткам, рынкам, транспортным узлам и зонам пробок. «Ориентированность традиционной схемы наблюдений на ограниченное число контрольных пунктов и периодических маршрутных измерений рискует недоучитывать пиковые микрорайонные концентрации и кратковременные всплески воздействия на население» [134, 132]. Для городской среды, где загрязнение формируется под

воздействием транспорта, локальных источников тепла, особенностей рельефа и метеоусловий, прогностический компонент имеет не меньшее значение, чем измерительный. Без него система не переходит от режима «констатации» к режиму «предупреждения и предотвращения» [131,132,136]. Потенциал общественного участия в восполнении этого дефицита показывают С. L. Muller и соавт., отмечая, что «краудсорсинг существенно расширяет пространственно-временное покрытие атмосферных наблюдений» [141].

Нормативная база Таджикистана «предусматривает доступ населения к экологической информации и участие общественности в обсуждении вопросов охраны атмосферного воздуха» [127,128]. На практике это выражается в публикации экологических обзоров, работе официального сайта Агентства и предоставлении специализированной гидрометеорологической информации [132]. Помимо национального информационного поля «существуют и внешние источники данных, в частности международные платформы, которые отображают показатели автоматизированных станций и предоставляют доступ к данным в реальном времени через общедоступные интерфейсы» [5, 142], что делает информационный ландшафт мониторинга в городе Душанбе смешанным, так как национальная государственная система сосуществует с внешними цифровыми платформами наблюдения. Смешанная модель информационного ландшафта мониторинга вводит второе системное ограничение. Судя по публично доступным материалам, государственный контур предоставляет главным образом обзорную и специализированную информацию, тогда как внешние платформы демонстрируют преимущественно оперативные цифровые показатели по отдельным станциям. На современном этапе единое городское информационно-аналитическое пространство качества воздуха в городе Душанбе не достигло той степени зрелости, при которой стационарные, мобильные, ведомственные и общественно доступные данные автоматически объединяются в единую систему поддержки решений, что в значительной мере снижает управленческий эффект имеющихся данных.

Существующая система экологического мониторинга качества атмосферного воздуха в городе Душанбе представляет собой институционально оформленную и функционально работающую государственную систему наблюдений, которая обладает нормативной легитимностью, специализированным уполномоченным органом, набором контролируемых загрязнителей и мобильным инструментарием наблюдения. Современное состояние системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха в городе Душанбе оценивается как переходное, т.е. она уже вышла за рамки узко лабораторного контроля, но еще не достигла уровня полноценно интегрированной интеллектуальной городской платформы, которая способна в едином цикле обеспечивать наблюдение, пространственную интерпретацию, прогноз, оценку воздействия на население и оперативную выработку управленческих решений. Именно данное противоречие указывает на то, что проблема заключается не в полном отсутствии мониторинга, а в несоответствии между имеющимся контуром наблюдений и возросшими требованиями к точности, оперативности, пространственной детальности и прогностической ценности экологической информации в условиях современного города. По оценке R. Baron и J. Saffell, «плотные сети недорогих датчиков способны выявлять пространственную неоднородность загрязнения, недоступную для редких эталонных станций» [143], что обосновывает переход к распределённому мониторингу. Как показывают N. Castell и соавт., «платформы недорогих датчиков способны дополнять официальные сети при условии тщательной оценки качества их данных» [64].

Как отмечает Г. В. Аверин, «автоматизированные системы экологического мониторинга обеспечивают непрерывный сбор, обработку и анализ данных о состоянии окружающей среды» [144].

С научной позиции для эффективного построения полноценной интеллектуальной системы мониторинга качества воздуха в условиях города Душанбе необходимо выполнение пяти характеристик, перечисленных ниже:

1. плотное пространственное покрытие городской территории постоянными и полустационарными пунктами наблюдений;
2. интеграция данных мобильного, стационарного и внешнего цифрового мониторинга;
3. переход от преимущественно ПДК-ориентированной отчетности к риск-ориентированной модели, включающей индексы качества воздуха, оценку экспозиции населения и уязвимости районов;
4. развитие прогностического блока, опирающегося на метеопараметры, сезонность, транспортную нагрузку и статистико-математические модели;
5. наличие полноценного электронного архива и аналитической среды, в которой накопленные данные используются не только для отчетности, но и для сценарного управления качеством воздуха.

Выводы по первой главе

- Систематизированы методы измерения концентраций загрязняющих веществ атмосферного воздуха.
- Установлено, что ручные химико-аналитические методы XX века в значительной мере вытеснены автоматическими методами XXI века, а для построения распределённых сетей мониторинга взвешенных частиц наиболее перспективны оптические датчики, работающие на принципе рассеяния света, благодаря низкой стоимости, малому энергопотреблению и высокому пространственно-временному разрешению.
- Проанализированы методики расчёта индекса качества воздуха.
- Обосновано, что определение итогового индекса по максимальному значению подиндекса является наиболее методически корректным, поскольку усреднение способно скрыть опасное превышение по отдельному загрязнителю.
- Установлено, что ведущим загрязнителем атмосферного воздуха города Душанбе являются мелкодисперсные частицы PM_{2.5}, а неблагоприятные условия рассеивания обусловлены расположением города в межгорной котловине, преобладанием слабых ветров северных и северо-восточных

направлений и температурными инверсиями холодного периода. Основными источниками загрязнения выступают индивидуальное отопление, энергетика, транспорт, промышленность и переносимая ветром пыль.

- Выявлены выраженная сезонная и межгодовая изменчивость загрязнения и эпизоды экстремального роста концентраций, связанные с пылевыми вторжениями. Сопоставление данных автоматической станции и экспериментальных наблюдений показало систематическое занижение среднегодовых концентраций PM_{2.5} в эпизодических измерениях, что подтверждает необходимость непрерывного мониторинга.

- Анализ действующей системы экологического мониторинга показал её институциональную оформленность при наличии существенных ограничений: недостаточной плотности наблюдательной сети, преимущественной ориентации на ПДК-модель оценки, отсутствия развитого прогностического блока и единого городского информационно-аналитического пространства.

- Обосновано, что совершенствование системы мониторинга качества атмосферного воздуха города Душанбе требует перехода к комплексной цифровой системе, обеспечивающей плотное пространственное покрытие, интеграцию разнородных источников данных, переход к риск-ориентированной модели, развитие прогнозирования и создание единой аналитической среды.

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ГОРОДА ДУШАНБЕ МЕЛКОДИСПЕРСНЫМИ ЧАСТИЦАМИ PM2.5

2.1. Обоснование выбора измерительного оборудования для мониторинга концентраций PM2.5

В рамках проведения экспериментальных исследований по мониторингу качества атмосферного воздуха в городской среде особое значение имеет выбор измерительного оборудования, которая обеспечивает достаточную точность, стабильность и воспроизводимость результатов измерений. Для реализации задач исследования использован оптический датчик твердых аэрозольных частиц SPS30 производства компании Sensirion, которая предназначена для непрерывного контроля концентрации взвешенных частиц в атмосферном воздухе. Данный сенсор относится к современному поколению цифровых PM-датчиков и широко применяется в системах экологического мониторинга, интеллектуальных IoT-платформах и в устройствах контроля качества воздуха внутри помещений и в городской среде. По оценке А. Lewis и Р. Edwards, «данные недорогих датчиков требуют обязательной валидации перед использованием для оценки качества воздуха» [145]. Компактность размера датчика (рисунок 2.1) позволяет «интегрировать его в мобильные измерительные платформы, переносные станции мониторинга и беспилотные системы экологического наблюдения» [146]. Обоснованность выбора данной модели подтверждается результатами J. Kuula и соавт., включивших SPS30 в число протестированных сенсоров и установивших, что «ни один из низкобюджетных датчиков не соответствовал заявленным производителями диапазонам детектирования» [147].

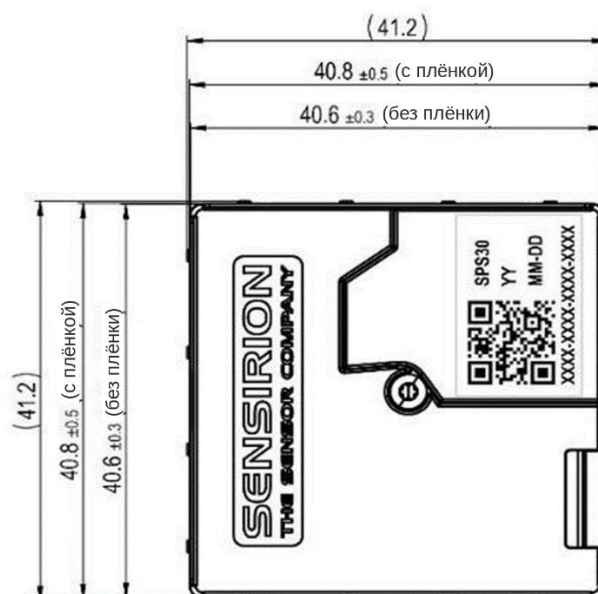


Рисунок 2.1. – Габаритные размеры оптического датчика SPS30

Датчик SPS30 работает на основе принципа лазерного рассеяния (рисунок 2.2). Так, через измерительную камеру датчика с помощью встроенного вентилятора прокачивается исследуемый воздушный поток. Как отмечают М. Budde и соавт., «оптические счётчики частиц оценивают массовую концентрацию по интенсивности рассеянного света с учётом принятого распределения частиц по размерам» [148]. При пересечении лазерного луча частицами аэрозоля, которые содержатся в воздухе каждая частица рассеивает свет лазера. По спецификации лазер имеет длину волны $\lambda \approx 660$ nm, что соответствует красной области спектра. Рассеянный свет регистрируется фотодиодным приемником и по интенсивности и форме сигнала определяется размер и количество частиц. Использование данного принципа обеспечивает возможность получения оперативных измерений в режиме реального времени с высокой чувствительностью к мелкодисперсным загрязнителям, включая частицы PM1.0, PM2.5, PM4 и PM10. Физическое ограничение метода отмечают D. Н. Nagan и J. Н. Kroll, показавшие, что «оценка массы по светорассеянию зависит от показателя преломления и плотности частиц, которые заранее неизвестны» [149].

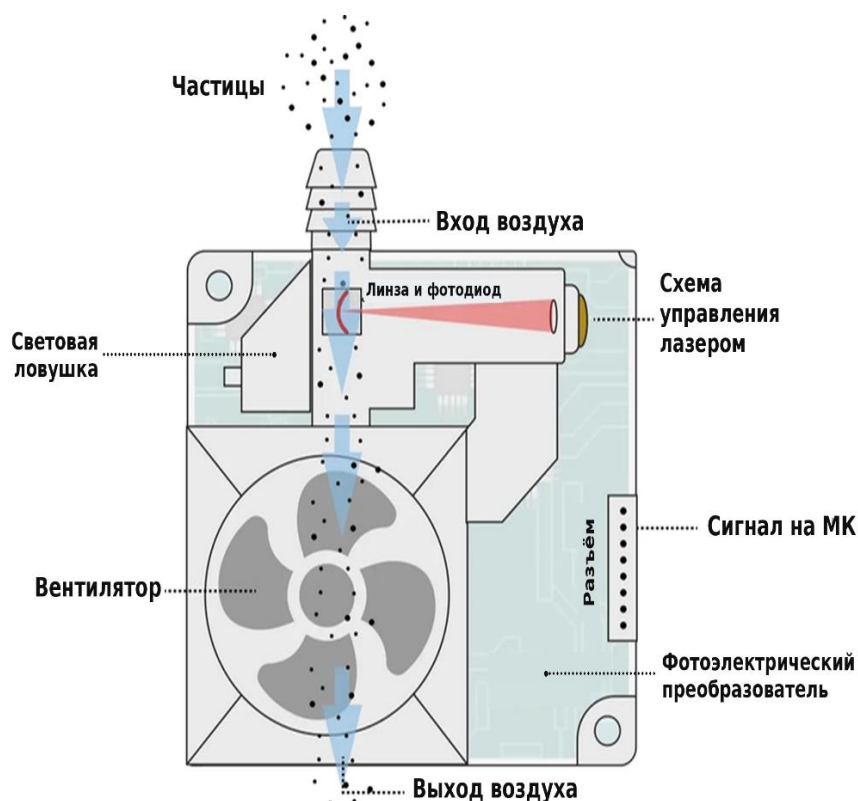


Рисунок 2.2. – Оптический датчик типа SPS30 (схема работы)

Как показано в исследовании Y. Wang и соавт., «оптические датчики рассеяния света обеспечивают быстрый отклик при низкой стоимости и энергопотреблении» [31], что определяет их применимость в мобильных измерительных платформах. Долговременная работа датчика обеспечивается наличием фирменной технологией защиты от загрязнения оптической системы, которая увеличивает срок эксплуатации датчика при непрерывной работе на 10 лет, что является необходимым при организации долговременных наблюдений в системе экологического мониторинга. Измеряемый диапазон концентраций аэрозольных частиц датчика SPS30 находится в пределах от 0 до 1000 мкг/м³. Согласно спецификации «для диапазона концентраций [0–100мкг/м³] погрешность измерения для PM2.5 составляет ± 5 мкг/м³ + 5 % измеренного значения и ± 10 % при концентрациях [100–1000 мкг/м³]». Детальный анализ аэрозольного состава воздуха возможен за счет технических характеристик датчика SPS30, который способен определять и численную концентрацию частиц в диапазоне от 0 до 3000 частиц/см³. В таблице 2.1 обобщены технические характеристики рассматриваемого датчика.

Таблица 2.1. – Характеристики датчика SPS30

Параметр	Значение
Диапазон измерения РМ	0-1000 мкг/м ³
Поддерживаемые фракции	PM1.0, PM2.5, PM4, PM10
Интервал обновления данных	1 с
Напряжение питания	5 В
Потребляемый ток	45-65 мА
Интерфейсы подключения	UART, I2C
Рабочая температура	от -10 до +60 °С
Рабочая влажность	0-95 %
Размеры	41 × 41 × 12 мм
Масса	26 г
Расчетный срок службы	более 10 лет

Как показывают L. Sun и соавт., «характеристики недорогих датчиков в полевых условиях заметно отличаются от лабораторных» [150]. В рамках экспериментальной системы мониторинга использовался интерфейс UART, которая обеспечивает более устойчивую передачу данных при использовании кабельных соединений увеличенной длины и повышенной электромагнитной помехозащищенности. Скорость передачи данных составляет 115200 бит/с.

В процессе эксплуатации внутри измерительной камеры может происходить накопление пылевых частиц, которые влияют на точность измерений. Для минимизации данного эффекта в датчика типа SPS30 реализован механизм автоматической продувки, при котором вентилятор периодически переходит в режим максимальных оборотов для удаления накопившейся пыли. По умолчанию процедура очистки выполняется один раз в неделю, однако интервал может быть изменен программно.

В системе предусмотрен регистр состояния устройства, который позволяет контролировать корректность работы лазерного модуля, скорость вращения вентилятора и наличие аппаратных неисправностей, что обеспечивает

повышение надежности системы экологического мониторинга и позволяет своевременно выявлять возможные сбои оборудования.

Датчики подобного типа относятся к категории малогабаритных сенсоров и не заменяют полнофункциональные государственные станции мониторинга атмосферного воздуха., но их применение является экономически эффективным решением при построении распределенных сетей экологического мониторинга городской среды в условиях ограниченного финансирования и необходимости организации большого числа точек наблюдения. Использование датчика SPS30 в рамках настоящего исследования позволило обеспечить непрерывный сбор данных о концентрации мелкодисперсных аэрозольных частиц в атмосфере города Душанбе, сформировать экспериментальную базу данных для последующего анализа и прогнозирования качества атмосферного воздуха. Такой подход соответствует позиции M. R. Giordano и соавт., по которой «низкобюджетные датчики массы частиц дают качественные данные только при корректной калибровке в условиях применения» [151].

2.2 Оценка пригодности оптических датчиков типа SPS30 для измерения PM2.5

В исследовании групп ученых из Великобритании [152] приводится анализ эффективности датчика типа SPS30. Данный эксперимент проводилась с размещением 8 датчиков типа SPS30, один датчик компании PurpleAir и эталонный монитор качества воздуха Fidas 200S, представляет собой систему анализа мелкодисперсной пыли референсного класса. В течении 97 календарных дней данные собирались с датчиков размещенных на высоте 3,5 м в центре города. Для оценки эффективности датчика необходимо провести анализ межсенсорной воспроизводимости, то есть степени согласованности показаний между несколькими экземплярами датчиков одной модели, которые функционируют в идентичных условиях. При построения распределённых сетей мониторинга качества атмосферного воздуха такой подход имеет особое значение, так как даже датчики одного производителя могут демонстрировать

различия в чувствительности, стабильности регистрации и реакции на кратковременные изменения аэрозольной нагрузки. Воспроизводимость восьми датчиков типа SPS30 оценивалась на основе коэффициента вариации (CoV) и стандартного отклонения (SD) для различных интервалов усреднения PM2.5, что позволило установить, насколько временная агрегация данных влияет на устойчивость результатов и пригодность сенсоров для последующего анализа городской загрязнённости воздуха. Результаты приведены в таблице 2.2

Таблица 2.2. –Коэффициент вариации и стандартное отклонение для датчиков типа SPS30

Интервал усреднения данных PM2.5	CoV, %	SD, мкг/м³
1 минута	27,8	12,2
1 час	17,7	8,8
1 сутки	15,0	6,0

Как видно из вышеприведенной таблицы при увеличении интервала усреднения наблюдается последовательное снижение коэффициента вариации, что свидетельствует о том, что агрегирование данных повышает устойчивость результатов и снижает влияние кратковременных выбросов, локальных турбулентных изменений и случайных флуктуаций в работе датчика. Аналогичный эффект отмечен S. Sousan и соавт., установившими, что «согласованность недорогих датчиков возрастает при увеличении интервала усреднения данных» [153]. Для диссертационного исследования данный вывод имеет принципиальное значение, поскольку при оценке качества атмосферного воздуха в условиях города Душанбе более корректным является анализ не отдельных мгновенных измерений, а усредненных временных интервалов, прежде всего среднечасовых значений. Тот же эффект зафиксирован F. M. J. Bulot и соавт., установившими, что «корреляция низкобюджетных датчиков с фоновой станцией изменяется в зависимости от источника частиц и уровня фоновых концентраций» [154].

Для более полной оценки точности датчика SPS30 авторы сопоставили данные каждого из восьми датчиков, среднее значение по всей группе SPS30 и

показания PurpleAir с данными эталонного монитора Fidas 200S, что позволяет определить, насколько измерения портативных датчиков приближаются к референсному оборудованию, которая применяется для контроля качества атмосферного воздуха. По данным В. Feenstra и соавт., «согласованность показаний однотипных датчиков служит важным критерием пригодности сети для мониторинга» [155]. В качестве основных статистических показателей были использованы коэффициент детерминации R^2 , среднеквадратическая ошибка RMSE, нормированная среднеквадратическая ошибка NRMSE, а также параметры линейной регрессии – наклон a и свободный член b . Как подчёркивают S. Bai и соавт., «оценка качества калибровочных моделей должна опираться на совокупность метрик точности, а не на единственный показатель» [156]. Особое внимание уделялось сравнению 15-минутных и среднечасовых значений, поскольку именно временное усреднение существенно влияет на точность результатов (таблица 2.3).

Таблица 2.3. – Метрики точности датчиков типа SPS30 и PurpleAir по сравнению с эталонным монитором Fidas 200S

Датчик	R^2 , 15 мин	RMSE , 15 мин, мкг/м ³	NRMS E, 15 мин, %	a , 15 мин	b , 15 мин	R^2 , 1 час	RMSE , 1 час, мкг/м ³	NRMS E, 1 час, %	a , 1 час	b , 1 час
S1	0,51	6,05	0,02	0,65	0,92	0,85	2,94	0,02	0,85	–1,01
S2	0,51	7,02	0,02	0,75	1,13	0,85	3,42	0,02	0,97	–1,08
S3	0,50	5,91	0,02	0,64	1,23	0,85	2,85	0,02	0,83	–0,63
S4	0,53	6,86	0,02	0,78	1,35	0,87	3,23	0,02	1,01	–0,91
S5	0,51	7,45	0,02	0,81	1,27	0,85	3,63	0,02	1,05	–1,11
S6	0,48	9,73	0,02	0,99	1,42	0,77	5,20	0,03	1,15	–0,15
S7	0,52	7,11	0,02	0,79	1,27	0,86	3,42	0,02	1,03	–1,04
S8	0,51	7,56	0,02	0,82	1,22	0,85	3,64	0,02	1,07	–1,21
Средне е SPS30	0,54	6,74	0,02	0,78	1,23	0,86	3,38	0,02	0,99	–1,63
PurpleA ir	0,58	8,46	0,03	1,07	–0,4 5	0,85	4,79	0,03	1,37	–3,47

Данные таблицы 2.3 показывают, что при 15-минутном усреднении значения R^2 для датчиков типа SPS30 остаются сравнительно низкими и находятся в диапазоне 0,48–0,53, что указывает на ограниченную устойчивость результатов при более высоком временном разрешении. Вместе с тем при переходе к среднечасовому усреднению наблюдается существенное улучшение качества измерений. Для среднего значения восьми датчиков типа SPS30 коэффициент детерминации достигает 0,86, а RMSE снижается до 3,38 мкг/м³ что подтверждает, что часовые средние значения являются более надежной основой для сопоставления портативных датчиков с референсным монитором. Следовательно, при использовании датчиков типа SPS30 в условиях городской среды целесообразно ориентироваться именно на среднечасовые показатели, поскольку они обеспечивают более высокую согласованность с эталонными измерениями.

Для определения практической пригодности датчиков типа SPS30 авторы дополнительно сопоставили полученные показатели с целевыми значениями, которые рекомендованы Агентством по охране окружающей среды США для низкобюджетных датчиков PM2.5, что позволяет не только оценить статистическое сходство между сенсорными и эталонными данными, но и установить, соответствует ли оборудование минимальным критериям точности, воспроизводимости, линейности и ошибки (таблица 2.4).

Таблица 2.4. – Соответствие SPS30 критериям US EPA для низкобюджетных PM2.5-датчиков

Группа метрик	Показатель	Целевое значение US EPA	15-минутные данные	Среднечасовые данные
Точность / воспроизводимость	SD	<5 мкг/м ³	Не соответствует	Не соответствует
Точность / воспроизводимость	CoV	< 30 %	Соответствует	Соответствует
Смещение	Наклон регрессии	1 ± 0,35	Соответствует	Соответствует

Смещение	Свободный член	$-5 \leq b \leq +5$	Соответствует	Соответствует
Линейность	R^2	$\geq 0,7$	Не соответствует для полного набора данных: $R^2 = 0,48-0,53$; соответствует при $PM_{2.5} < 100 \text{ мкг/м}^3$: $R^2 = 0,72-0,75$	Соответствует
Ошибка	RMSE	$\leq 7 \text{ мкг/м}^3$	Не соответствует для полного набора данных: $RMSE = 5,9-9,7 \text{ мкг/м}^3$; соответствует при $PM_{2.5} < 100 \text{ мкг/м}^3$: $RMSE = 3,3-4,6 \text{ мкг/м}^3$	Соответствует
Ошибка	NRMSE	$\leq 30 \%$	Соответствует	Соответствует

Из таблицы 2.4 следует, что датчики типа SPS30 не по всем показателям полностью соответствуют критериям US EPA. В частности, стандартное отклонение превышает рекомендуемый предел как для 15-минутных, так и для среднечасовых данных. Однако по коэффициенту вариации, параметрам смещения, нормированной ошибке, а также по линейности и RMSE при часовом усреднении датчики демонстрируют приемлемые результаты. Наиболее важным является то, что среднечасовые данные проходят основные критерии по линейности и ошибке, тогда как 15-минутные значения не соответствуют требованиям при анализе полного набора данных, что позволяет сделать вывод, что датчики типа SPS30 может применяться в задачах мониторинга $PM_{2.5}$ как вспомогательное измерительное оборудование, но его результаты требуют корректной обработки, усреднения и периодической проверки по референсным данным. Схожие выводы получены Т. Zheng и соавт., отметившими, что «характеристики низкобюджетных датчиков существенно различаются в средах с высокими и низкими концентрациями частиц» [157].

Поскольку точность оптических датчиков $PM_{2.5}$ может зависеть от метеорологических условий, авторы статьи дополнительно рассмотрели возможность улучшения результатов за счет калибровочных моделей. В частности, были сопоставлены простая линейная модель, модель с учетом

относительной влажности и модель с учетом температуры. Такой анализ важен, поскольку оптический принцип измерения основан на регистрации рассеянного света, а размер и оптические свойства аэрозольных частиц могут изменяться под воздействием влажности воздуха. Механизм этого влияния раскрыт R. Jayaratne и соавт., установившими, что «при отсутствии осушителя на входе датчика гигроскопический рост частиц и туман завышают регистрируемую массовую концентрацию» [158]. В таблице 2.5 представлены варианты калибровочных уравнений и соответствующие значения R^2 и RMSE.

Таблица 2.5. – Калибровочные уравнения и качество модели

Тип данных	Вид модели	Уравнение	R^2	RMSE, мкг/м^3
Среднечасовые данные, полный набор	Линейная модель	$S = a_1 \times \text{PM}_{2.5} + i$	0,86	3,38
Среднечасовые данные, полный набор	Модель с учетом относительной влажности	$S = a_1 \times \text{PM}_{2.5} + a_2 \times \text{RH} + i$	0,88	3,05
Среднечасовые данные, полный набор	Модель с учетом температуры	$S = a_1 \times \text{PM}_{2.5} + a_2 \times T + i$	0,87	3,20
15-минутные данные, $\text{PM}_{2.5} < 100 \text{ мкг/м}^3$	Линейная модель	$S = a_1 \times \text{PM}_{2.5} + i$	0,73	3,97
15-минутные данные, $\text{PM}_{2.5} < 100 \text{ мкг/м}^3$	Модель с учетом относительной влажности	$S = a_1 \times \text{PM}_{2.5} + a_2 \times \text{RH} + i$	0,79	3,48
15-минутные данные, $\text{PM}_{2.5} < 100 \text{ мкг/м}^3$	Модель с учетом температуры	$S = a_1 \times \text{PM}_{2.5} + a_2 \times T + i$	0,78	3,53

Как видно из таблицы 2.5, наибольшее улучшение качества модели достигается при включении относительной влажности. Для среднечасовых данных учет RH повышает R^2 с 0,86 до 0,88 и снижает RMSE с 3,38 до 3,05 мкг/м^3 . Относительная влажность является значимым фактором при калибровке оптических датчиков, тогда как учет температуры дает менее выраженный эффект что подтверждается тем, что для 15-минутных данных при концентрациях $\text{PM}_{2.5}$ ниже 100 мкг/м^3 R^2 возрастает с 0,73 до 0,79, а RMSE

снижается с 3,97 до 3,48 мкг/м³. Целесообразность такой коррекции подтверждается выводом R. Piedrahita и соавт. о том, что «учёт относительной влажности повышает точность оптических измерений мелкодисперсных частиц» [41]. Данный вывод накладывает обязательство учета метеорологического фона и пылевых эпизодов при определении концентраций PM_{2.5}.

Авторами доказано, что «при использовании датчиков типа SPS30 надежные результаты были получены при среднечасовом усреднении, когда показатели линейности и ошибки соответствовали рекомендуемым критериям US EPA» [152]. Для настоящего диссертационного исследования это служит методическим основанием для применения среднечасовых значений PM_{2.5} при анализе экспериментальных данных и их сопоставлении со стационарными постами мониторинга качества атмосферного воздуха.

В работе A. Pujante Perez и его соавторов [159] рассматривается «эффективность носимого датчика типа SPS30 в контексте гражданской науки и гиперлокального мониторинга качества атмосферного воздуха». В отличие от традиционных стационарных постов, такие устройства ориентированы на сбор данных в непосредственной среде пребывания человека, что особенно важно при оценке персонального воздействия загрязняющих веществ. Авторы подчёркивают, что официальные сети мониторинга, как правило, имеют ограниченную пространственную плотность и не всегда позволяют фиксировать микролокальные различия концентраций загрязняющих веществ. В связи с этим носимые датчики рассматриваются как дополнительный инструмент, который способен расширить пространственное покрытие наблюдений и вовлечь население в экологический мониторинг.

Целью исследования являлась проверка пригодности датчика типа SPS30 для проектов гражданской науки, которые связаны с мониторингом качества воздуха. Для этого авторы провели полевые испытания и сопоставили данные Atmotube Pro с референсным прибором GRIMM 11-D, который применяется для высокоточного измерения концентраций аэрозольных частиц.

Наиболее высокие результаты датчик типа SPS30 показал при измерении фракций PM1 и PM2.5. Для PM1 коэффициент детерминации находился в диапазоне от 0,747 до 0,932, а коэффициент корреляции Пирсона – от 0,864 до 0,965. Для PM2.5 значения коэффициент детерминации и коэффициент корреляции Пирсона составили 0,714–0,924 и 0,845–0,961 соответственно, что свидетельствует о сильной положительной связи между данными датчика типа SPS30 и GRIMM 11-D, особенно для мелкодисперсных фракций, которые имеют наибольшее значение для оценки риска воздействия на здоровье человека. При этом авторы отмечают, что наклон регрессионной зависимости для PM1 и PM2.5 был близок к единице, а свободный член находился в сравнительно небольших пределах, что указывает на относительно низкий уровень систематических и несистематических ошибок для данных фракций. Датчик типа SPS30 как и многие другие низкобюджетные оптические датчики, демонстрирует более устойчивые результаты для мелких фракций и менее надёжные для крупнодисперсной пыли PM10.

Для PM2.5 высокие значения R^2 были получены как при 1-минутном, так и при 15-минутном тесте. Например, для PM2.5 при 1-минутном интервале значение R^2 составило 0,907, а при 15-минутном – 0,924, что показывает, что Датчик типа SPS30 достаточно хорошо воспроизводит динамику мелкодисперсных частиц даже при высокой временной детализации, но для 5-минутного теста значения R^2 оказались ниже составив 0,714 для PM2.5, что указывает на то, что качество сенсорных данных может зависеть не только от самой длительности усреднения, но и от структуры исходного ряда, характера эпизодов загрязнения и особенностей синхронизации данных между приборами.

На рисунке полученным авторами статьи представлены диаграммы рассеяния между SPS30 и GRIMM 11-D для PM1, PM2.5 и PM10 при различных интервалах усреднения. Визуально наиболее плотная линейная группировка точек наблюдается для PM1 и PM2.5, что подтверждает статистические результаты таблицы (рисунок 2.3).

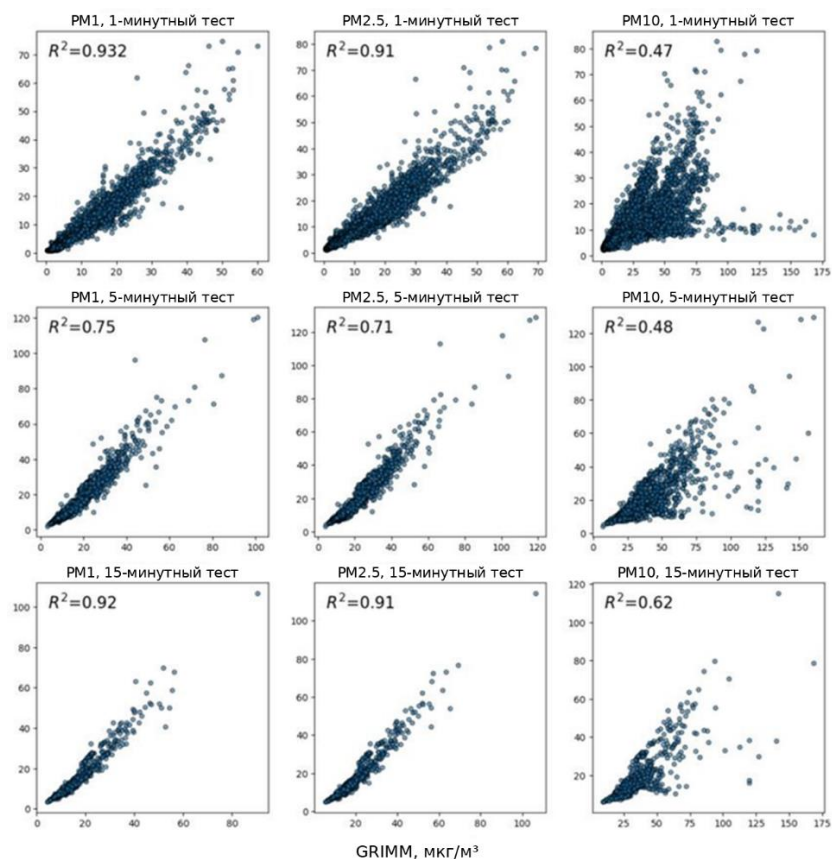


Рисунок 2.3. – Корреляция между GRIMM 11-D и SPS30

Рисунок 2.4 дополняет этот вывод временными рядами. Так, для PM2.5 сигналы SPS30 в целом хорошо повторяют динамику GRIMM 11-D.

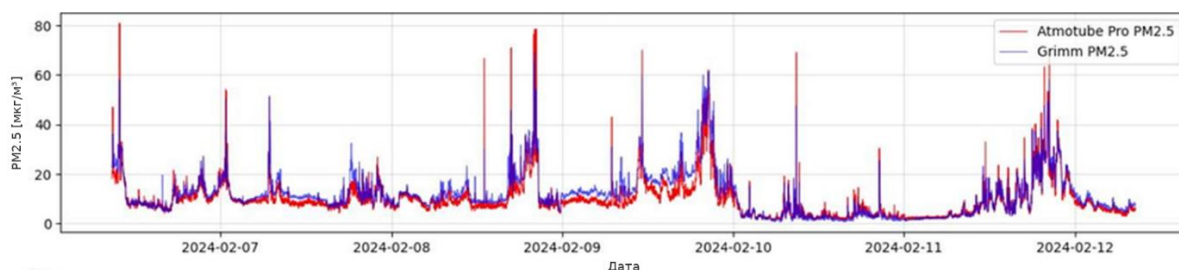


Рисунок 2.4. – Одноминутный интервал измерений концентрации PM2.5

Авторами [159] доказано, что «датчики типа SPS30 являются перспективным носимым сенсором для задач гражданской науки, оценки персональной экспозиции и гиперлокального мониторинга качества воздуха», что для настоящего диссертационного исследования считается методологически значимым, так как обосновывает использование SPS30 как инструмента экспериментальной оценки динамики PM2.5, но не полноценной замены стационарным и референсным системам мониторинга. Этот вывод согласуется с

позицией А. С. Rai и соавт., отмечающих, что «недорогие сенсоры требуют калибровки и не заменяют референсные приборы, но расширяют охват наблюдений» [32]. Аналогичное ограничение установлено L. R. Crilley и соавт., показавшими, что «при высокой относительной влажности низкобюджетный оптический счётчик частиц даёт значительное положительное смещение массы» [160].

2.3 Натурные измерения концентраций PM_{2.5} в различных природно-территориальных и метеорологических условиях

В рамках диссертационного исследования было произведено серия экспериментов по измерению концентрации твердых частиц PM_{2.5}. Так, на графике представленной на рисунке 2.5 приведены экспериментальные данные концентрации твердых частиц PM_{2.5}.

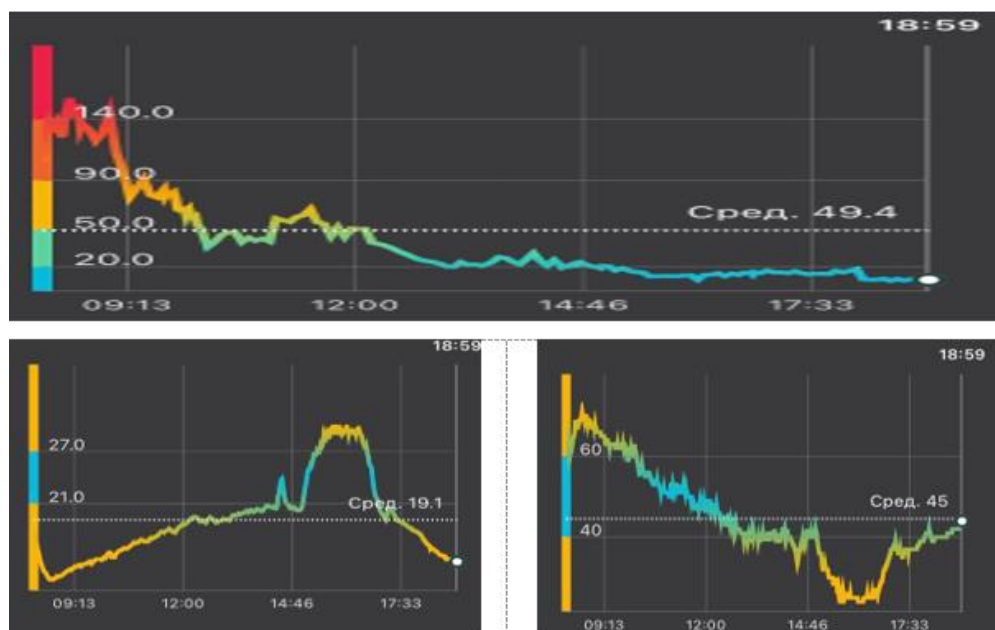


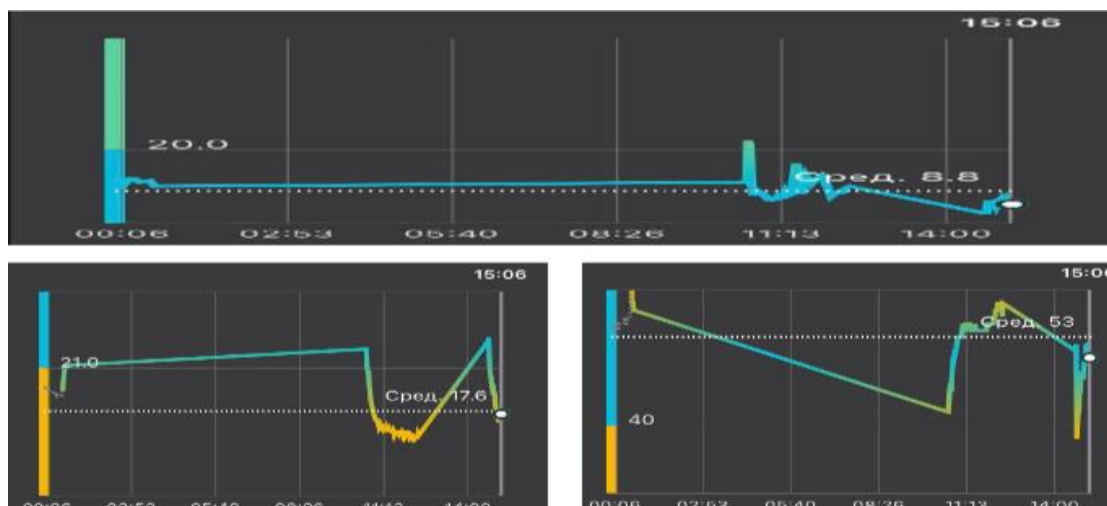
Рисунок 2.5. – Результаты измерений концентрации PM_{2.5}, мкг/м³

При анализе вышепредставленного графика была выявлена тенденция снижения уровня загрязнения в течение первой половины дня, который выражается тем, что к полудню концентрация PM_{2.5} снизилась до уровня 30–40 мкг/м³ с 120–140 мкг/м³. Вторая половина дня характеризуется стабилизацией значений концентрации PM_{2.5} на уровне 15–25 мкг/м³, что указывает на

улучшение качества воздуха. При локальном улучшении качества воздуха все еще сохраняется превышение нормативов ВОЗ. Так, среднее значение за рассматриваемый период составляет 49,4 мкг/м³. Усиление турбулентного перемешивания воздуха способствовало уменьшению агрегации частиц и их осаждения. Наблюдаемый рост температуры сопровождается усилением конвективных потоков, что приводит к интенсивному рассеиванию загрязняющих веществ.

Совокупный анализ выделенных параметров указывает на наличие зависимости между концентрацией PM_{2.5} и метеорологическими условиями. Так, высокая концентрация PM_{2.5} в утренние часы связана с низкой температурой, высокой влажностью, слабым перемешиванием воздуха и локальными источниками выбросов. Прогрев атмосферы усиливает вертикальные воздушные потоки, что напрямую влияет на дисперсию и снижение концентраций PM_{2.5}. Полученные закономерности подтверждают вывод J. Gong и соавт. о том, что «метеорологические параметры являются ключевыми предикторами концентраций PM_{2.5}» [63]. Полученные результаты могут быть использованы при построении прогностических моделей качества атмосферного воздуха, где температура и влажность выступают в качестве значимых предикторов. Сходную зависимость для городов Центральной Азии установили М. Tursumbayeva и соавт., показавшие, что «медленное движение воздушных масс типично для эпизодов высоких концентраций PM_{2.5} в городах региона» [161].

Представленные результаты мониторинга качества атмосферного воздуха в воздушном бассейне реки Варзоб (рисунок 2.6) демонстрируют иную картину по сравнению с предыдущим экспериментом, что позволяет более глубоко проанализировать влияние природных условий на формирование концентраций загрязняющих веществ.



**Рисунок 2.6. – Результаты мониторинга качества воздуха
воздушного бассейна реки Варзоб, мкг/м³**

Анализ графика концентрации PM2.5 показывает, что в целом уровень загрязнения находится на относительно низком уровне. Среднее значение составляет около 8,8 мкг/м³, что близко к рекомендованным значениям Всемирной организации здравоохранения и существенно ниже, чем в условиях городской среды. Сопоставительный анализ показывает, что в условиях воздушного бассейна реки Варзоб концентрация PM2.5 в значительно меньшей степени зависит от метеорологических факторов, чем в городской среде. Несмотря на заметные колебания влажности и температуры, уровень загрязнения остается стабильно низким, что свидетельствует о низкой антропогенной нагрузке и эффективных механизмах естественного самоочищения атмосферы, которые обусловлены особенностями горно-долинной циркуляции воздуха.

Кратковременные пики концентрации PM2.5 не оказывают существенного влияния на общий уровень загрязнения и носят случайный характер. В целом полученные результаты подтверждают, что рассматриваемая территория характеризуется благоприятным экологическим состоянием атмосферы. Проведенный эксперимент позволяет сделать вывод о том, что в природных условиях (вне плотной городской застройки) формируется устойчивый низкий уровень концентрации мелкодисперсных частиц, а влияние метеорологических

факторов проявляется преимущественно в виде кратковременных флуктуаций, не приводящих к накоплению загрязняющих веществ. Результаты данного эксперимента могут быть использованы в качестве эталонных при сравнительном анализе с урбанизированными территориями и при разработке моделей пространственного распределения загрязнений. Существование выраженных внутригородских градиентов подтверждают Г. Ноек и соавт., указывая, что «пространственная вариация загрязнения внутри города может быть сопоставима с различиями между городами» [162].

До пылевого вторжения был проведен эксперимент по измерению концентрации PM_{2.5}, что позволяет зафиксировать исходное, фоновое состояние атмосферного воздуха и выявить характерные закономерности суточной динамики загрязнения при отсутствии экстремальных внешних воздействий (рисунок 2.7).

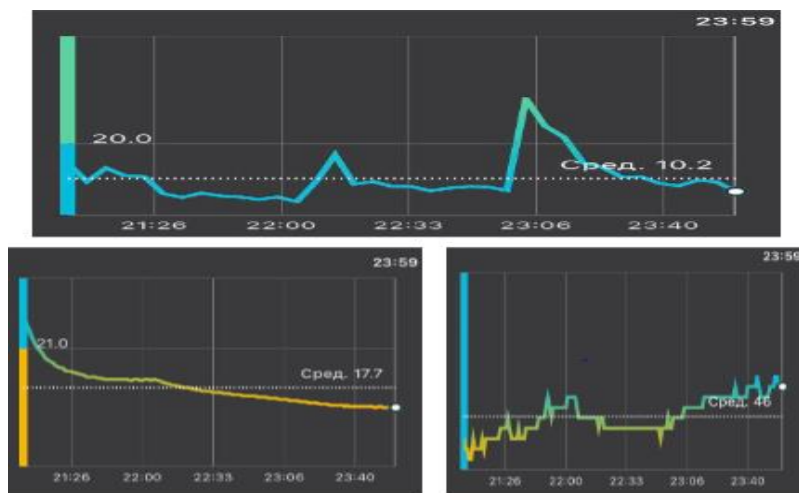


Рисунок 2.7. – Динамика концентрации PM_{2.5} до периода пылевого вторжения, $\mu\text{кг}/\text{м}^3$

В течении рассматриваемого периода периода уровень загрязнения твердыми частицами PM_{2.5} остается относительно стабильным. Благоприятный фон для краткосрочного воздействия выражается в среднем значении 10,2 $\mu\text{кг}/\text{м}^3$, что близка к рекомендованным пределам ВОЗ для краткосрочного воздействия и может быть интерпретировано как условно благоприятный фон. Резкий всплеск, который наблюдается в 23:00 носит локальный характер, что не

приводит к устойчивому ухудшению качества воздуха. Понижение температуры и изменение радиационного баланса обуславливает увеличение уровня влажности в ночное время. Как установили R. Jayaratne и соавт., «при относительной влажности выше определённого порога показания оптических датчиков частиц заметно завышаются из-за гигроскопического роста аэрозоля» [158]. В случае нашего эксперимента увеличение уровня влажности не привело к значимому увеличению концентрации PM2.5. Концентрации PM2.5 за рассматриваемый период находятся на стабильно низком уровне, что указывает на отсутствие значимых источников выбросов и эффективной работе механизмов естественного рассеивания загрязнений. Результаты проведенного эксперимента могут быть эталонной моделью при последующем сравнительном анализе изменений концентрации PM2.5 в условиях поступления пылевых масс, что имеет принципиальное значение для оценки вклада трансграничного переноса аэрозолей в формирование качества воздуха региона.

На графике представленной на рисунке 2.8 наглядно отражено резкое ухудшение качества атмосферного воздуха при внешнем пылевом переносе, что выражается повышенными концентрациями мелкодисперсных частиц PM2.5.

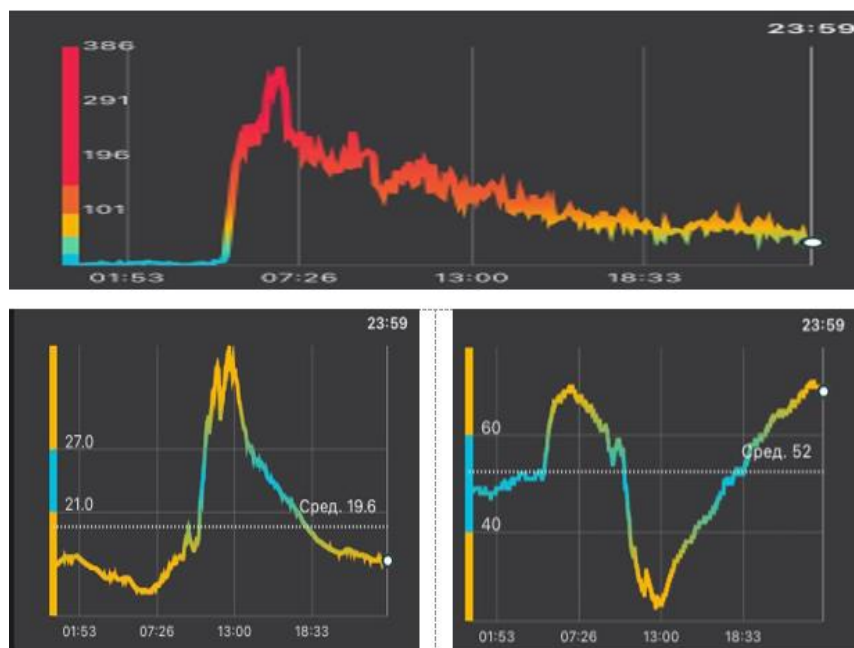


Рисунок 2.8. – Последствия пылевого вторжения на состояние качества атмосферного воздуха, мкг/м³

Резкий рост концентраций согласуется с данными о том, что «трансграничный перенос пылевых аэрозолей способен многократно повышать фоновые концентрации мелкодисперсных частиц» [115]. В ходе суточного наблюдения в период пылевого вторжения были зафиксированы высокие значения $PM_{2.5}$, которые варьируются в пределах 200–300 $мкг/м^3$ достигая пиковых значений 300–350 $мкг/м^3$. Как показывают Р. Ginoux и соавт., «перенос минеральной пыли из аридных источников способен существенно повышать фоновые концентрации частиц на удалённых территориях» [120]. Суточная динамика остается повышенной, которая выражается высоким средним значением 85,4 $мкг/м^3$. Как отмечают Х. Zhang и соавт., «суточный ход концентраций мелкодисперсных частиц в городе определяется совместным действием интенсивности выбросов и метеорологических условий» [163]. До пылевого вторжения среднее значение концентрации $PM_{2.5}$ составляла 10,2 $мкг/м^3$. Поступление значительного объема пылевых частиц в приземный слой атмосферы обусловило увеличение среднего уровня загрязнения более чем в восемь раз, что не может быть объяснено только обычными городскими выбросами и кратковременной локальной антропогенной активностью. Увеличение влажности частично повлияло на процессы агрегации и осаждения аэрозоля. Можно сделать вывод, что внешний перенос пылевых масс выступает доминирующим фактором формирования качества воздуха, что выражается резким нарушением обычного режима, которая проявляется в экстремальном росте загрязнения. Подобные явление обосновывают необходимость оперативного мониторинга, раннего предупреждения и построения прогностических моделей, которые учитывают трансграничный и региональный перенос пылевых аэрозолей. Региональная обусловленность подобных эпизодов подтверждается выводом S. F. Abdullaev и I. N. Sokolik о том, что «пылевые вторжения в Таджикистане носят регулярный характер и существенно изменяют радиационный баланс и качество воздуха» [164].

Представленные результаты (рисунок 2.9) отражают состояние качества воздуха в условиях ясной погоды. Наблюдение охватывает вечерний период,

приблизительно с 19:20 до 23:30, когда после дневного прогрева начинается охлаждение приземного слоя атмосферы и меняются условия рассеивания загрязняющих веществ.



Рисунок 2.9. – Динамика концентрации PM2.5 в условиях ясной погоды (вечер), мкг/м³

По вышеприведенным графику концентрации PM2.5 видно, что загрязнение в течение эксперимента носило неравномерный характер. Среднее значение составляет около 37,7 мкг/м³, что указывает на умеренно повышенный уровень содержания мелкодисперсных частиц в воздухе. В начале наблюдений концентрация находилась примерно в диапазоне 25–40 мкг/м³, однако затем были зафиксированы два выраженных кратковременных пика: первый – около 20:10, второй – приблизительно в районе 21:00. В эти моменты концентрация PM2.5 достигала порядка 80–90 мкг/м³. После 21:50 наблюдается заметное снижение уровня загрязнения, и основная часть значений переходит в диапазон 15–25 мкг/м³. К концу периода фиксируется еще один менее продолжительный всплеск, после чего концентрация вновь снижается. При снижении температуры воздух приближается к состоянию насыщения водяным паром. Высокая влажность способствует изменению физических свойств аэрозольных частиц, их укрупнению и более активному удержанию в приземном слое, особенно при слабом ветре и устойчивой стратификации атмосферы. Вечернее охлаждение при ясной погоде способствует ослаблению вертикального перемешивания

воздуха, что в результате приводит к тому, что загрязняющие вещества хуже рассеиваются и могут временно накапливаться у поверхности земли.

Кратковременные пики $PM_{2.5}$, вероятно, связаны с локальными эпизодами поступления частиц: проезд транспорта, бытовое сжигание, пыль с поверхности дорог и другие кратковременные источники. При этом повышенная влажность и снижение температуры создают условия, при которых аэрозольные частицы дольше сохраняются в приземном слое атмосферы. Проведенный эксперимент показывает, что даже при визуально ясной погоде качество воздуха не всегда является благоприятным. Средняя концентрация $PM_{2.5}$ на уровне $37,7 \text{ мкг/м}^3$ свидетельствует о наличии заметной аэрозольной нагрузки. Для диссертационного анализа данный результат важен тем, что он подтверждает: оценка загрязнения воздуха не должна основываться только на визуальном восприятии погодных условий. Даже при отсутствии пылевого вторжения, осадков или тумана возможны кратковременные и значимые повышения концентрации $PM_{2.5}$, обусловленные сочетанием локальных источников и вечерней устойчивости атмосферы. Значимость невыхлопных источников в подобных эпизодах отмечают F. Amato и соавт., подчёркивая, что «невыхлопные выбросы транспорта становятся доминирующим источником частиц по мере ужесточения норм на выхлоп» [165].

Представленный график (рисунок 2.10) отражает состояние качества воздуха на следующий день наблюдений и позволяют проследить, как изменились концентрации $PM_{2.5}$. В целом картина показывает более благоприятное состояние атмосферного воздуха. Так, средняя концентрация $PM_{2.5}$ составила около $16,2 \text{ мкг/м}^3$, что значительно ниже показателя предыдущего наблюдения ($37,7 \text{ мкг/м}^3$).

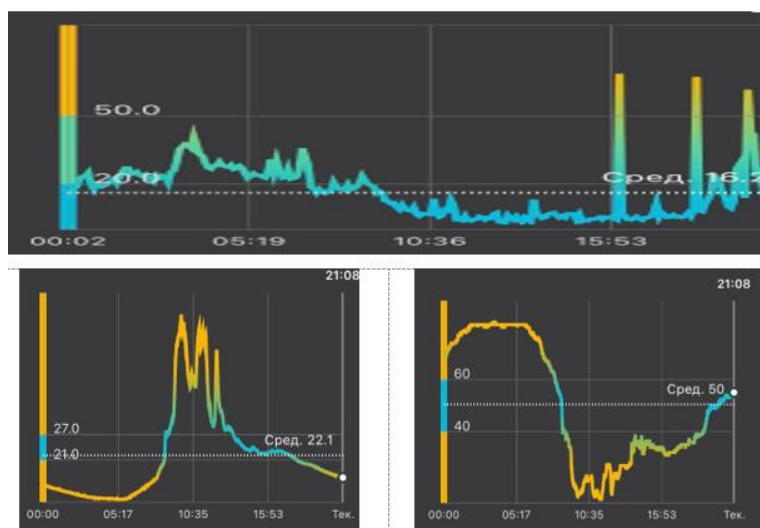


Рисунок 2.10. – Динамика концентрации PM2.5 в условиях ясной погоды (ночь-утро-день), мкг/м³

Согласно представленному графику, значение концентрации PM2.5 в ночные и ранние утренние часы находились преимущественно в диапазоне 15–30 мкг/м³, с отдельным повышением примерно до 40–45 мкг/м³. В первой половине дня наблюдается резкое снижения уровня PM2.5, который находится в диапазоне 5–15 мкг/м³, что указывает на улучшение качества воздуха и более эффективное рассеивание аэрозольных частиц. Кратковременные пики, которые наблюдаются во второй половине дня носят эпизодический характер и не формируют длительного загрязнения, что в основном связано с проездом транспорта, поднятием дорожной пыли, кратковременным дымовым эпизодом и изменением направления ветра. Усиление турбулентного перемешивания приземного слоя связано со снижением уровня влажности и роста температуры, что является следствием быстрого рассеивания взвешенных частиц. Именно поэтому во второй половине дня концентрация PM2.5 удерживалась на низком уровне, несмотря на наличие отдельных кратковременных пиков. Следующий день характеризуется более устойчивым и благоприятным состоянием атмосферного воздуха по сравнению с предыдущим наблюдением. Средняя концентрация PM2.5 снизилась более чем в два раза – с 37,7 до 16,2 мкг/м³, что свидетельствует о том, что эпизод повышенного загрязнения в ясную погоду не имел продолжительного характера, а при изменении температурно-

влажностного режима и усилении атмосферного перемешивания произошло заметное самоочищение приземного слоя воздуха.

2.4 Статистический анализ многолетнего временного ряда концентраций PM2.5

Для экспериментального анализа был сформирован временной ряд среднесуточных концентраций PM2.5. Исходный массив данных включал 2269 наблюдений за период с 25 июня 2019 г. по 14 марта 2026 г. Структура набора данных включала поле даты и значение концентрации PM2.5 в мкг/м³. Для выполнения сезонной декомпозиции дополнительно был сформирован непрерывный ежедневный ряд протяженностью 2455 дней. Отсутствующие календарные даты были восстановлены методом интерполяции (рисунок 2.11).

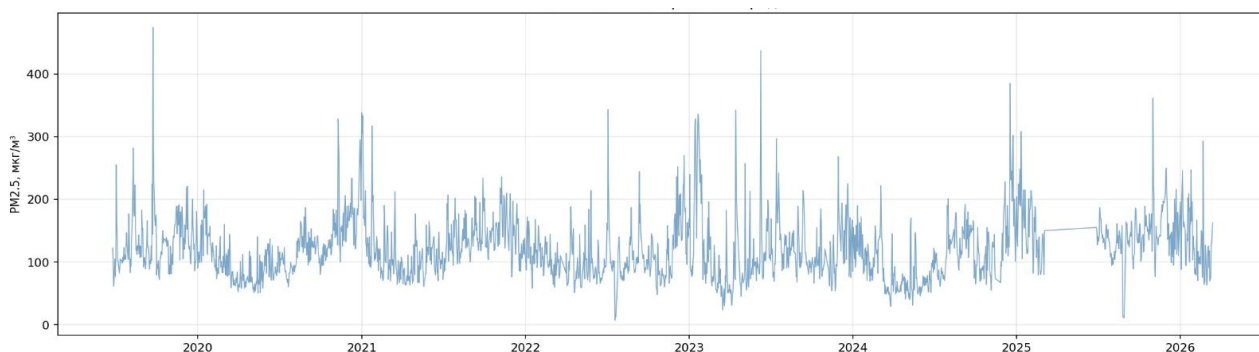


Рисунок 2.11. – Полный временной ряд PM2.5, мкг/м³

Для декомпозиционного анализа использован фрагмент ряда за последние 1095 дней, которые охватывают период с 16 марта 2023 г. по 14 марта 2026 г, что позволило обеспечить сопоставимость временных интервалов и выделить сезонную, трендовую и остаточную компоненты ряда (рисунок 2.12).

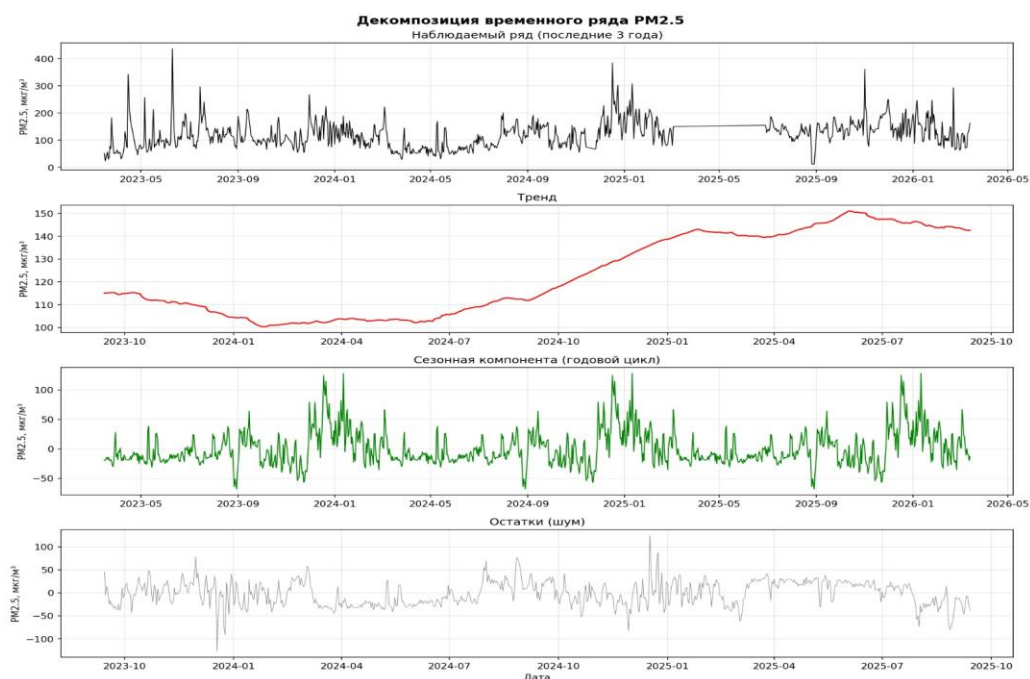


Рисунок 2.12. – Декомпозиция временного ряда $PM_{2.5}$, $\text{мкг}/\text{м}^3$

Средняя концентрация $PM_{2.5}$ за исследуемый период составила $120,9 \text{ мкг}/\text{м}^3$, что значительно превышает ориентировочные значения, которые рекомендованы ВОЗ. Медианное значение равное $113,0 \text{ мкг}/\text{м}^3$ указывает не только на влияние единичных экстремальных эпизодов, но и на устойчиво повышенный фон загрязнения (рисунок 2.13).

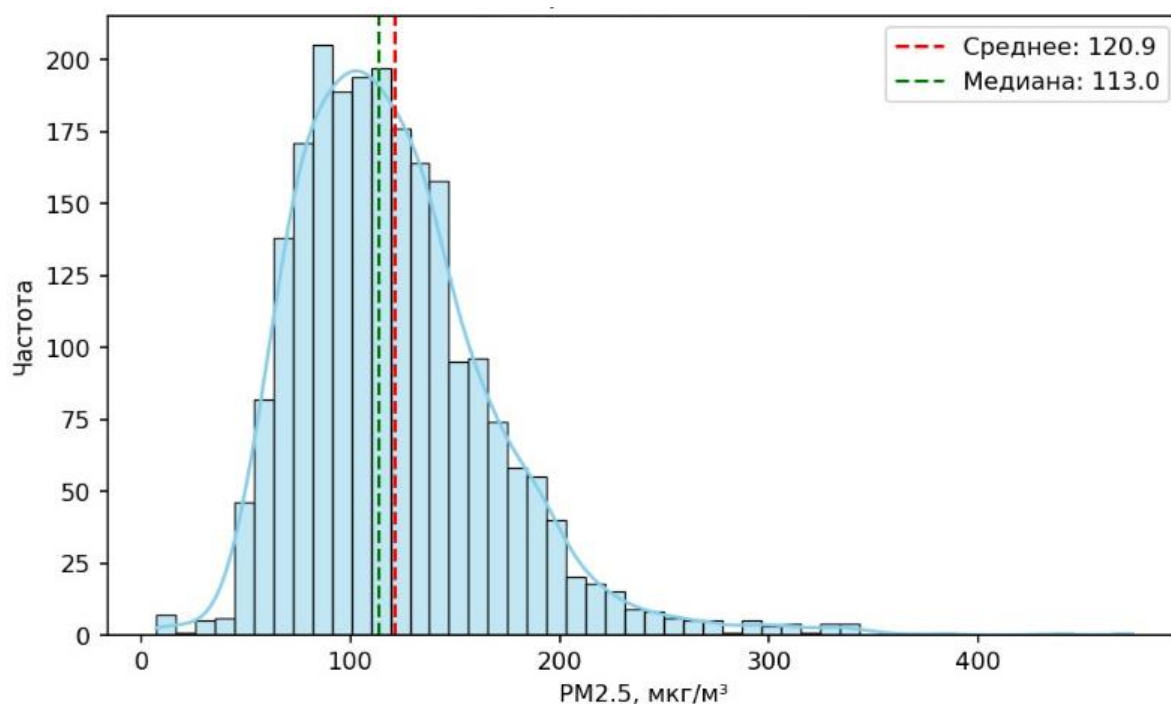


Рисунок 2.13. – Распределение $PM_{2.5}$, $\text{мкг}/\text{м}^3$

Общая характеристика исходного массива приведена в таблице 2.6.

Таблица 2.6. – Общая характеристика исходного массива данных

Показатель	Значение
Период наблюдений	25.06.2019 – 14.03.2026
Количество наблюдений	2269
Количество исходных пропусков	0
Среднее значение PM2.5	120,9 мкг/м³
Стандартное отклонение	48,3 мкг/м³
Медиана	113,0 мкг/м³
Минимальное значение	7,0 мкг/м³
Максимальное значение	474,0 мкг/м³
Коэффициент вариации	0,399
Асимметрия	1,397
Экссесс	4,318

Превышение среднего значения над медианным указывает на наличие правосторонней асимметрии, то есть на присутствие отдельных дней с чрезвычайно высокими концентрациями, которые смещают среднее значение вверх. Значение эксцесса, равное 4,318, свидетельствует о «тяжёлых хвостах» распределения и повышенной вероятности появления выбросов по сравнению с нормальным распределением. Наличие выбросов определялось методом межквартильного размаха IQR (2.1). Границы выбросов рассчитывались на основе первого и третьего квартилей (2.2, 2.3):

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (2.1)$$

$$X_{lower} = Q_1 - 1,5 \cdot IQR \quad (2.2)$$

$$X_{upper} = Q_3 + 1,5 \cdot IQR \quad (2.3)$$

где Q_1 – первый квартиль, Q_3 – третий квартиль, IQR – межквартильный размах, X_{lower} и X_{upper} – нижняя и верхняя границы нормального диапазона значений.

По методу IQR был выявлен 61 выброс, что составляет 2,69 % от общего числа наблюдений. Для экологических временных рядов наличие таких выбросов является ожидаемым, т.к. качество воздуха может резко ухудшаться

под влиянием пыльных бурь, температурных инверсий, отопительного сезона, локальных промышленных выбросов, пожаров, неблагоприятных метеорологических условий или ошибок измерения. Методической основой такого критерия служит подход J. W. Tukey, предложившего определять аномальные значения «по границам, отстоящим от квартилей на полтора межквартильных размаха» [166].

Для анализа временной зависимости были рассчитаны автокорреляционная функция ACF и частная автокорреляционная функция PACF. Стационарность временного ряда проверялась с помощью расширенного теста Дики – Фуллера. Дополнительно была выполнена декомпозиция временного ряда с выделением трендовой, сезонной и остаточной составляющих, что позволило определить, какая часть вариации концентраций PM_{2.5} обусловлена сезонностью, долгосрочным трендом и нерегулярными факторами.

Тест на нормальность дал значение $p = 2,2449 \times 10^{-144}$, что практически равно нулю. Следовательно, гипотеза о нормальности распределения отвергается. Данный результат имеет важное методологическое значение, т.е. при дальнейшем моделировании временного ряда нежелательно ограничиваться методами, которые предполагают нормальность распределения. В этом случае наиболее целесообразным является применение моделей временных рядов, методов машинного обучения и преобразований данных при необходимости. Использованный критерий восходит к работе S. S. Shapiro и M. B. Wilk, предложивших статистику, которая «проверяет согласие выборки с нормальным законом на основе порядковых статистик» [167].

Анализ временного ряда показал, что концентрации PM_{2.5} изменяются не случайным образом, а имеют выраженную сезонную структуру. Наиболее высокие значения наблюдаются преимущественно в осенне-зимний период, тогда как относительно более низкие концентрации фиксируются весной. Распределение среднемесячных значений PM_{2.5} приведены на рисунке 2.14.

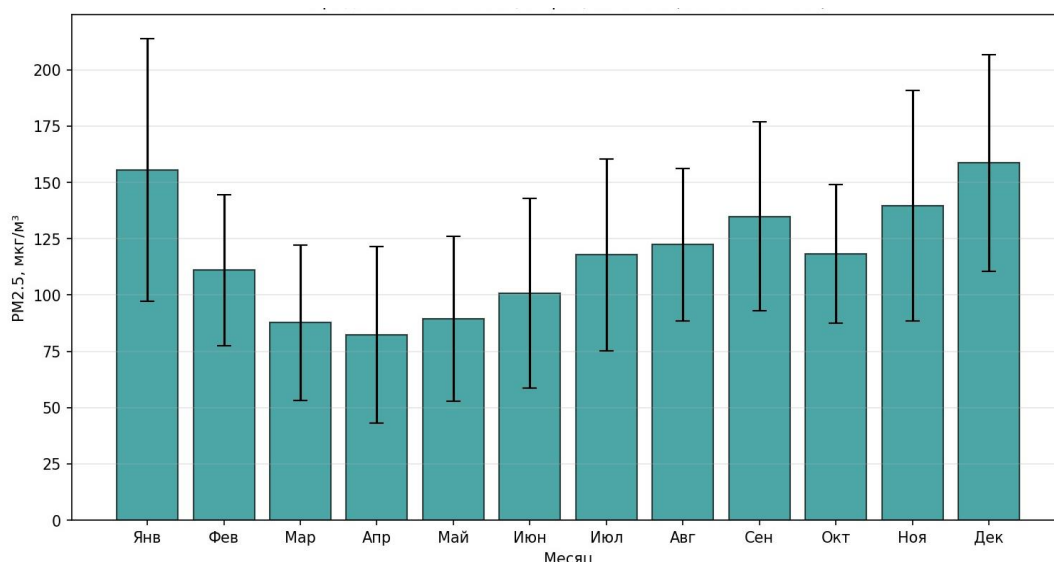


Рисунок 2.14. – Среднемесячные значения PM2.5, мкг/м³

Минимальные концентрации наблюдались в апреле – 82,3 мкг/м³, марте – 87,7 мкг/м³ и мае – 89,5 мкг/м³. Наиболее загрязненными месяцами оказались декабрь – 158,7 мкг/м³, январь – 155,6 мкг/м³ и ноябрь – 139,5 мкг/м³. Разница между декабрем и апрелем составляет 76,4 мкг/м³, что указывает на двукратное сезонное увеличение загрязнения. Такая картина характерна для городских территорий, где в холодный период возрастает вклад отопления, усиливается накопление аэрозолей в приземном слое атмосферы, чаще формируются температурные инверсии и снижается интенсивность вертикального перемешивания воздуха. По данным J. Wallace и P. Kanaroglou, «температурные инверсии ограничивают высоту перемешивания и приводят к накоплению загрязнителей у поверхности» [168]. Весеннее снижение концентраций связано с усилением ветровой активности, увеличением повторяемости осадков, улучшением атмосферного перемешивания и уменьшением отопительной нагрузки.

Оценка линейного тренда показала слабую положительную динамику концентраций PM2.5, равную приблизительно +0,82 мкг/м³ в год, что указывает на медленное ухудшение качества атмосферного воздуха в течение исследуемого периода (рисунок 2.15).

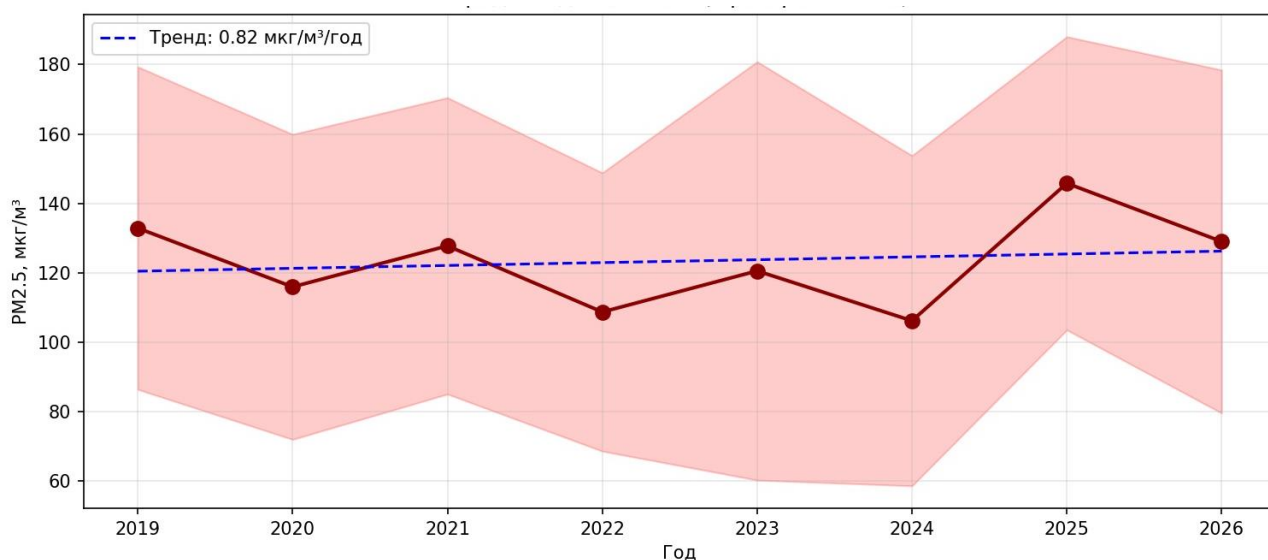


Рисунок 2.15. – Линейный тренд динамики концентраций PM2.5, мкг/м³

Общее изменение за период является относительно небольшим по сравнению с между годовыми колебаниями, что свидетельствует о доминирующей роли сезонных и эпизодических факторов над плавной долгосрочной тенденцией. Для проверки устойчивости подобных выводов применяется непараметрический критерий Н. В. Манн, согласно которому «наличие монотонного тренда может быть установлено без предположений о виде распределения» [169].

По годам наблюдалась выраженная изменчивость: 2019 г. – около 120 мкг/м³, 2020 г. – 119 мкг/м³, 2021 г. – 125 мкг/м³, 2022 г. – 110 мкг/м³, 2023 г. – 121 мкг/м³, 2024 г. – 108 мкг/м³, 2025 г. – 146 мкг/м³, 2026 г. – около 130 мкг/м³. Наиболее заметным является резкое увеличение среднегодовой концентрации в 2025 г., что может быть связано с сочетанием неблагоприятных метеорологических условий, усилением локальных источников выбросов либо эпизодическими загрязнениями природного или антропогенного происхождения. Устойчивого улучшения качества атмосферного воздуха по данным наблюдений не выявлено. Напротив, фиксируется слабая тенденция к росту концентраций, на фоне которой отдельные годы демонстрируют значительные отклонения.

Для оценки зависимости текущих концентраций PM2.5 от предыдущих значений были рассчитаны коэффициенты автокорреляции, которые приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7. – Коэффициенты автокорреляции

Лаг	Коэффициент автокорреляции
1 день	0,727
2 дня	0,562
3 дня	0,480
7 дней	0,351
14 дней	0,281
30 дней	0,210

Наиболее высокая автокорреляция наблюдается на лаге 1 дня, который составляет $ACF(1) = 0,727$, что означает, что уровень PM2.5 в текущий день сильно связан с уровнем предыдущего дня, т.е. загрязнение имеет инерционный характер и, как правило, сохраняется в атмосфере в течение нескольких суток. Методической основой такого анализа служит классический подход G. Вох и G. Jenkins, согласно которому «автокорреляционная и частная автокорреляционная функции служат основой идентификации модели временного ряда» [170]. Значение автокорреляции на лаге 7 дней, равное 0,351 указывает на наличие недельной структуры, которая связана с режимом городской активности, транспортной нагрузкой, промышленными циклами и повторяемостью метеорологических условий (рисунок 2.16).

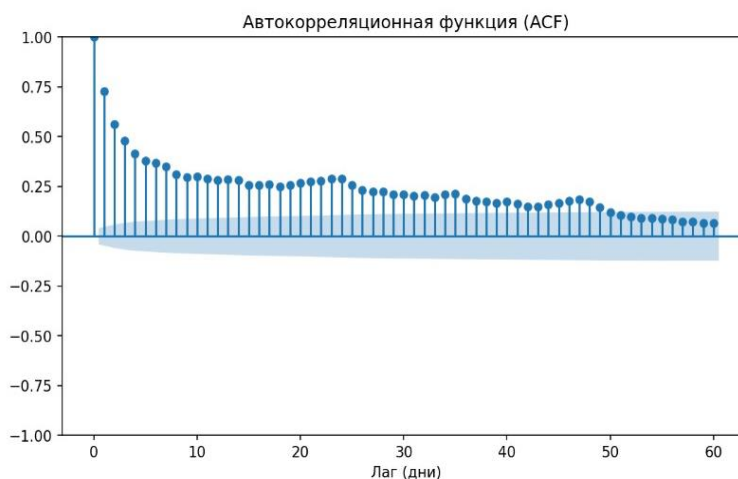


Рисунок 2.16. – Автокорреляционная функция

Частная автокорреляционная функция резко снижается после первого лага, что позволяет предположить наличие авторегрессионной структуры низкого порядка (рисунок 2.17).

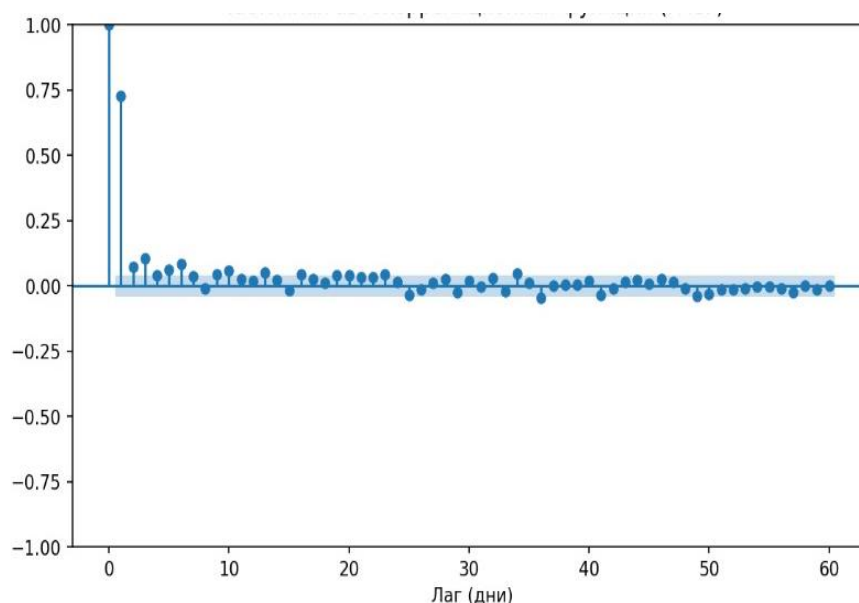


Рисунок 2.17. – Частная автокорреляционная функция

С практической точки зрения это означает, что временной ряд PM2.5 хорошо подходит для построения краткосрочных прогнозов на горизонте от 1 до 7 дней с использованием моделей ARIMA/SARIMA, Prophet, XGBoost и гибридных моделей машинного обучения с лаговыми признаками. Стационарность временного ряда была проверена с использованием расширенного теста Дики – Фуллера в результате которого были получены значения $ADF = -4,996869$ и $p = 0,000023$. Как показано D. A. Dickey и W. A. Fuller, «проверка единичного корня позволяет установить стационарность временного ряда» [171], что является необходимым условием применения классических моделей прогнозирования. Дополняющий критерий предложен D. Kwiatkowski и соавт., у которых «нулевой гипотезой выступает стационарность ряда, что позволяет перепроверить результат теста на единичный корень» [172].

Значение p -value ниже уровня значимости 0,05, поэтому нулевая гипотеза о наличии единичного корня отвергается. Следовательно, временной ряд PM2.5 рассматриваться как стационарный, что означает устойчивость во времени основные статистические характеристики, включая среднее значение,

дисперсию и структуру зависимости. Стационарные ряды лучше поддаются моделированию классическими методами анализа временных рядов.

Для выявления внутренних компонентов временного ряда была выполнена декомпозиция с выделением трендовой, сезонной и остаточной составляющих. Согласно R. Cleveland и соавт., «сезонно-трендовая декомпозиция позволяет устойчиво разделять ряд на тренд, сезонную и остаточную составляющие» [173]. Результаты показали, что наибольшую долю вариации объясняет сезонная компонента (таблица 2.8).

Таблица 2.8. – Доля объясненной дисперсии компонент, %

Компонента	Доля объясненной дисперсии
Тренд	13,2 %
Сезонность	37,3 %
Остаточная компонента	31,2 %

Полученные результаты подтверждают, что сезонность является главным фактором изменения концентраций PM_{2.5}. На её долю приходится 37,3 % дисперсии временного ряда, что говорит о том, что значительная часть колебаний качества воздуха может быть объяснена временем года и связанными с ним метеорологическими и антропогенными условиями. Преобладание сезонной компоненты согласуется с представлением о том, что «разложение ряда на тренд, сезонность и остаток выявляет доминирующие факторы изменчивости» [170].

Трендовая компонента объясняет 13,2 % дисперсии, что указывает на наличие долгосрочных изменений, однако их влияние существенно ниже сезонного фактора. Остаточная компонента составляет 31,2%, что свидетельствует о значительном вкладе нерегулярных факторов в виде пылевых вторжений, пожаров, кратковременных метеорологических аномалий, локальных выбросов, изменения направления ветра, температурных инверсий и других событий, не описываемых только сезонным циклом.

Результаты декомпозиции подтверждают необходимость построения многофакторной системы экологического мониторинга в которой должны

учитываться не только концентрации загрязняющих веществ, но и метеорологические параметры, календарные признаки, сезонность, лаговые значения и аномальные события.

Дополнительно были выделены аномальные дни, значения которых превышали порог 3σ . Всего выявлено 33 экстремальных дня, что составляет 1,45% от общего числа наблюдений. Наиболее загрязненным днём за весь период наблюдений стало 23 сентября 2019 г., когда концентрация PM_{2.5} достигла 474 мкг/м³. Также к числу наиболее загрязненных дней относятся 10 июня 2023 г. – 437 мкг/м³, 17 декабря 2024 г. – 385 мкг/м³ и 1 ноября 2025 г. – 361 мкг/м³ (таблица 2.9).

Таблица 2.9. – Максимально зафиксированные значения PM_{2.5}, мкг/м³

№	Дата	PM _{2.5} , мкг/м ³
1.	23.09.2019	474,0
2.	10.06.2023	437,0
3.	17.12.2024	385,0
4.	01.11.2025	361,0
5.	04.07.2022	343,0
6.	15.04.2023	342,0
7.	01.01.2021	338,0
8.	21.01.2023	336,0
9.	03.01.2021	333,0
10.	22.01.2023	332,0

Наиболее чистый день зафиксирован 20 июля 2022 г., когда концентрация PM_{2.5} составила 7 мкг/м³. Низкие значения наблюдались и в августе 2025 г., когда несколько дней подряд концентрации находились в диапазоне 11–13 мкг/м³.

Размах значений от 7 до 474 мкг/м³ показывает чрезвычайно высокую изменчивость качества атмосферного воздуха. Наличие таких контрастных эпизодов подтверждает, что система мониторинга должна быть ориентирована не только на расчет средних значений, но и на своевременное обнаружение резких ухудшений качества воздуха. Общие принципы построения таких моделей систематизированы R. J. Hyndman и G. Athanasopoulos, отмечающими, что «выбор модели прогнозирования должен опираться на оценку ошибки на отложенной во времени выборке» [174].

Проведенный анализ временного ряда PM2.5 позволил установить ряд важных закономерностей:

1. средний уровень загрязнения атмосферного воздуха является стабильно высоким, что указывает на устойчивое превышение безопасных ориентировочных уровней и подтверждает актуальность совершенствования системы экологического мониторинга;
2. распределение PM2.5 является ненормальным, правосторонне асимметричным и характеризуется тяжёлыми хвостами, т.е. в ряду присутствует значительное число экстремальных эпизодов загрязнения, которые существенно влияют на средние показатели и повышают экологические риски;
3. выявлена выраженная сезонность, т.е. сезонная компонента объясняет 37,3% дисперсии, что является главным фактором изменения концентрации PM2.5;
4. сильная автокорреляция временного ряда подтверждает инерционный характер загрязнения, т.е. текущий уровень PM2.5 во многом зависит от значений предыдущих дней, что создает методологическую основу для построения краткосрочных прогнозных моделей;
5. тест Дики – Фуллера показал стационарность ряда, что повышает его пригодность для применения моделей временных рядов.

Выводы по второй главе

- Обоснован выбор оптического датчика твёрдых частиц SPS30, работающего на принципе лазерного рассеяния, в качестве средства мониторинга концентраций PM2.5.

- Показано, что подобные малогабаритные сенсоры не заменяют государственные станции наблюдения, но являются экономически эффективным решением при построении распределенных сетей в условиях ограниченного финансирования.

- По результатам натурных экспериментов установлена выраженная суточная динамика концентраций PM_{2.5} в городской среде (среднее около 49,4 мкг/м³) и стабильно низкий уровень загрязнения в воздушном бассейне реки Варзоб (около 8,8 мкг/м³). Эксперименты в период пылевого вторжения показали увеличение среднего уровня загрязнения более чем в восемь раз, что подтверждает доминирующую роль трансграничного и регионального переноса пылевых аэрозолей.

- Оценка эффективности датчика по критериям Агентства по охране окружающей среды США показала, что наиболее достоверные результаты достигаются при среднечасовом усреднении данных ($R^2 = 0,86$; RMSE = 3,38 мкг/м³), а учёт относительной влажности в калибровочной модели дополнительно повышает точность ($R^2 = 0,88$; RMSE = 3,05 мкг/м³). Датчик применим как вспомогательное измерительное средство при условии корректной обработки, усреднения и периодической поверки.

- Статистический анализ временного ряда из 2269 наблюдений показал стабильно высокий уровень загрязнения (среднее 120,9 мкг/м³ при медиане 113,0 мкг/м³), значительно превышающий рекомендации ВОЗ. Распределение признано ненормальным, правосторонне асимметричным, с тяжелыми хвостами; методом межквартильного размаха выявлен 61 выброс (2,69 %).

- Установлено, что наибольшую долю дисперсии концентраций объясняет сезонная компонента (37,3 %) с максимумами в декабре, январе и ноябре. Сильная автокорреляция ($ACF(1) = 0,727$) подтверждает инерционный характер загрязнения, а расширенный тест Дики–Фуллера – стационарность ряда, что создаёт методологическую основу для построения краткосрочных прогнозных моделей.

Полученные результаты обосновывают необходимость включения в проектируемую систему модулей статистического анализа, сезонной оценки, обнаружения аномалий и прогнозирования концентраций загрязняющих веществ.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА АРХИТЕКТУРЫ И ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В УСЛОВИЯХ ГОРОДА ДУШАНБЕ

3.1 Архитектурная модель распределённой системы мониторинга качества атмосферного воздуха

Выбор архитектуры опирается на положение L. Atzori и соавт. о том, что «Интернет вещей объединяет разнородные устройства в единую сеть сбора и передачи данных» [175]. Следуя трендам четвертой промышленной революции при построении системы экологического мониторинга атмосферного воздуха в рамках настоящего исследования предлагается скомпоновать технологию интернета вещей для обеспечения сбора и передачи данных в режиме реального времени, блокчейн технологию для достижения максимальной прозрачности собираемых данных и технологии машинного обучения для точного прогнозирования уровня загрязнений атмосферного воздуха. Т.е. предлагается создать информационную систему, которая сочетает в себе и традиционные технологии и новейшие технологии Индустрии 4.0. Принципы построения автоматизированных систем экологического мониторинга разработаны Г. В. Авериним, по определению которого такие системы «обеспечивают непрерывный сбор, обработку и анализ данных о состоянии окружающей среды» [144]. Общие принципы построения таких решений формализованы L. Bass, P. Clements и R. Kazman, по определению которых «архитектура системы есть совокупность структур, включающих элементы, их свойства и отношения между ними» [176].

В рамках диссертационного исследования была разработана архитектурная модель, которая представляет собой комплексную распределенную информационную систему мониторинга качества атмосферного воздуха (РИСМКАВ). РИСМКАВ реализует полный цикл обработки экологических данных. Цикл начинается от сбора измерений до

автоматизированного реагирования на события, которые связаны с превышением нормативных показателей загрязнения. Схематичное представление архитектуры РИСМКАВ представлена на рисунок 3.1.

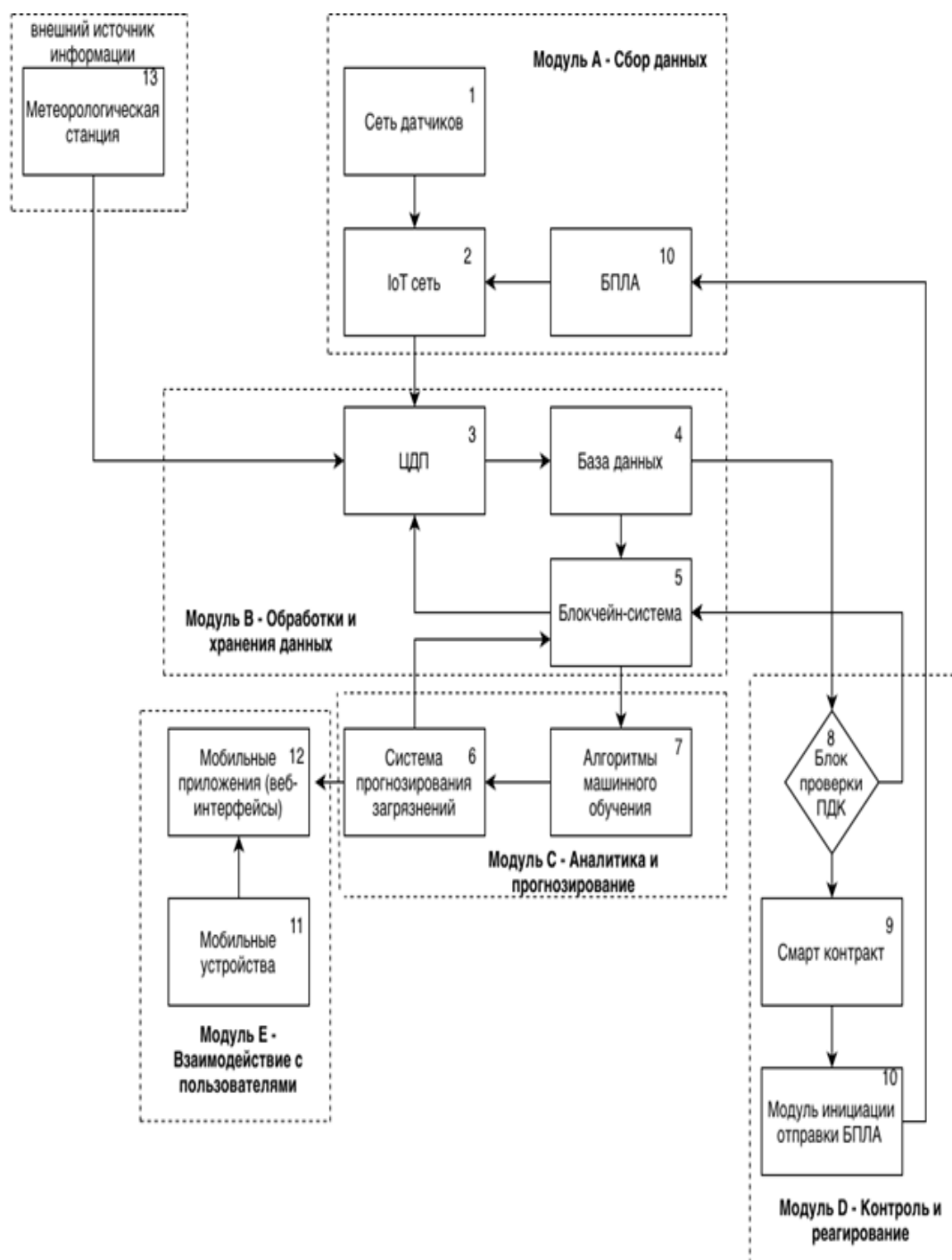


Рисунок 3.1. – Архитектура РИСМКАВ

В основе разработанной выше архитектуры информационной системы лежит концепция киберфизической системы (Cyber-Physical System), где интегрированы физические сенсорные устройства, вычислительные платформы и интеллектуальные алгоритмы анализа данных. Как отмечают Е. А. Lee,

«киберфизические системы интегрируют вычисления, сети и физические процессы в единый контур управления» [177], что соответствует принципу непрерывного адаптивного мониторинга. Благодаря такой архитектуре в полной мере реализуется принцип непрерывного мониторинг состояния качества атмосферного воздуха в городской инфраструктуре и реализуется адаптивное управление измерительными ресурсами на основе анализа текущей экологической ситуации. Структурно система организована по модульному принципу для обеспечения возможности дальнейшего масштабирования. В модель включены 5 функциональных модулей, которые обеспечивают последовательную обработку данных.

Каждый модуль представлен определенными структурными компонентами. Так, модуль сбора данных (А) состоит из сети датчиков (стационарных, мобильных и специализированных датчиков, установленных на БПЛА) объединенных сетью Интернета вещей (IoT-сеть), которые фиксируют концентрации загрязняющих веществ (PM2.5, PM10, CO, NO₂, SO₂, O₃ и др.), модуль обработки и хранения данных (В) содержит центральный диспетчерский пункт принимающий данные от модуля А, базу данных, где имеется возможность долгосрочного хранения параметров качества атмосферного воздуха, блокчейн-систему за счет которого обеспечивается децентрализованное хранение данных с защитой от подделок и фиксацией временных меток, модуль аналитики и прогнозирования (С) состоит из системы прогнозирования работающая на алгоритмах машинного обучения, модуль контроля и реагирования (D) имеет блок проверки ПДК, смарт-контракт, который предназначен для инициации автоматической отправки БПЛА для детализированного анализа местности с превышенными ПДК загрязняющих веществ, модуль взаимодействия с пользователями (Е) представленная веб-приложением функционирующем на мобильных устройствах и персональных компьютерах. Как определяют J. Gubbi и соавт., «Интернет вещей представляет собой сеть взаимосвязанных устройств, совместно собирающих и обрабатывающих данные об окружающей среде» [178]. Применимость такой

организации к городской среде обоснована А. Zanella и соавт., отмечающими, что «архитектура Интернета вещей для умного города должна объединять разнородные устройства и сервисы в единую платформу» [179].

Предлагаемая система экологического мониторинга качества атмосферного воздуха следующим образом.

Все элементы подключены к сети Интернета вещей (IoT) (2), которая обеспечивает беспроводную передачу данных в центральный диспетчерский пункт (ЦДП) (3). Система фиксирует концентрации загрязняющих веществ (PM2.5, PM10, CO, NO₂, SO₂, O₃ и др.), а также физико-химические параметры (температура, влажность, давление). Кроме того, модуль получает данные от метеорологической станции (13) для учета погодных условий при моделировании распространения загрязнений. Полученные данные (поток сенсорных и метеорологических данных) из модуля А передаются в модуль В. Данные о концентрации загрязняющих веществ поступают в центральный диспетчерский пункт (3), где выполняется их предварительная обработка (процедура фильтрации шумов, нормализации и агрегации). Долговременное сохранение параметров качества атмосферного воздуха обеспечивается наличием базы данных (4) и для децентрализованного хранения данных с защитой от подделок и фиксацией временных меток используется блокчейн-система, который непосредственно связан с ЦДП (3) и базой данных (4). Целесообразность предварительной обработки данных вблизи источника подтверждается положением W. Shi и соавт. о том, что «граничные вычисления снижают задержку и объём передаваемых данных за счёт обработки вблизи источника» [180].

В модуль С из модуля В поступают обработанные и верифицированные данные для дальнейшего анализа и прогнозирования качества атмосферного воздуха и распространения загрязняющих веществ в атмосфере. Система прогнозирования (6) выполняет краткосрочные и долгосрочные прогнозы изменения качества воздуха, выявляет закономерности и аномалии, определяет вероятность превышения нормативов загрязнений за счет использования

математических моделей и алгоритмов машинного обучения (7). Соответственно, результаты анализа и прогнозирования передаются в модуль D для принятия решений и автоматического реагирования, где за счет блока проверки ПДК (8) осуществляется автоматическое сопоставление фактических и прогнозных данных с нормативными. В случае обнаружении превышений ПДК загрязняющих веществ смарт-контракт (9) реализованный в блокчейн-система инициирует сигнал для автоматической отправки БПЛА (10) с целью детализированного изучения состояния местности с превышенными ПДК, который выполняет построение маршрута полета дронов на основе координат зоны загрязнения, полученных из системы прогнозирования (6). После выполнения облета зоны загрязнения дроны возвращают новые данные, которые поступают обратно в модуль А, замыкая цикл адаптивного мониторинга.

С применением мобильных устройств и персональных компьютеров (11) осуществляется доступ к веб-интерфейсу (приложению) (12), позволяет получать данные о качестве атмосферного воздуха в реальном времени различным категориям пользователей (гражданам, ученым, государственным органам и др. заинтересованным сторонам) с разграничением функциональных возможностей. Данные из модуля Е могут направляться обратно в модуль В (для накопления пользовательских отметок, обратной связи или верификации наблюдений), обеспечивая обучение системы и повышение точности прогнозов.

Система прогнозирования, входящая в модуль аналитики и прогнозирования, выполнена с возможностью использования ансамбля алгоритмов машинного обучения, предназначенных для анализа временной, пространственной и метеорологической изменчивости загрязнения атмосферного воздуха. В качестве входных признаков используются концентрации загрязняющих веществ PM_{2.5}, PM₁₀, CO, NO₂, SO₂, O₃, координаты датчиков, временные признаки, включая час суток, день недели и сезон, а также метеорологические параметры: температура, влажность, атмосферное давление, скорость и направление ветра.

3.2. Алгоритмическое обеспечение системы: прогнозирование, слияние данных, блокчейн-верификация и автоматизированное реагирование

Для краткосрочного прогнозирования концентраций загрязняющих веществ используется комбинация алгоритмов Random Forest Regressor, Gradient Boosting / XGBoost и рекуррентной нейронной сети типа LSTM. Random Forest применяется для устойчивой оценки нелинейных зависимостей между загрязнением и метеорологическими параметрами, Gradient Boosting используется для повышения точности прогноза при наличии сложных взаимодействий между признаками, а LSTM применяется для учета временной памяти и сезонно-суточных колебаний концентраций загрязняющих веществ.

Прогнозное значение концентрации загрязняющего вещества может быть представлено в виде:

$$\hat{C}_i(t + \Delta t) = F(C_i(t), C_i(t - 1), M(t), G, S) \quad (3.1)$$

где, $\hat{C}_i(t + \Delta t)$ – прогнозируемая концентрация i -го загрязняющего вещества на момент времени $t + \Delta t$;

$C_i(t)$, $C_i(t - 1)$ – текущие и предшествующие значения концентрации загрязняющего вещества;

$M(t)$ – вектор метеорологических параметров;

G – пространственные признаки, включающие координаты датчиков и расстояния до источников загрязнения;

S – сезонно-временные признаки;

F – обученная прогнозная модель.

Для повышения достоверности прогнозирования используется ансамблевое объединение результатов нескольких моделей:

$$\hat{C}_{ens} = w_1 \hat{C}_{RF} + w_2 \hat{C}_{GB} + w_3 \hat{C}_{LSTM} \quad (3.2)$$

где $\hat{C}_{RF}$, $\hat{C}_{GB}$, $\hat{C}_{LSTM}$ – прогнозы, полученные соответственно моделями Random Forest, Gradient Boosting и LSTM;

w_1, w_2, w_3 – весовые коэффициенты моделей, определяемые по результатам оценки точности на контрольной выборке.

При этом веса моделей могут адаптивно изменяться в зависимости от текущих условий. Например, при резких изменениях метеорологических параметров больший вес получает модель Gradient Boosting, при устойчивой временной динамике – LSTM, а при неполных или зашумлённых данных – Random Forest, обладающий устойчивостью к выбросам. Повышение точности при сложных взаимодействиях признаков достигается за счёт градиентного бустинга, который J. H. Friedman определяет как «последовательное построение аддитивной модели в направлении антиградиента функции потерь» [181].

Учёт временной памяти реализуется сетью LSTM, способной, по S. Hochreiter и J. Schmidhuber, «преодолевать проблему затухающего градиента и хранить информацию на длительных интервалах» [182].

Устойчивость к выбросам обеспечивается свойствами метода случайного леса, для которого, по L. Breiman, «обобщающая ошибка ансамбля деревьев сходится к пределу с ростом их числа» [183]. Как показали K. Cho и соавт., «управляемые рекуррентные блоки эффективно моделируют последовательности при меньшем числе параметров, чем классические LSTM» [184]. Практическая реализация градиентного бустинга в предлагаемой системе опирается на решение T. Chen и C. Guestrin, показавших, что «масштабируемая система бустинга деревьев обеспечивает высокую точность при существенно меньших вычислительных затратах» [185].

Для выявления аномальных ситуаций используется алгоритм обнаружения выбросов, основанный на сравнении текущих измерений с прогнозным доверительным интервалом:

$$A(t) = \{1, \text{если } |C(t) - \hat{C}(t)| > \lambda\sigma, 0, \text{если } |C(t) - \hat{C}(t)| \leq \lambda\sigma \text{ (3.3.)},$$

где $A(t)$ – индикатор аномалии;

$C(t)$ – фактическое измеренное значение;

$\hat{C}(t)$ – прогнозное значение;

σ – стандартное отклонение ошибки прогноза;

λ – коэффициент чувствительности системы.

Такое построение позволяет системе выявлять не только уже произошедшие превышения ПДК, но и прогнозировать вероятность их возникновения в ближайшем временном интервале. Общая классификация подобных подходов дана V. Chandola, A. Banerjee и V. Kumar, определившими обнаружение аномалий как «выявление образцов, не соответствующих ожидаемому поведению системы» [186].

Для повышения точности мониторинга в системе реализуется алгоритм слияния данных, поступающих от стационарных датчиков, мобильных измерительных устройств, датчиков на БПЛА, метеостанции и пользовательских отметок. Слияние выполняется не простым усреднением, а с учётом достоверности каждого источника, его пространственного положения, времени измерения и технического состояния датчика.

Интегральная оценка концентрации загрязняющего вещества в заданной точке территории определяется по формуле:

$$C_{fused}(x, y, t) = \frac{\sum_{k=1}^n q_k \cdot r_k \cdot C_k(x, y, t)}{\sum_{k=1}^n q_k \cdot r_k} \quad (3.4)$$

где $C_{fused}(x, y, t)$ – объединённая оценка концентрации загрязняющего вещества в точке с координатами x, y в момент времени t ;

$C_k(x, y, t)$ – значение, полученное от k -го источника данных;

q_k – коэффициент качества данных, определяемый по состоянию датчика, частоте пропусков и уровню шума;

r_k – коэффициент пространственно-временной релевантности источника;

n – количество источников данных.

Коэффициент релевантности может определяться с учётом расстояния от датчика до контролируемой зоны и давности измерения:

$$r_k = \exp(-\alpha d_k - \beta \Delta t_k) \quad (3.5)$$

где d_k – расстояние от источника измерения до анализируемой точки; Δt_k – временной интервал между моментом измерения и моментом анализа; α, β – коэффициенты затухания пространственной и временной значимости данных.

Использование коэффициента качества данных и коэффициента пространственно-временной релевантности является существенным отличительным признаком заявляемого решения. Такой способ слияния данных является одним из существенных отличительных признаков системы, поскольку позволяет повысить достоверность оценки качества воздуха даже при неоднородной плотности датчиков, временных задержках передачи данных и наличии локальных выбросов. Методологические основания такого решения обобщены В. Khaleghi и соавт., по определению которых «слияние данных объединяет сведения нескольких источников для формирования единой согласованной картины» [187].

Блокчейн-система в предлагаемом решении реализуется как разрешенная распределённая сеть, в которой узлами могут выступать центральный диспетчерский пункт, сервер экологической службы, сервер промышленного предприятия, научно-исследовательский узел и резервный узел хранения. Применение распределённого реестра опирается на положение S. Nakamoto о том, что «цепочка блоков с хеш-связями обеспечивает защиту записей от незаметного изменения» [188]. В отличие от открытых публичных блокчейнов, такая архитектура обеспечивает контролируемый доступ, высокую скорость обработки транзакций и пригодность для применения в системах экологического мониторинга. По оценке Z. Zheng и соавт., «ключевыми свойствами технологии блокчейн являются децентрализация, неизменяемость и прослеживаемость записей» [189]. Применительно к разрешённым сетям это подтверждают E. Androulaki и соавт., отмечая, что «разрешённый блокчейн обеспечивает идентификацию участников и высокую производительность обработки транзакций» [190].

В блокчейн заносятся не все исходные массивы измерительных данных, а их верификационные записи, включающие:

$$BlockRecord = \{ID_s, T, Geo, H(data), C_i, Status, Sign\} \quad (3.6)$$

где ID_s – идентификатор датчика или измерительного устройства;

T – временная метка измерения;

Geo – координаты источника данных;

$H(data)$ – хэш исходного пакета данных;

C_i – значение концентрации загрязняющего вещества или агрегированный показатель;

$Status$ – статус проверки данных;

$Sign$ – цифровая подпись узла или устройства.

Исходные массивы данных сохраняются в централизованной базе данных, а в блокчейне фиксируются их хэш-образы, временные метки, идентификаторы источников и статусы проверки. Такое гибридное хранение обеспечивает одновременно высокую производительность базы данных и невозможность незаметного изменения экологических измерений после их регистрации.

Проверка целостности данных осуществляется путём повторного вычисления хэша исходного пакета и сравнения его с хэшем, ранее записанным в блокчейн:

$$H(data_{current}) = H(data_{blockchain}) \quad (3.7)$$

Если значения совпадают, данные признаются достоверными и могут использоваться в прогнозной модели. Если значения не совпадают, запись маркируется как недостоверная и исключается из автоматического принятия решений.

Блокчейн-система также обеспечивает хранение событий, связанных с превышением нормативов, запуском смарт-контракта, отправкой БПЛА, получением уточняющих измерений и закрытием инцидента. Это позволяет формировать неизменяемый журнал экологических событий, пригодный для последующего аудита, экспертной проверки и принятия управленческих

решений. Гибридное хранение обеспечивает одновременно высокую производительность системы и невозможность незаметного изменения зарегистрированных экологических измерений.

Смарт-контракт в составе модуля контроля и реагирования представляет собой программно-логический механизм, автоматически выполняющий заданные действия при наступлении заранее определённых условий. Его основная функция заключается в автоматической инициации отправки БПЛА для уточняющего мониторинга зоны загрязнения при выявлении фактического или прогнозируемого превышения нормативных значений. Как отмечают К. Christidis и М. Devetsikiotis, «блокчейн и смарт-контракты позволяют организовать доверенный обмен данными между устройствами Интернета вещей без центрального посредника» [191]. Исходная концепция такого механизма сформулирована N. Szabo, определившим смарт-контракт как «набор обязательств в цифровой форме, включая протоколы их автоматического исполнения» [192].

Условие активации смарт-контракта может быть представлено следующим образом:

$$SC = \{1, \text{если } C_{fused}(t) > PDK_i \text{ или } P(C_i(t + \Delta t) > PDK_i) > \gamma \quad (3.8)$$

$\{0, \text{если условие превышения выполняется,}$

где SC – состояние смарт-контракта;

$C_{fused}(t)$ – объединённая оценка концентрации загрязняющего вещества;

PDK_i – предельно допустимая концентрация i -го загрязняющего вещества;

$P(C_i(t + \Delta t) > PDK_i)$ – прогнозируемая вероятность превышения ПДК в ближайшем интервале времени;

γ – порог вероятности, при достижении которого система инициирует реагирование.

Логика смарт-контракта включает следующие этапы:

1. получение верифицированных данных из базы данных и блокчейн-системы;

2. проверка фактических концентраций загрязняющих веществ на превышение ПДК;
3. проверка прогнозных значений и вероятности будущего превышения;
4. определение координат зоны риска;
5. формирование команды на отправку БПЛА;
6. запись события активации в блокчейн;
7. получение уточненных измерений от БПЛА;
8. повторная запись результатов в базу данных и блокчейн;
9. закрытие события либо повторная активация мониторинга при сохранении риска.

Так, запуск процедуры реагирования осуществляется как при фактическом превышении ПДК, так и при достижении прогнозируемой вероятностью превышения установленного порогового значения. Смарт-контракт выполняет не только функцию фиксации события, но и функцию автоматического запуска процедуры реагирования без участия оператора, что снижает время реакции системы на локальные выбросы и аварийные ситуации.

Одним из уникальных технических решений предлагаемой системы является метод адаптивного управления БПЛА, при котором маршрут полёта формируется не заранее вручную, а автоматически на основе результатов слияния данных, прогноза загрязнения, координат зоны превышения и метеорологических условий. Обоснованность подобного подхода подтверждают А. Al-Fuqaha и соавт., отмечая, что «интеллектуальное управление ресурсами является ключевым условием эффективности приложений Интернета вещей» [193].

Маршрут БПЛА строится с учётом следующих параметров:

$$Route = F(Geo_{risk}, C_{fused}, Wind, Relief, Battery, NoFly) \quad (3.9)$$

где Geo_{risk} – координаты зоны экологического риска;

C_{fused} – объединенная оценка концентрации загрязняющего вещества;

Wind – направление и скорость ветра;

Relief – особенности рельефа и городской застройки;

Battery – текущий заряд аккумулятора БПЛА;

NoFly – ограничения на зоны полёта.

Приоритет обследования территории определяется величиной риска:

$$R(x, y) = a \cdot \frac{C_{fused}(x, y)}{PDK_i} + b \cdot P(C_i(t + \Delta t) > PDK_i) + c \cdot V_{wind} \quad (3.10)$$

где $R(x, y)$ – показатель риска для участка территории;

$C_{fused}(x, y)$ – объединённая концентрация загрязняющего вещества;

PDK_i – нормативное значение;

$P(C_i(t + \Delta t) > PDK_i)$ – вероятность будущего превышения;

V_{wind} – показатель влияния направления и скорости ветра;

a, b, c – весовые коэффициенты.

БПЛА направляется не просто в точку превышения, а в область максимального риска, где возможно развитие загрязнения с учетом направления переноса воздушных масс. При получении новых измерений маршрут может корректироваться в режиме реального времени. Если БПЛА фиксирует увеличение концентрации загрязняющего вещества по направлению ветра, система расширяет зону вылета; если концентрации снижаются, маршрут сокращается, что уменьшает время полёта и расход энергии. Технический эффект данного решения заключается в сокращении времени локализации источника загрязнения, снижении затрат на регулярные ручные облеты и повышении пространственной точности мониторинга без необходимости установки большого количества стационарных постов. Автоматическое построение и коррекция маршрута на основе показателя риска являются существенными признаками изобретения и обеспечивают сокращение времени локализации источников загрязнения и снижение энергозатрат. Методология математического моделирования сложных природно-антропогенных систем восходит к трудам Н. Н. Моисеева, утверждавшего, что «изучение

взаимодействия человека и биосферы невозможно без построения имитационных математических моделей» [194].

Таким образом, предлагаемая система экологического мониторинга атмосферного воздуха промышленного региона обеспечивает комплексное управление информационными потоками и процессами контроля качества воздуха. Она позволяет:

- формировать первичный поток экологических и метеорологических данных с различных сенсорных источников;
- осуществлять фильтрацию, нормализацию и надежное хранение данных как в централизованной базе, так и в распределённой блокчейн-системе;
- проводить всесторонний анализ полученных данных и выявлять закономерности в динамике загрязнений;
- создавать прогнозные модели изменения состояния атмосферного воздуха;
- сопоставлять измеренные и прогнозируемые значения загрязнений с установленными нормативами;
- инициировать автоматическую отправку беспилотных летательных аппаратов для детализированного мониторинга при превышении предельно допустимых концентраций;
- визуализировать результаты мониторинга для различных категорий пользователей;
- обеспечивать информирование населения и заинтересованных сторон о состоянии атмосферного воздуха;
- реализовывать процедуры сбора обратной связи для повышения точности прогнозов и корректировки работы системы.

3.3. Функциональная модель системы: бизнес-процессы, требования и варианты использования

При проектировании особое внимание уделялось бизнес-процессам, так как функционирование интеллектуальной системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха рассматривается как последовательность взаимосвязанных бизнес-процессов, которые формируют замкнутый цикл управления состоянием городской атмосферы. Такой подход соответствует определению М. Hammer и J. Champру, согласно которому «бизнес-процесс есть совокупность действий, преобразующих вход в ценный для потребителя результат» [195]. Выбор нотации UML для проектирования обоснован тем, что, по G. Booch, J. Rumbaugh и I. Jacobson, «UML является стандартным языком визуализации, специфицирования и документирования программных систем» [196]. Для формализации архитектуры системы и определения потоков данных была разработана структурированная модель бизнес-процессов, которая представлена в таблице 3.1. Каждому процессу было присвоено условное обозначение (P1–P4), где определены входные данные и выходные результаты. Современная трактовка такого моделирования дана М. Dumas и соавт., по которым «управление бизнес-процессами есть совокупность методов выявления, моделирования, анализа и совершенствования процессов организации» [197].

Таблица 3.1. – Бизнес-процессы системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха

Условное обозначение	Название бизнес-процесса	Вход	Выход
P1	Мониторинг	планирование измерений (стационарно/мобильно)	поток первичных измерений и метаданные качества
		сбор наблюдений посредством IoT-сети	
		сбор метеоконтекста	

P2	Оценка состояния	фильтрация ошибок/выбросов	оценка риска и выявленные события
		агрегация по времени и пространству	
		расчет индекса AQI	
		сравнение с нормативами (ПДК)	
P3	Прогнозирование	краткосрочный прогноз PM _{2.5} по районам/сетке	прогнозные карты/траектории загрязнения
		оценка неопределенности (confidence/interval)	
		выявление зон риска на горизонте T	
P4	Управляющее воздействие	уведомления	управляющие команды и обновленный план мониторинга
		запрос дополнительных измерений	
		изменение маршрутов/точек)	
		запуск БПЛА для верификации “горячих зон”	

Как отмечают К. Вигерс и Дж. Битти, «качество программной системы

Как отмечают К. Вигерс и Дж. Битти, «качество программной системы во многом определяется полнотой и непротиворечивостью её требований» [198]. В соответствии с описанными бизнес-процессами были выделены основные функциональные (FR) и нефункциональные (NFR) требования к проектируемой системе. Описание функциональных требований приведены в таблица 3.2

Таблица 3.2 – Описание функциональных требований

Название	Условное обозначение	Описание
Сбор данных со стационарных датчиков	FR-01	прием измерений загрязняющих веществ от сети датчиков с привязкой ко времени и координатам/узлу сети

Продолжение таблицы 3.2

Сбор данных со стационарных датчиков	FR-01	прием измерений загрязняющих веществ от сети датчиков с привязкой ко времени и координатам/узлу сети
Сбор данных с мобильных устройств	FR-02	прием данных от портативных устройств (формат “трек/маршрут” с геометкой и временным рядом)
Интеграция данных БПЛА	FR-03	поддержка получения данных измерений с БПЛА (точечные/маршрутные измерения) и хранение метаданных миссии (высота, траектория, время, зона)
Интеграция метеоданных	FR-04	импорт метеоданных от метеостанции (температура, влажность, давление, скорость/направление ветра и др.) и синхронизация этих метаданных по времени и пространству
Централизованн ый прием и первичная обработка (ЦДП)	FR-05	выполнение первичной обработки входящих данных (проверку формата, нормализация единиц, синхронизация времени и привязку к источнику)
Контроль качества данных (QA/QC)	FR-06	выявление и маркирование пропусков, выбросов/аномалий, несоответствие диапазонам, дрейф/неисправность сенсора (по статистическим критериям)
Хранение данных (БД)	FR-07	хранение сырых измерений, очищенных/агрегированных рядов, метаданных источников, событий превышений и прогнозов и результатов моделей
Верификация и неизменяемость (блокчейн-реестр)	FR-08	обеспечение доказуемой целостности измерений путем записи контрольных сумм/хэшей (и/или подписей) в блокчейн-реестр с возможностью аудита
Расчет показателей качества воздуха	FR-09	расчет индекса AQI и сравнение с ПДК для PM _{2.5}
Проверка превышения ПДК	FR-10	автоматическое сравнение измеренных/агрегированных значений с нормативами ПДК и формирование событий “превышения” с указанием времени, места, показателя и уровня риска

Продолжение таблицы 3.2

Механизм событие - смарт-контракт	FR-11	инициация смарт-контракта для фиксации события и запуска регламента реагирования при условии превышений ПДК
Инициация и управление миссией БПЛА	FR-12	формирование команды на отправку БПЛА (зона/маршрут/цель измерения) и сохранение результатов миссии (допускается режим “человек подтверждает”)
Прогнозирование загрязнений	FR-13	прогнозирование концентраций загрязняющих веществ на горизонте Т (например, 1–24 часа) с учетом исторических данных и метеофакторов
Пространственное прогнозирование	FR-14	формирование пространственной оценки/карты загрязнения на основе данных сети и мобильных измерений.
Оценка неопределенности прогноза	FR-15	выдача показателей уверенности (интервал/дисперсия/вероятность превышения порога)
Адаптивное планирование мониторинга	FR-16	автоматическое формирование плана дополнительных измерений (точки/маршрут) на основе текущих превышений, прогноза зон риска и неопределенности модели
Визуализация и отчетность	FR-17	предоставление веб/мобильный интерфейс для просмотра текущих значений и истории, карты загрязнения, событий превышений, прогнозов и выгрузки отчетов
Уведомления	FR-18	отправка уведомления пользователям/оператору при превышении ПДК, росте риска по прогнозу и сбое/неисправности датчика
Управление пользователями и ролями	FR-19	разграничение доступа к данным и функциям
Экспорт данных	FR-20	обеспечение экспорт данных (CSV/JSON) и API-доступа для научного анализа и интеграции

С целью обеспечения бесперебойного пользовательского опыта, надежной стабильности системы и масштабируемости разрабатываемой ИС кроме

функциональных требований были разработаны нефункциональные требования, которые описаны в таблица 3.3.

Таблица 3.3. – Нефункциональные требования

Название	Условное обозначение	Описание
Надежность и устойчивость	NFR-01	сохранение работоспособности при временной потере связи с отдельными датчиками и поддержка буферизации данных
Производительность	NFR-02	обработка потока измерений в квазиреальном времени (задержка от поступления до доступности в системе)
Масштабируемость	NFR-03	поддержка расширения числа источников (датчики/маршруты/БПЛА) без перепроектирования архитектуры
Точность и воспроизводимость	NFR-04	обеспечение воспроизводимости вычислений (агрегации, проверки ПДК, прогнозы) и протоколирование версий моделей/параметров
Безопасность	NFR-05	обеспечение аутентификации и авторизации, журналирование действий, защита каналов передачи (шифрование) и защита от подмены данных (в связке с реестром целостности)
Доступность и удобство	NFR-06	пригодный интерфейс пользователя для использования на мобильных устройствах и возможность работы при нестабильном интернете (частичная офлайн-логика)
Интероперабельность	NFR-07	поддержка стандартных форматов данных и возможности подключения новых сенсоров без переписывания ядра (через адаптеры/коннекторы)

Номенклатура приведенных требований закреплена стандартом ISO/IEC 25010, определяющим качество программной системы через «характеристики функциональной пригодности, производительности, совместимости, удобства

использования, надёжности, защищённости, сопровождаемости и переносимости» [199]. Перед составлением трассировочной таблицы требований, которая необходима для гарантированной реализации описанных требований, тестирования и соответствия бизнес-целям введем несколько условных обозначений модулей схемы, где А – Сбор данных (сенсоры, IoT, БПЛА, В – Обработка и хранение (ЦДП, БД, блокчейн-реестр), С – Аналитика и прогнозирование (ML, прогноз), D – Контроль и реагирование (ПДК, смарт-контракт, запуск БПЛА), Е – Пользовательский уровень (Web/Mobile). Разработанная трассировочная таблица приведена в таблица 3.4.

Таблица 3.4. – Трассировочная таблица требований

FR	Описание	Модуль(и)	Компоненты схемы	Основные данные	События/выход
FR-01	Сбор со стационарных датчиков	А, В	Сеть датчиков, IoT сеть, ЦДП, БД	Measurement, SensorNode, Timestamp	NewMeasurement
FR-02	Сбор с мобильных устройств (пеший маршрут)	А, В, Е	Мобильное устройство, IoT/шлюз, ЦДП, БД	TrackPoint, Route, Measurement	NewMobileTrack
FR-03	Интеграция данных БПЛА	А, В, D	БПЛА, IoT/канал, ЦДП, БД	UAVMission, UAVTrack, Measurement	UAVMissionCompleted
FR-04	Интеграция метеоданных	А, В, С	Метеостанция, ЦДП, БД, ML	MeteoRecord (wind, RH, T, P)	MeteoUpdate
FR-05	Первичная обработка (ЦДП)	В	ЦДП	NormalizedMeasurement, UnitConversion, TimeSync	IngestOK / IngestError
FR-06	QA/QC контроль качества	В, С	ЦДП/QA сервис, БД	DataQualityFla, OutlierMark, SensorHealth	QualityAlert, SensorFaultSuspect
FR-07	Хранение данных (БД)	В	База данных	Raw/Processed series, Metadata	Persisted
FR-08	Целостность данных (реестр)	В	Блокчейн-система (hash/sign)	HashRecord, Signature, AuditTrail	IntegrityProofCreated
FR-09	Расчет индексов/показателей	В, С, Е	Аналитика, Web/Mobile	AQ metrics (AQI/ИЗА*), Aggregates	IndexComputed
FR-10	Проверка превышения ПДК	D, В	Проверка ПДК, БД	ThresholdRule, ExceedanceEvent	ExceedanceDetected

FR-11	“Событие → смарт-контракт”	D, B	Смарт-контракт, реестр/лог	ContractCall, EventLog	ContractTriggered
FR-12	Инициация миссии БПЛА	D, A, B	Контроль, команда БПЛА, ЦДП, БД	UAVTask, MissionPlan	UAVDispatched / OperatorApproval
FR-13	Прогнозирование загрязнений	C, B, E	ML-алгоритмы, Прогноз	ForecastSeries, Features, ModelVersion	ForecastReady
FR-14	Пространственное прогнозирование (карты)	C, E, B	Прогноз, Web-карта	GridCell/ZoneForecast, Interpolation	MapLayerUpdated
FR-15	Неопределенность прогноза	C, E	ML/Uncertainty, UI	CI/PI intervals, Prob(Exceed)	RiskHeatmap
FR-16	Adaptive monitoring (маршруты/точки)	C, D, A, E	Планировщик задач и измерений, БПЛА	MonitoringPlan, NextBestPoint, UtilityScore	PlanUpdated
FR-17	Визуализация и отчеты	E, B, C	Web/Mobile интерфейсы	Charts, Reports, ExportViews	ReportGenerated
FR-18	Уведомления	D, E, B	Notification service	Alert, Recipient, Channel	AlertSent
FR-19	Роли и доступ	E, B	Auth/RBAC сервис	User, Role, Permission, AuditLog	AccessGranted/Denied
FR-20	Экспорт и API	E, B	API Gateway/Export	CSV/JSON, API tokens	DataExported

Назначение такой таблицы раскрывает I. Sommerville, отмечая, что «трассируемость требований позволяет оценить влияние изменений на компоненты системы» [200]. Построив трассировочную таблицу требований, перейдем к построению диаграмм вариантов использования. Согласно А. Коберну, «вариант использования описывает поведение системы как последовательность взаимодействий для достижения цели пользователя» [201]. Так, исходя из описанных функциональных требований были выделены 9 акторов в проектируемой системе. Основные акторы и выполняемые ими функции приведены в таблица 3.5

Таблица 3.5. – Основные акторы системы и их выполняемые функции

Актор	Условное обозначение	Выполняемые функции
Администратор	A1	управление пользователями, ролями, справочниками, интеграциями
Оператор	A2	контроль качества данных, подтверждение инцидентов, запуск миссии БПЛА (при необходимости)
Полевая мобильная платформа	A3	поставка маршрутных измерений
Стационарный сенсорный узел (IoT-датчик)	A4	поставка потоков измерений
Метеостанция	A5	поставка метеопараметров
БПЛА	A6	выполнение миссий измерений и возвращение данных
Аналитики/исследователи	A7	выгрузка данных, построение отчетов и анализ карты/прогнозы
Регулятор/аудитор	A8	просмотр отчётов и доказуемости целостности данных (аудит)
Внешний потребитель данных (API-клиент)	A9	подключение по API для интеграции

Исходная методология такого описания предложена I. Jacobson, показавшим, что «варианты использования задают функциональность системы с точки зрения внешних действующих лиц» [202]. После определения ключевых акторов системы был составлен реестр вариантов использования, где установлено соответствие ключевых и поддерживающих акторов с основными вариантами использования (таблица 3.5), которые покрывают функциональные требования, описанные в таблице 3.6

Таблица 3.6. – Реестр вариантов использования

Условное обозначение	Название ВИ	Ключевой актор	Поддерживающий актор	Цель	Связь с FR-х
UC-01	Регистрация/аутентификация пользователя	A7	A1	получение доступа к сервисам системы	FR-19

Продолжение таблицы 3.6

UC-02	Управление пользователями и ролями	A1	-	назначение ролей, политик доступа, журналирование	
UC-03	Настройка источников данных	A1	A4, A5, A6	подключение/обновление параметров источников, ключей и частот	FR-01 FR-03 FR-04 FR-07
UC-04	Прием данных от стационарных датчиков	A4	A2	загрузка потока измерений в ЦДП/БД	FR-01 FR-05 FR-07
UC-05	Прием маршрутных данных от мобильного устройства	A3	A7	загрузка трека/маршрута измерений	FR-02 FR-05 FR-07
UC-06	Первичная обработка и нормализация данных	A2, Sys	-	приведение форматов, единиц, синхронизация времени/координат	FR-05
UC-07	Контроль качества данных	A2	-	выбросы, пропуски, дрейф сенсора, метки качества	FR-06
UC-08	Хранение данных в БД	Sys	A2	сохранение сырых/очищенных/агрегированных рядов и метаданных	FR-07

Продолжение таблицы 3.6

UC-09	Верификация целостности данных (реестр/блокчейн)	Sys	A8	запись хэшей/подписей, аудит	FR-08
UC-10	Расчет индексов/агрегаций качества воздуха	A7	Sys	агрегирование по времени/району и рассчитать показатели	FR-09
UC-11	Проверка превышений ПДК и регистрация события	Sys	A2	сравнение с нормативом и создание события	FR-10
UC-12	Исполнение смарт-контракта реагирования	Sys	A2, A8	формализование факта инцидента и регламента реакции	FR-11
UC-13	Планирование и запуск миссии БПЛА	A2, Sys	A6	отправка БПЛА в горячую зону для уточняющих измерений	FR-12
UC-14	Формирование задания миссии (зона/маршрут/высоты)	Sys	A2	построение маршрута/точки по событию/прогнозу	FR-12 FR-16
UC-15	Подтверждение миссии оператором	A2	-	ручное подтверждение перед запуском (безопасность/регламент)	FR-12

Продолжение таблицы 3.6

UC-16	Прогнозирование концентраций загрязнений (PM2.5)	Sys	A7	прогноз на горизонте Т на основе истории и метеорологических данных	FR-13
UC-17	Интеграция метеоданных	A5	Sys	импорт метеоряда и привязка к измерениям	FR-04
UC-18	Уведомления о превышении, риске и сбое датчика	Sys	A7, A2	оповещение заинтересованных пользователей	FR-18
UC-19	Визуализация данных и карт (Web/Mobile)	A7	Sys	построение графиков, карт, временных рядов, прогнозов и событий	FR-17 FR-14 FR-15
UC-20	Аудит и подтверждение достоверности данных	A8	Sys	проверка целостности и по реестру и журналам	FR-08 FR-19
UC-21	Экспорт данных и предоставление API-доступа	A7, A9	Sys	выгрузка CSV/JSON, доступ по API	FR-20

Для минимизации загруженности и легкости чтения диаграмм вариантов использования исходя из представленного выше реестра вариантов использования произвели разбиение (декомпозицию) этих вариантов использования на 5 пакетов.

При декомпозиции вариантов использования подсистему сбора данных выделили в отдельный функциональный блок, что обусловлено тем, что процессы поступления первичных наблюдений являются фундаментом всей

информационно-аналитической цепочки разрабатываемой системы, т.е. корректность этапов оценки состояния, прогнозирования и выработки управленческих решений напрямую зависит от полноты, достоверности и структурной согласованности поступающих входных данных. С этой целью в рамках этой подсистемы реализуется механизм интеграции гетерогенных (разнородных) источников измерительной информации. Источниками измерительной информации выступают стационарные сенсорные узлы, мобильные маршрутные измерения и внешние метеорологические сервисы. Так, за счет механизма интеграции гетерогенных (разнородных) источников измерительной информации обеспечивается пространственное покрытие территории мониторинга, учет динамических факторов окружающей среды и формирование единого стандартизированного потока наблюдений.

Функциональная структура подсистемы сбора данных представлена на рисунок 3.2, где отражены ключевые сценарии взаимодействия системы с источниками данных. В построенной диаграмме демонстрируется логическая организация процессов приема, обработки и первичной подготовки измерительной информации.

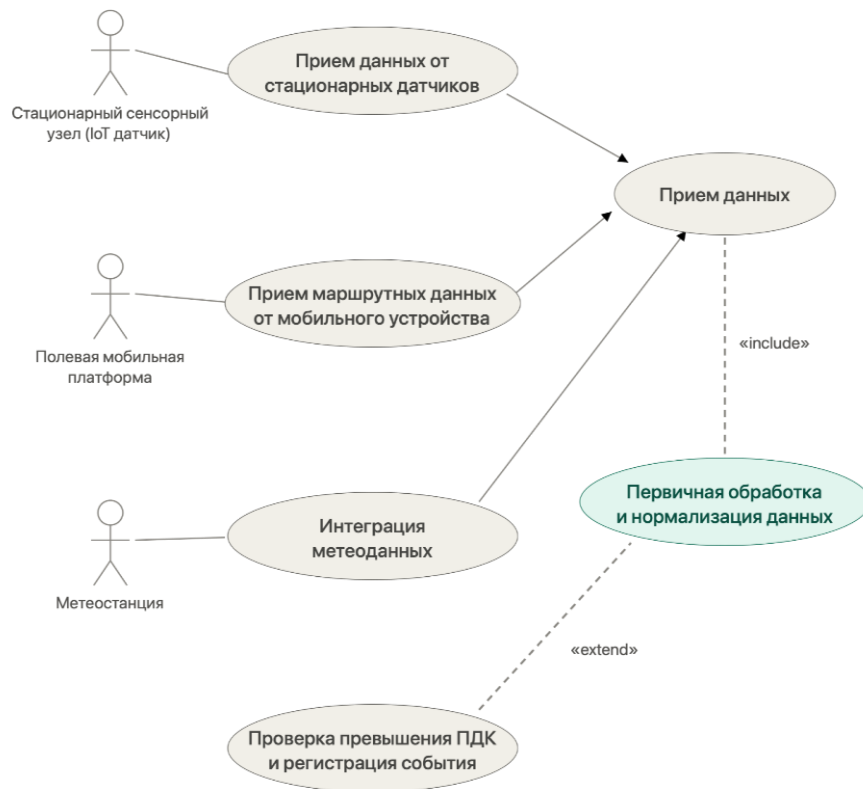


Рисунок 3.2. – Диаграмма вариантов использования пакета P-A: Data Acquisition (сбор первичных данных)

Представленная диаграмма вариантов использования (пакет сбора первичных данных) выполняет роль входного шлюза (ingestion layer) всей интеллектуальной системы. Выполнение вариантов использования в рамках этого пакета обеспечивает унификацию форматов данных, синхронизацию временных меток, пространственную привязку измерений и подготовку информации к этапам контроля качества и аналитической обработки. Решение выделения подсистемы сбора данных в отдельный пакет оправдано легкостью дальнейшей интеграции новых типов сенсоров (датчиков) и обеспечением технологической независимости источников данных от аналитических модулей системы, т.е. создается формальная основа для этапов оценки состояния, прогнозирования и принятия управленческих решений, что соответствует логике научной модели управления экологическим мониторингом.

Полученные данные в подсистеме сбора данных переходят в подсистему обработки и хранения данных. Основной задачей данной подсистемы является преобразование гетерогенных потоков наблюдений в стандартизированную информационную модель, которая пригодна для дальнейшего анализа и прогнозирования. С этой целью в рамках этой подсистемы реализуются процедуры нормализации, контроля качества, проверки корректности и агрегирования данных. Повышение уровня доверия к получаемым данным и трассируемости изменений возможна за счет применения механизмов проверки целостности и регистрации ключевых операций в реестре. Благодаря такому подходу обеспечивается трассируемость изменений. Функциональная структура подсистемы обработки и хранения данных представлена на рисунке 3.3.

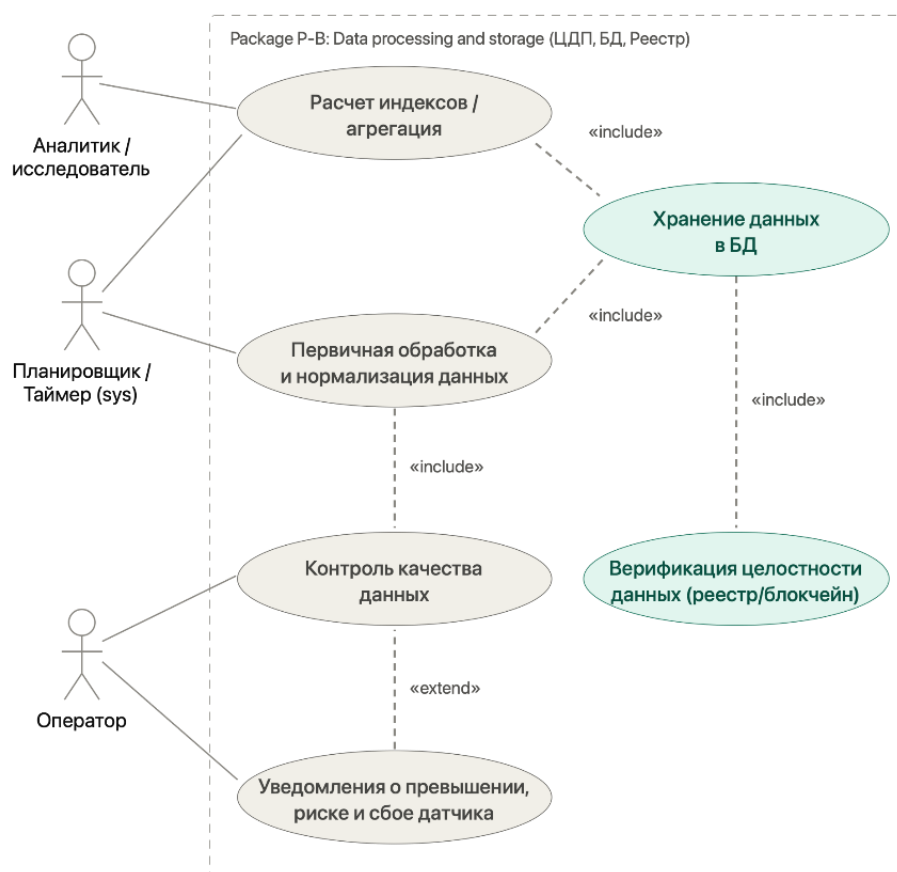


Рисунок 3.3. – Диаграмма вариантов использования пакета P-B: Data Processing & Storage (хранение и обработка данных)

Анализ представленной диаграммы показывает последовательность преобразования данных от момента их поступления до формирования

структурированных аналитических наборов. Архитектурно этот пакет выступает в роли ядра управления данными (data backbone), который обеспечивает единый источник достоверных данных (single source of truth), контроль жизненного цикла наблюдений и подготовку данных для алгоритмов аналитики и машинного обучения. До передачи данных в подсистему аналитики и прогнозирования подсистема хранения и обработки данных производит первичную обработку и нормализацию входящих данных, контроль качества измерений и выявление аномалий, сохранение информации в централизованном хранилище (БД), проверку целостности данных с использованием реестровых механизмов и расчет производных показателей и агрегированных индексов.

Обработанные данные поступают в подсистему аналитики и прогнозирования, который реализует интеллектуальный уровень обработки данных и обеспечивает переход от описательного мониторинга к предиктивному (прогнозному) управлению экологической ситуацией. Данный пакет выявляет закономерности в пространственно-временной динамике загрязнений и формирует краткосрочные прогнозы концентраций и производит оценку уровня риска на основе моделей машинного обучения и статистического анализа. Более точное прогнозирование достигается за счет имеющихся аналитических функций в системе, где интегрированы результаты мониторинга с внешними контекстными факторами (в том числе метеорологических параметров), что позволяет учитывать физические процессы переноса загрязняющих веществ. Структура аналитических сценариев пакета аналитики и прогнозирования представлена на рисунок 3.4.

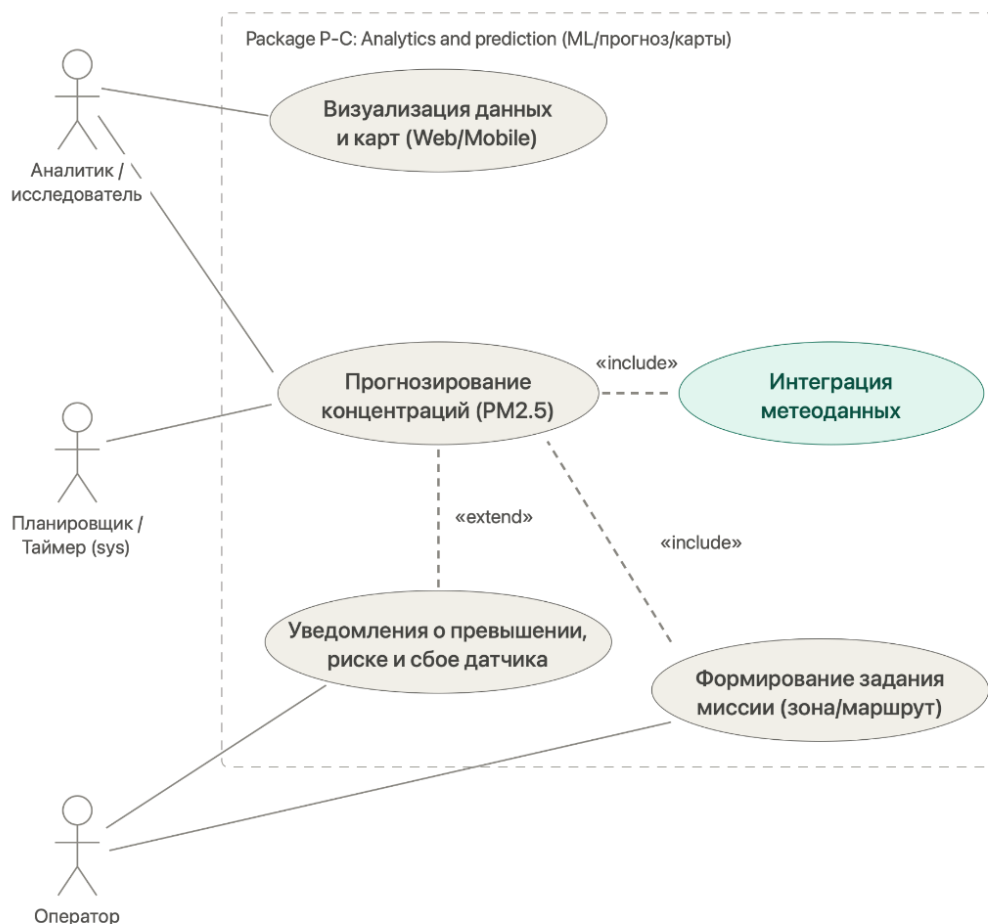


Рисунок 3.4. – Диаграмма вариантов использования пакета P-C: Analytics & Prediction (Аналитика и прогнозирование)

По представленной диаграмме можно утверждать, что данная подсистема играет роль т.н. аналитического ядра системы. Данное аналитическое ядро непосредственно обеспечивает переход от реактивного мониторинга к проактивному мониторингу. Далее, полученные результаты используются системой для дальнейшего определения потенциально опасных зон и планирования дополнительных измерительных мероприятий для выявления причин превышения ПДК загрязняющих веществ. Сформированные прогнозные модели составляют основу СППР на основе анализа полученных данных. Н. П. Садовникова разработала методы информационной поддержки экологически ориентированного управления городом, показав, что «обеспечение

экологической безопасности города требует применения систем поддержки принятия решений на основе моделирования развития территории» [203].

Выявление экологических событий и инициирование соответствующих управленческих действий реализовано в подсистеме управления и реагирования. Пакет контроля и реагирования своей ключевой задачи ставит сопоставление результатов мониторинга и прогнозирования с нормативными значениями качества воздуха и формирование реакций системы в случае выявления потенциальных угроз, т.е. наблюдается непосредственный переход от аналитической информации к практическим действиям в рамках которого производится уведомление пользователей, запуск процедур реагирования и планирование дополнительных измерительных миссий с помощью БПЛА. Логика процессов контроля и реагирования представлена на рисунк 3.5.

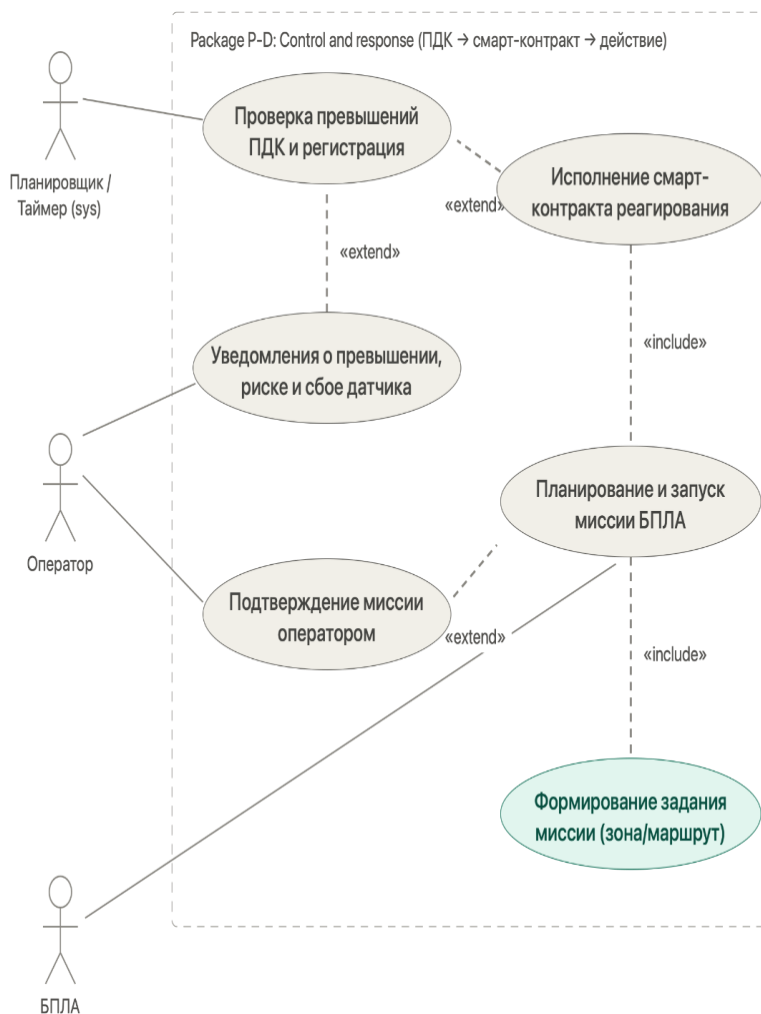


Рисунок 3.5. – Диаграмма вариантов использования пакета P-D: Control & Response (Контроль и реагирование)

Подытожив основные положения касемо пакета контроля и реагирования следует отметить, что на данном пакете отражены сценарии обработки событий, которые непосредственно связаны с превышением нормативов качества воздуха и другими критическими ситуациями, т.е. она формирует исполнительный контур архитектуры системы за счет которого обеспечивается замыкание цикла управления и происходит перевод результатов анализа в реальные действия.

Для доступа к функциональным возможностям системы, контроля прав пользователей и поддержку процессов прозрачности и аудита выделили отдельную подсистему взаимодействия с пользователями и управления, где представлены удобные инструменты визуализации и анализа данных и реализован механизм управления доступом в соответствии с ролями участников системы (role-based access control). Дополнительно в рамках данного пакета реализуются функции обеспечения доверия к данным. Структура пользовательских сценариев представлена на рисунок 3.6.

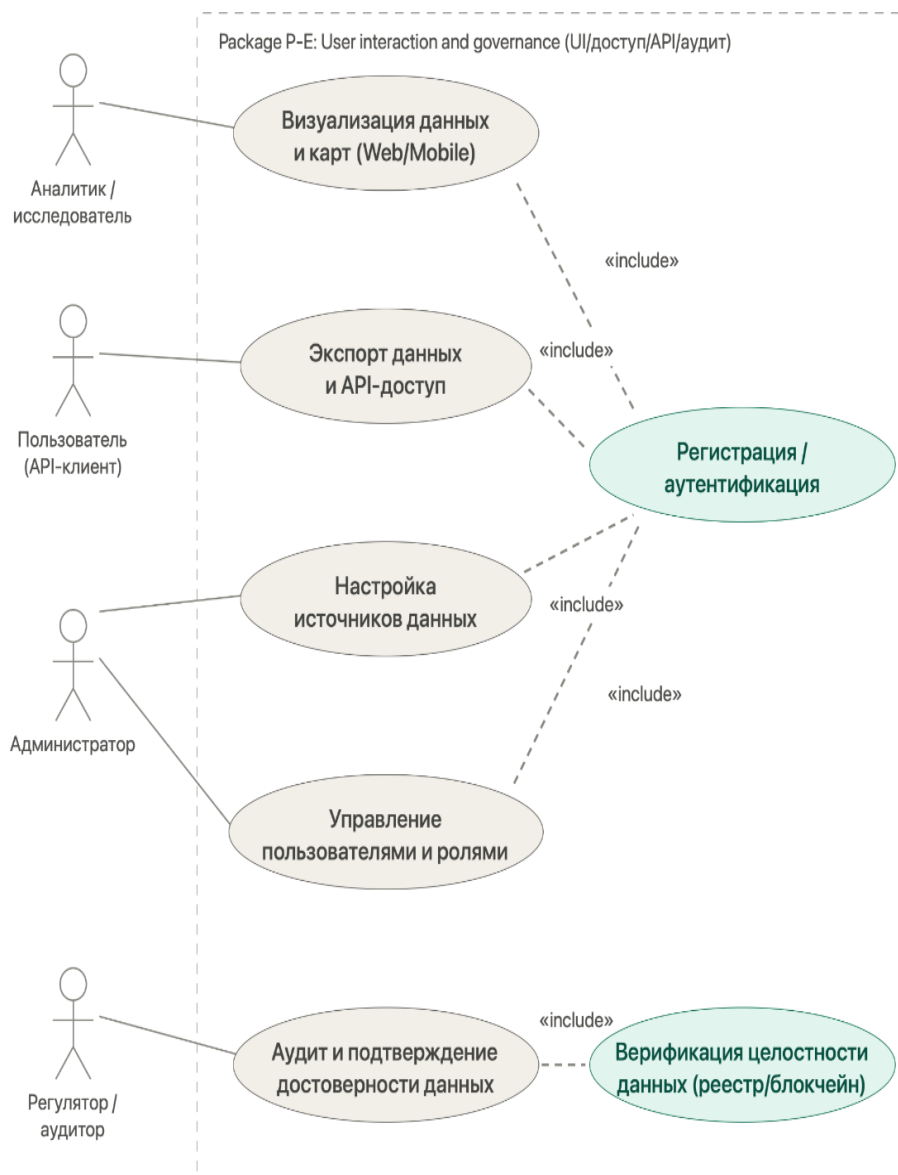


Рисунок 3.6. – Диаграмма вариантов использования пакета P-E: User Interaction & Governance (Взаимодействие пользователя и управление)

Представленная выше подсистема обеспечивает управляемость и прозрачность работы всей платформы за счет создания интерфейса между аналитическим ядром системы и конечными пользователями (end users). Можно утверждать, что в этой подсистеме реализованы основные функции пользовательского уровня.

3.4. Объектная и динамическая модели системы

После успешного проектирования диаграмм вариантов использования перейдем к проектированию диаграммы классов в рамках которого

моделируется структура данных, сущности, атрибуты этих сущностей и их взаимосвязь. Для нашей системы выделили 31 классов и описали назначение каждого из этих классов в таблице 3.7

Таблица 3.7. – Основные классы и их назначение

Наименование класса	Назначение
User	учетная пользователя от имени которого выполняются действия, формируются маршруты, подтверждаются предупреждения, вносится калибровка и т.д.
Role	роль доступа (RBAC), агрегирует набор прав (например, ADMIN/OPERATOR/RESEARCHER/VIEWER)
Permission	атомарное право (действие/операция)
UserRole	факт назначения роли пользователю
RolePermission	факт назначения права роли
Location	представление точки/объекта измерений
Region	представление зоны анализа (район/кластер/квадрант)
Route	хранение и управление маршрутом мониторинга
RouteSegment	сегмент маршрута (линия, план, скорость)
Device	управление устройством как ресурсом
Sensor	канал измерений и базовая валидация/калибровка
CalibrationProfile	коррекция измерений по методике и параметрам
MaintenanceRecord	история обслуживания устройства
Measurement	ядро мониторинга (фиксация измерений, QC, коррекция)
QCRule	формализация правил качества данных
QCResult	результат применения одного правила QC
Pollutant	справочник загрязнителей
Standard	нормативная база порогов и расчета индексов
Threshold	пороговое значение концентрации загрязнителя
AirQualityIndex	расчет интегрального показателя качества воздуха
Alert	фиксация значимого события и его жизненный цикл
Notification	доставка предупреждений по каналам

ResponseAction	реакция на предупреждение
UAV	управление дроном как ресурсом
UAVMission	планирование и выполнение миссии БПЛА
Model	управление ML/physics-informed моделью и ее версиями
Dataset	формирование датасетов для обучения/валидации
TrainingRun	эксперимент обучения
Prediction	результат прогноза и оценка риска
WeatherObservation	хранение метеоконтекста для анализа/моделей
AuditLog	журнал действий для безопасности и научной воспроизводимости

Принципы выделения таких сущностей сформулированы Е. Evans, по которому «модель предметной области должна отражать понятия и правила самой области, а не структуру хранения данных» [204]. Для обеспечения взаимосвязанности основных классов были использованы связи ассоциации, композиции и агрегации и для каждой связи определены кратности связей типа [1..1 : 0..*, 1 : 0..*]. Семантика применяемых типов связей закреплена J. Rumbaugh, I. Jacobson и G. Booch, определяющими композицию как «форму агрегации, при которой часть принадлежит целому и разделяет его жизненный цикл» [205]. Соответственно это приводится в таблице 3.8

Таблица 3.8 – Связи между классами и кратность связей

Класс А	Класс В	Вид связи	Кратность связи
User	UserRole	ассоциация	1..1 : 0..*
Role	UserRole	ассоциация	1..1 : 0..*
Role	RolePermission	ассоциация	1..1 : 0..*
Permission	RolePermission	ассоциация	1..1 : 0..*
Region	Location	агрегация	1 : 0..*
Route	RouteSegment	композиция	1 : 1..*
User	Route	ассоциация	1 : 0..*
Device	Sensor	композиция	1 : 1..*

Продолжение таблицы 3.8

Sensor	CalibrationProfile	ассоциация	1 : 0..*
Device	MaintenanceRecord	ассоциация	1 : 0..*
User	Device	ассоциация	1 : 0..*
Sensor	Measurement	ассоциация	1 : 0..*
Device	Measurement	ассоциация	1 : 0..*
Location	Measurement	ассоциация	1 : 0..*
QCRule	QCResult	ассоциация	1 : 0..*
Measurement	QCResult	композиция	1 : 0..*
Alert	Notification	композиция	1 : 0..*
Alert	ResponseAction	композиция	1 : 0..*
User	Alert	ассоциация	0..1 : 0..*
Alert	Location	ассоциация	0..1 : 0..*
UAV	UAVMission	композиция	1 : 0..*
Alert	UAVMission	ассоциация	0..1 : 0..*
UAV	Device	ассоциация	0..1 : 0..*
Model	TrainingRun	композиция	1 : 0..*
Dataset	TrainingRun	ассоциация	1 : 0..*
Model	Prediction	ассоциация	1 : 0..*
Pollutant	Prediction	ассоциация	1 : 0..*
Location	Prediction	ассоциация	0..1 : 0..*
WeatherObservation	Location	ассоциация	0..1 : 0..*
WeatherObservation	Measurement	ассоциация	0..* : 0..*
WeatherObservation	Prediction	ассоциация	0..* : 0..*
User	AuditLog	ассоциация	0..1 : 0..*

Представленные в таблице связи между классами отражают логическую структуру предметной области и формируют целостную объектную модель интеллектуальной системы мониторинга качества атмосферного воздуха. Выбор связей типа ассоциации, агрегации, композиции и их кратностей обусловлено

семантикой предметной области и требований к целостности данных, масштабируемости и расширяемости системы.

Для связывания классов User, Role, Permission и промежуточными классами UserRole, RolePermission, которые могут существовать независимо друг от друга были использованы связи типа ассоциации. Представленные классы реализует ролевую модель управления доступом (RBAC), который обеспечивает гибкое назначение прав и поддерживает принцип минимально необходимых привилегий. Возможность назначения пользователю нескольких ролей и расширяемость набора разрешений для каждой роли без нарушения целостности модели выражается в использовании кратности связей вида 1..1 : 0..*.

Связь типа агрегации была применена при описании отношений типа «часть–целое» со слабой зависимостью жизненных циклов объектов. В качестве примера рассмотрим связь между классом Region и Location, где географический регион логически объединяет множество локаций, однако каждая локация может существовать и обрабатываться системой независимо от конкретного региона, что важно для поддержки различных уровней пространственной агрегации данных. Наоборот, для жизненного цикла объекта-потомка, который зависит от объекта-владельца была выбрана связь типа композиции.

Так, классы RouteSegment, Measurement, QCResult, Notification, ResponseAction, UAVMission и TrainingRun не имеют самостоятельного смысла вне соответствующих агрегирующих сущностей Route, Sensor, Alert, UAV и Model. За счет применения связей типа композиции обеспечивается строгая целостность данных и предотвращается появление висячих объектов в системе.

Диаграмма классов, изображенная на рисунок 3.7 отражает объектную декомпозицию предметной области и включает сущности, которые связаны со сбором измерений загрязняющих веществ, их пространственно-временной привязкой, контролем качества данных, нормативной оценкой, прогнозированием и формированием управляющих воздействий.

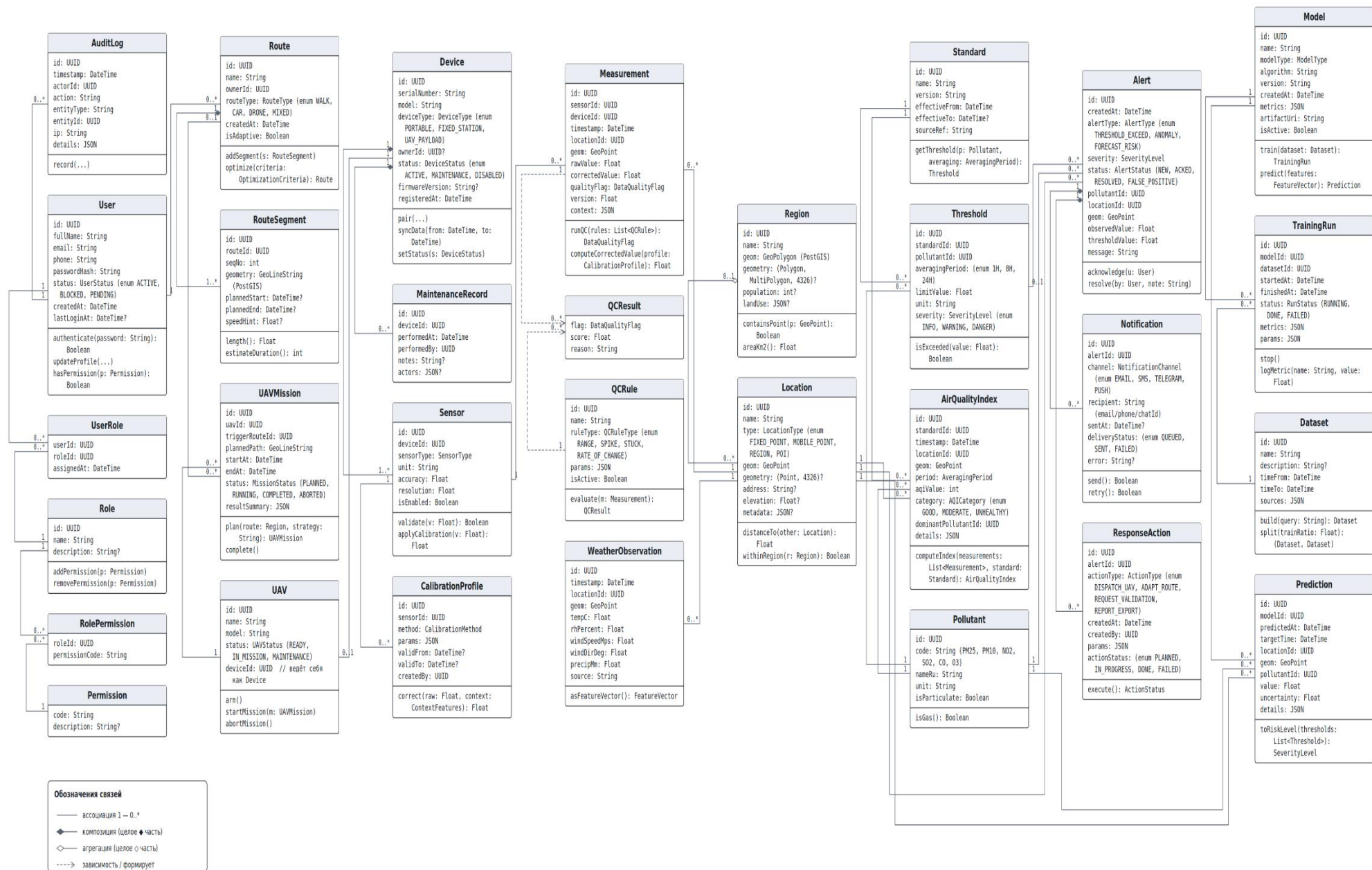


Рисунок 3.7. – Диаграмма классов системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха.

Анализ диаграммы классов (рисунок 3.7) показывает, что ядром объектной модели является класс *Measurement*, который аккумулирует первичные и скорректированные результаты наблюдений, временные метки, геопривязку и показатели качества данных. Источники измерений представлены классами *Device* и *Sensor*, а процедуры обеспечения достоверности данных классами *CalibrationProfile*, *QCRule* и *QCResult*. Нормативно-аналитический контур реализован посредством классов *Pollutant*, *Standard*, *Threshold* и *AirQualityIndex*, что обеспечивает формализованную интерпретацию наблюдаемых концентраций в терминах пороговых значений и индексов качества воздуха.

Дополнительно в модели выделены классы *Alert*, *Notification* и *ResponseAction*, которые описывают механизм реагирования на превышения и аномальные ситуации. Классы *Model*, *Dataset*, *TrainingRun* и *Prediction* обеспечивают поддержку прогнозной аналитики и воспроизводимость вычислительных экспериментов. Использование различных типов UML-связей оправдано тем, что она соответствует семантике предметной области и жизненному циклу сущностей, что повышает корректность проектирования и пригодность модели для дальнейшей реализации в СУБД и программных модулях интеллектуальной обработки данных.

После успешного построения диаграммы классов переходим к построению диаграмм последовательности, которая используется для визуализации взаимодействия между объектами в системе.

С точки зрения проектируемого бизнес-процесса данная диаграмма является простым и удобным инструментом для демонстрации всех интеграций и взаимодействий. На диаграмме последовательности отражены порядок сообщений, которыми объекты обмениваются друг с другом во времени и их жизненный цикл. Введем для наших диаграмм последовательности условные обозначения в виде SD-01...SD-0n.

В диаграмме SD-01 (рисунок 3.8) отражены процессы формирования, подтверждения и сохранения измерений, поступающих от IoT датчиков, т.е. на диаграмме показан первичный контур поступления данных в систему

экологического мониторинга. Разработанная диаграмма представляет собой важную диаграмму, т.к. она описывает точку входа всех наблюдений в рамках системы. Инициатором выступает IoT-датчик (портативный/стационарный), отправляющий пакет измерений через API-шлюз. Предусловиями являются регистрация устройства, доступность канала связи и согласованный формат полезной нагрузки. Основной поток включает передачу измерения, техническую валидацию структуры данных, опциональную базовую проверку качества и сохранение сырых измерений с возвратом подтверждения (ACK) датчику. Циклический характер мониторинга отражён конструкцией loop, которая соответствует регулярной периодичности измерений.

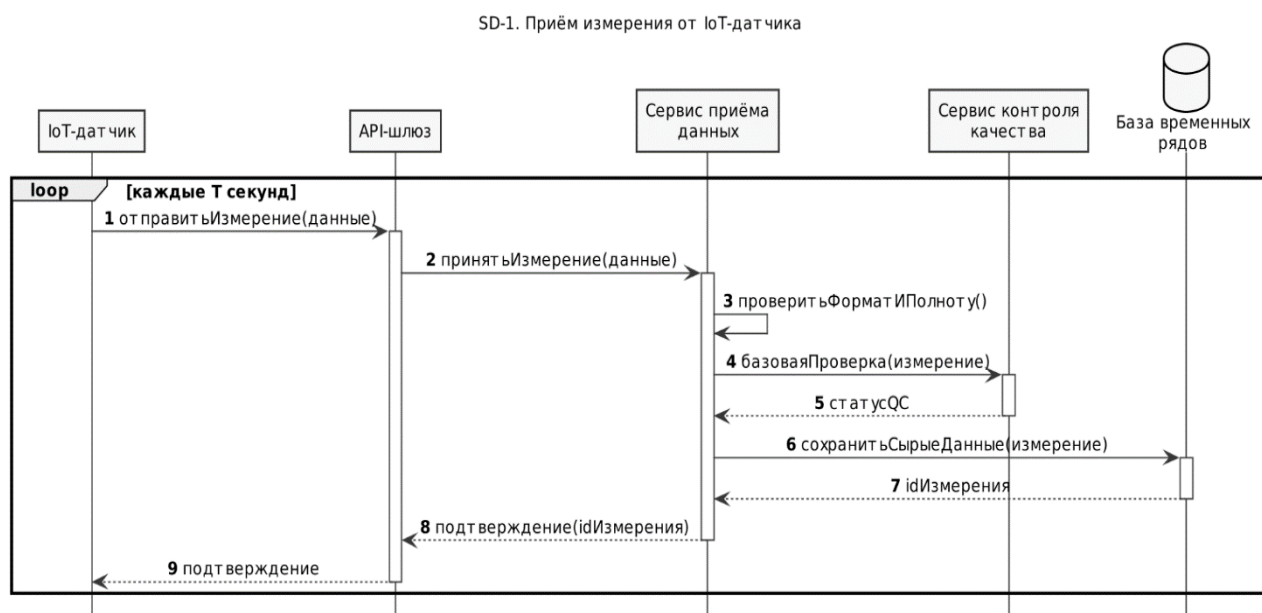


Рисунок 3.8. – SD-01. Передача измерений концентраций загрязняющих веществ от IoT-датчика

Вышеприведенная диаграмма подчеркивает разделение ответственности. Так, API-шлюз выступает фасадом внешнего взаимодействия, сервис приёма данных реализует оркестрацию валидации и маршрутизации, а база временных рядов обеспечивает долговременное хранение исходных наблюдений. Сохранение именно сырых данных (raw data) обеспечивает трассируемость и воспроизводимость исследовательских результатов, что позволяет повторно применять обновленные правила контроля качества без потери первичной

информации. Самовывоз в сервисе приема фиксирует отделение технической валидации от аналитического QC-контроля.

На диаграмме SD-02 (рисунок 3.9) выделены процедуры контроля качества измерений и присвоение флага достоверности (например, OK / SUSPECT / INVALID). Научно обоснованное решение выделить этого контура в качестве обязательного обусловлено тем, что расчеты индексов качества воздуха и прогнозирование должны опираться на данные с определенным уровнем доверия.

Инициатором сценария в рамках диаграммы SD-02 выступает сервис приёма данных после поступления нового измерения либо плановый обработчик QC-контроля. При взаимодействии применяются наборы правил (проверка диапазона, анализ скачков, использование исторических значений). Далее, производится агрегирование результатов в итоговый флаг, после чего измерение сохраняется с маркировкой, а протокол проверки в отдельном репозитории аудита.



Рисунок 3.9. – SD-02. Контроль качества измерений (QC) и маркировка

Показанное ветвление alt в вышеприведенной диаграмме SD-02 отражает принцип научной полноты, т.е. данные не отбрасываются безусловно, а сохраняются с корректной маркировкой, что позволяет отделять значения, которые пригодны для расчётов от подозрительных и некорректных данных. Разделение хранения измерений и хранения протоколов QC обосновано

обеспечением прозрачностью и возможностью формального аудита. Так, для каждого флага сохраняются причины и сработавшие правила. Самовывоз агрегирования результатов подчёркивает вычислительный характер принятия решений и позволяет трактовать QC как формальный оператор качества над входным потоком наблюдений.

Логическим продолжением диаграммы SD-02 выступает диаграмма SD-03 (рисунок 3.10), которая представляет собой аналитический контур оценки состояния атмосферного воздуха. По извлеченным QC-проверенным измерениям вычисляется индекс качества воздуха (AQI) и полученные значения сравниваются с нормативными значениями (ПДК). В рамках SD-03 инициаторами выступают планировщик который, запускает расчет с заданной периодичностью (например, ежечасно) и событийный триггер при поступлении новых данных. В сценарии участвуют сервис индекса качества воздуха (AQI), база временных рядов как источник проверенных данных, сервис нормативов как поставщик пороговых значений и шкал, репозиторий результатов и шина событий. После вычисления индекса выполняется проверка превышений концентраций загрязнителей. Дополнительно, при необходимости публикуется событие превышения ПДК для запуска механизмов реагирования.

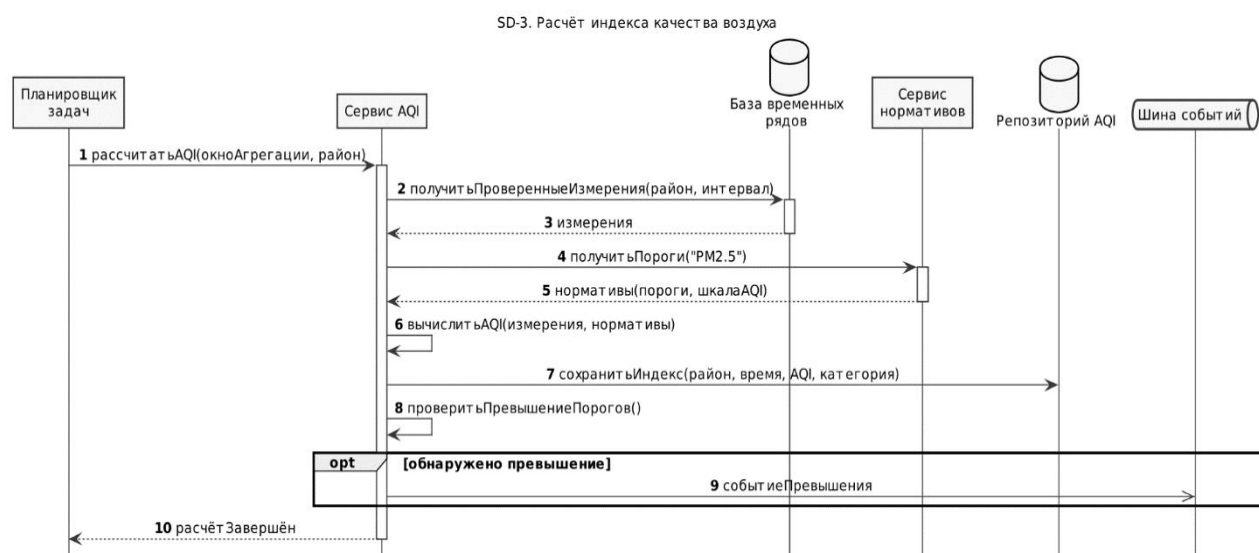


Рисунок 3.10. – SD-03. Расчёт AQI и сравнение с ПДК

В вышеприведенной диаграмме демонстрируется принцип воспроизводимого аналитического контура, т.е. нормативы извлекаются как

явный ресурс, что исключает скрытые пороги в коде и повышается научная проверяемость. За счет использования ветвления alt в событийном компоненте фиксируются только значимые ситуации (превышения ПДК), что дает возможность перехода к реактивной архитектуре управления. Разделение вычислительных стадий подчеркиваются самовывозом вычисления индекса качества воздуха (AQI) и проверкой порогов.

Реакция системы на событие превышения ПДК описаны в диаграмме SD-04 (рисунок 3.11), т.е. отражен сценарий управленческой реакции системы на событие превышения ПДК. В рамках данной SD-04 формируются уведомления о превышении ПДК и обеспечивается доставка пользователям по заданным каналам. Инициатором является шина событий, который доставляет событие превышения в сервис оповещений. В основной поток включены определение получателей на основании пользовательских настроек и географического контекста, генерация текста уведомления по шаблонам, массовая отправка по каналам (push/e-mail/SMS) и фиксацию результатов в журнале оповещений. Использованная конструкция loop отражает рассылку по множеству адресатов.



Рисунок 3.11. – SD-04. Формирование и отправка уведомления о превышении

Описанная выше диаграмма SD-04 подчеркивает управляемость и аудитируемость оповещений. так как журналирование результатов доставки превращает уведомления в измеримый процесс, что важно для оценки

эффективности системы в реальных условиях. Самовывоз генерации текста показывает отделение содержания уведомления от транспортного уровня доставки сообщений. Опциональная ветвь opt допускает различия реализации доставки (внешние сервисы, отсутствие подтверждения пользователем) без нарушения общей логики реагирования.

В рамках диаграммы SD-05 (рисунок 3.12) моделируется пользовательский сценарий визуальной аналитики, где производится выбор параметров отображения и формируется картографический слой/график для интерпретации результатов мониторинга. Инициатором является пользователь (исследователь/оператор/аналитик), который непосредственно взаимодействует через веб-клиент. Сценарий включает запрос к API-шлюзу, подготовку данных сервисом визуализации, получение агрегированных значений из базы временных рядов и геометрии из геопространственной базы данных после чего формируется результат и возвращается в интерфейс.

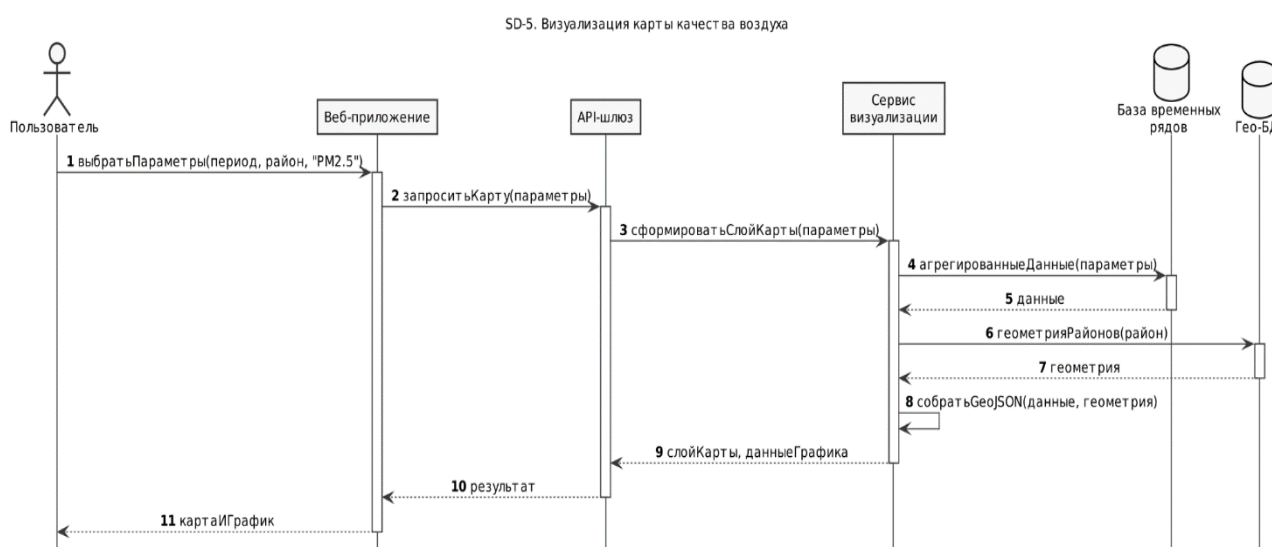


Рисунок 3.12. – SD-05. Просмотр карты/графика качества воздуха пользователем

Ключевой научно-практический аспект диаграммы SD-05 является раздельное использование двух источников (численных временных рядов и пространственной геометрии), что обеспечивает корректную пространственно-временную интерпретацию результатов и соответствует методологии

геоинформационных систем. Самовывоз сборки результата подчеркивает, что визуализация является не отображением сырых данных, а формированием аналитически подготовленного представления (слой, легенда, метаданные), которые пригодны для принятия управленческих решений.

Интеллектуальный контур прогнозирования представлена диаграммой SD-06, где происходит построение признаков, выбор активной версии модели, выполнение инференса (этап эксплуатации обученной нейросети) и сохранение результата вместе с оценкой неопределённости. В данном случае инициатором выступает планировщик задач либо аналитик, который запускает прогноз на заданный горизонт.

В сценарии задействованы сервис прогнозирования, хранилище признаков, реестр моделей и модуль ML-инференса, а также репозиторий прогнозов и шина событий. После получения прогноза выполняется оценка риска. Так, при превышении порогов формируется прогнозное событие для опережающего управления (рисунок 3.13).

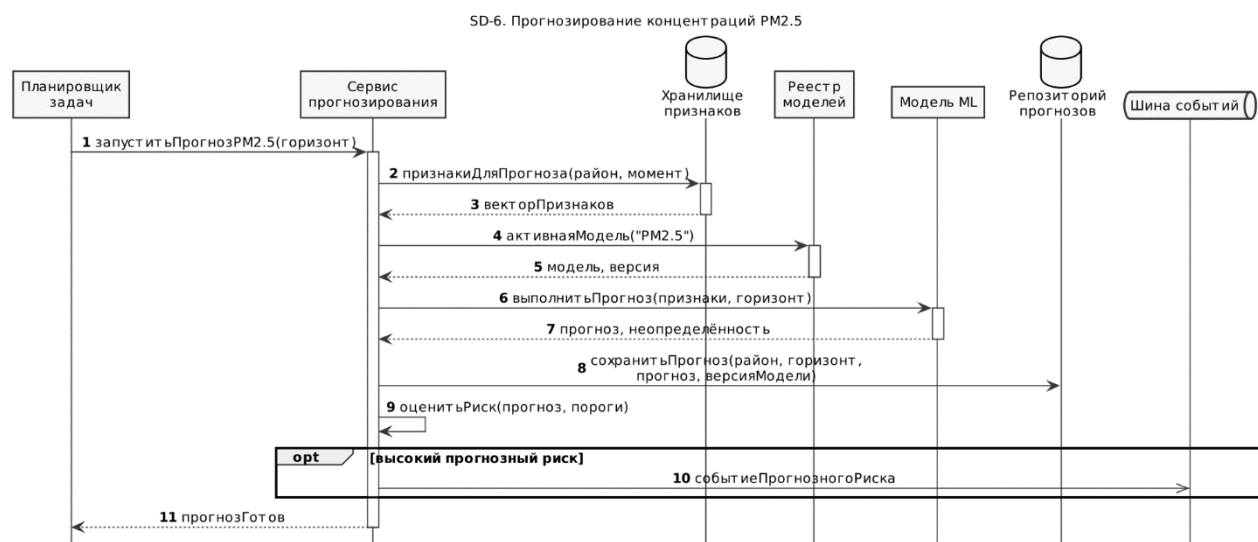


Рисунок 3.13. – SD-06. Краткосрочное прогнозирование PM2.5

Анализ диаграммы SD-06 показывает, что происходит фиксация принципа научной воспроизводимости ML-компонента (компонента машинного обучения), т.е. прогноз сохраняется вместе с версией модели и метаданными, что позволяет повторить вычисления и корректно сравнивать результаты при

обновлении моделей. С целью предотвращения скрытой замены модели и обеспечение управляемости ЖЦ было произведено разделение реестра моделей и инференса. Самовывоз оценки риска трактует прогноз как вход в контур управления, что делает прогноз основанием для событий и адаптивных действий, а не просто аналитическим отчетом.

Для описания сценария адаптивного управления мобильными измерениями построили диаграмму SD-07 (рисунок 3.14). В рамках выполнения данного сценария происходит перестроение маршрута на основе карты риска, которая сформирована из текущих наблюдений и прогнозов. Инициатором является оператор (или планировщик), который задает ограничения маршрута (старт/финиш, длительность, приоритетные зоны). Сервис адаптивного планирования получает карту риска от специализированного сервиса, который использует прогнозные зоны из репозитория прогнозов. Затем выполняется оптимизация маршрута через маршрутизатор. Альтернативная ветвь alt фиксирует различие режимов, строится т.н. адаптивный маршрут при наличии “горячих зон” и базовый маршрут при отсутствии выраженных рисков.

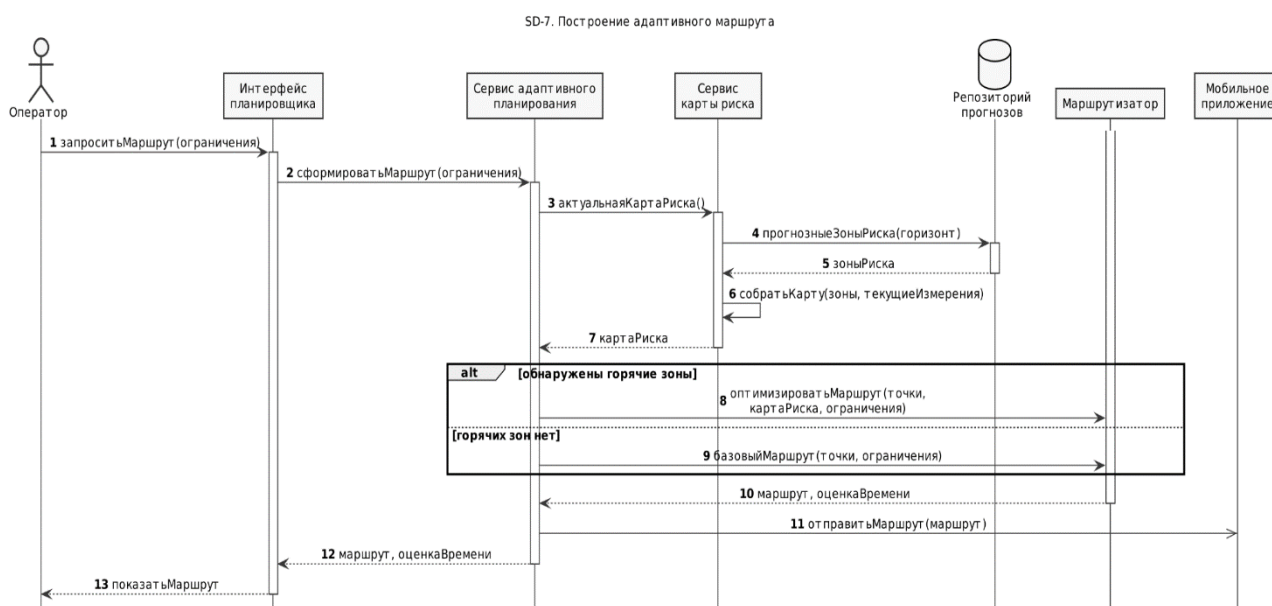


Рисунок 3.14. – SD-07. Адаптивное перепланирование маршрута мобильного мониторинга

Так, в диаграмме SD-07 продемонстрирован переход от пассивного мониторинга к активному управлению измерениями. В данном случае измерения

планируются целенаправленно для максимизации информативности в зонах повышенного риска. Ветвление alt является формальным отражением управленческого правила, т.е. при наличии приоритетных зон применяется оптимизация по карте риска, в противном случае используется стандартная стратегия. Самовывоз формирования карты риска подчеркивает, что карта является результатом интеграции наблюдений и прогнозов и служит управляющим сигналом для планирования.

Последняя построенная диаграмма SD-08 (рисунок 3.15) представляет собой расширенный сценарий реагирования на инцидент. При фиксации превышения ПДК система инициирует миссию БПЛА для верификации “горячей зоны”, получает телеметрию и формирует отчет оператору. Инициатором выступает сервис оценки индекса качества воздуха (AQI), либо шина событий, который передает событие превышения менеджеру инцидентов. Менеджер инцидентов в свою очередь координирует создание миссии и формирует маршрут полёта с учётом ограничений. В ходе выполнения миссии телеметрия и измерения передаются в сервис телеметрии. Данный процесс отражен конструкцией loop как повторяющийся поток данных до завершения задания.

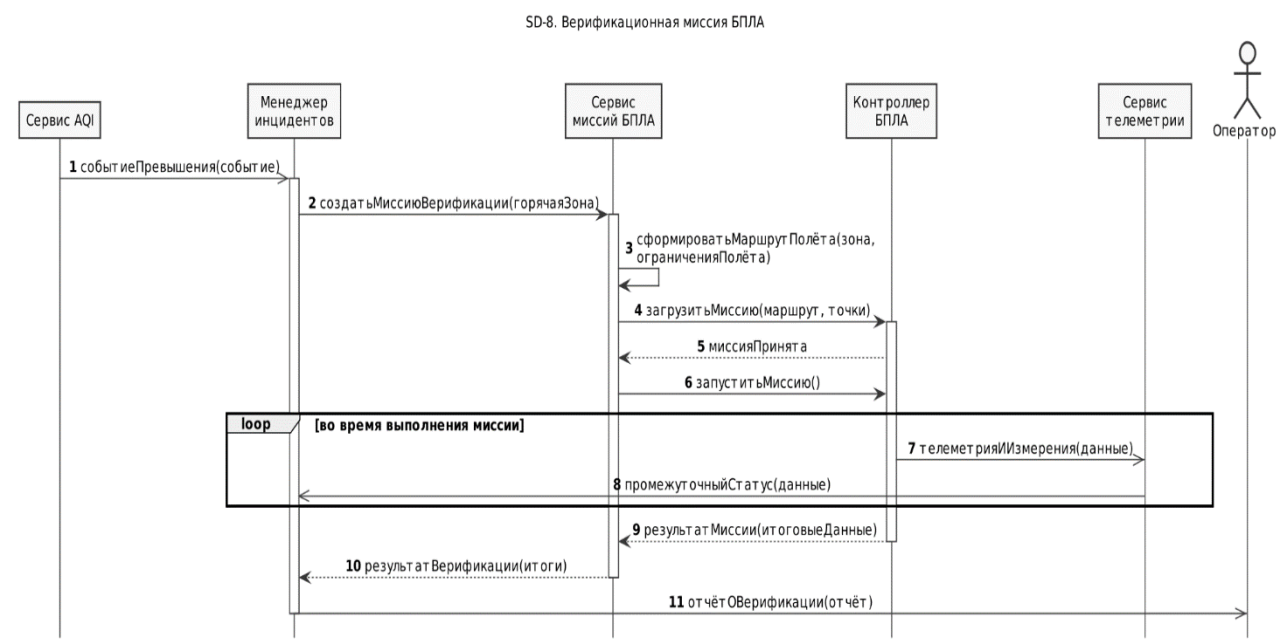


Рисунок 3.15. – SD-08. Реакция на превышение ПДК и запуск БПЛА

Отведение центральной роли менеджеру инцидентов обеспечивает управляемость жизненного цикла события от регистрации превышения ПДК до получения итоговой верификации. Самовывоз формирования маршрута полёта подчёркивает вычислительную и оптимизационную природу задачи, а конструкция loop телеметрии делает явной непрерывную обратную связь, что в результате система расширяет контур реагирования за пределы цифровой платформы. Так формируется полноценный киберфизический механизм подтверждения и уточнения загрязнения в пространстве.

В совокупности диаграммы SD-01...SD-08 образуют формальную динамическую модель функционирования системы, который охватывает полный цикл мониторинга от приёма и верификации измерений до аналитической оценки, прогнозирования и управленческих воздействий. За счет такой модели обеспечивается однозначная интерпретация алгоритмов обработки данных, объясняются архитектурные решения с позиций ответственности компонентов и демонстрируется механизм обратной связи, который необходим для адаптивного мониторинга в условиях городской среды.

Научная ценность предложенного описания состоит в том, что оно задаёт воспроизводимую структуру взаимодействий, которая может быть использована как основа для реализации, тестирования, расширения и валидации системы в рамках настоящего диссертационного исследования. Ценность такого повторно используемого описания подчёркивают Е. Gamma и соавт., отмечая, что «паттерн проектирования фиксирует проверенное решение типовой задачи в определённом контексте» [206].

3.5. Прототипирование пользовательских интерфейсов и ожидаемый эффект внедрения системы в условиях города Душанбе

В рамках практической реализации предложенной информационной системы был разработан комплект интерактивных прототипов пользовательского интерфейса, которые отражают основные функциональные модули системы мониторинга качества атмосферного воздуха. Значимость этого

этапа подтверждается положением J. Nielsen о том, что «прототипирование позволяет выявить проблемы удобства использования на ранних стадиях разработки» [207]. Прототипирование позволило визуализировать логику работы системы, определить состав экранных форм, уточнить структуру данных и показать взаимодействие между модулями сбора, обработки, анализа, прогнозирования и реагирования на превышения предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ. Методической опорой такого проектирования служат правила В. Shneiderman, среди которых требование «обеспечивать информативную обратную связь на каждое действие пользователя» [208].

Разработанные экраны ориентированы на использование в условиях города Душанбе и учитывают работу с сетью стационарных и мобильных датчиков, подключение метеостанций, хранение данных в централизованной базе, проверку достоверности измерений через блокчейн, прогнозирование загрязнения, автоматическую проверку ПДК, запуск смарт-контракта, отправку БПЛА, формирование уведомлений и аналитических отчетов.

Перед представлением основного функционала системы был разработан экран авторизации, который обеспечивает контролируемый доступ к данным экологического мониторинга. Данный экран является входной точкой в систему и предназначен для идентификации пользователя, выбора его роли и последующего предоставления соответствующего уровня доступа к функциональным модулям (рисунок 3.16).

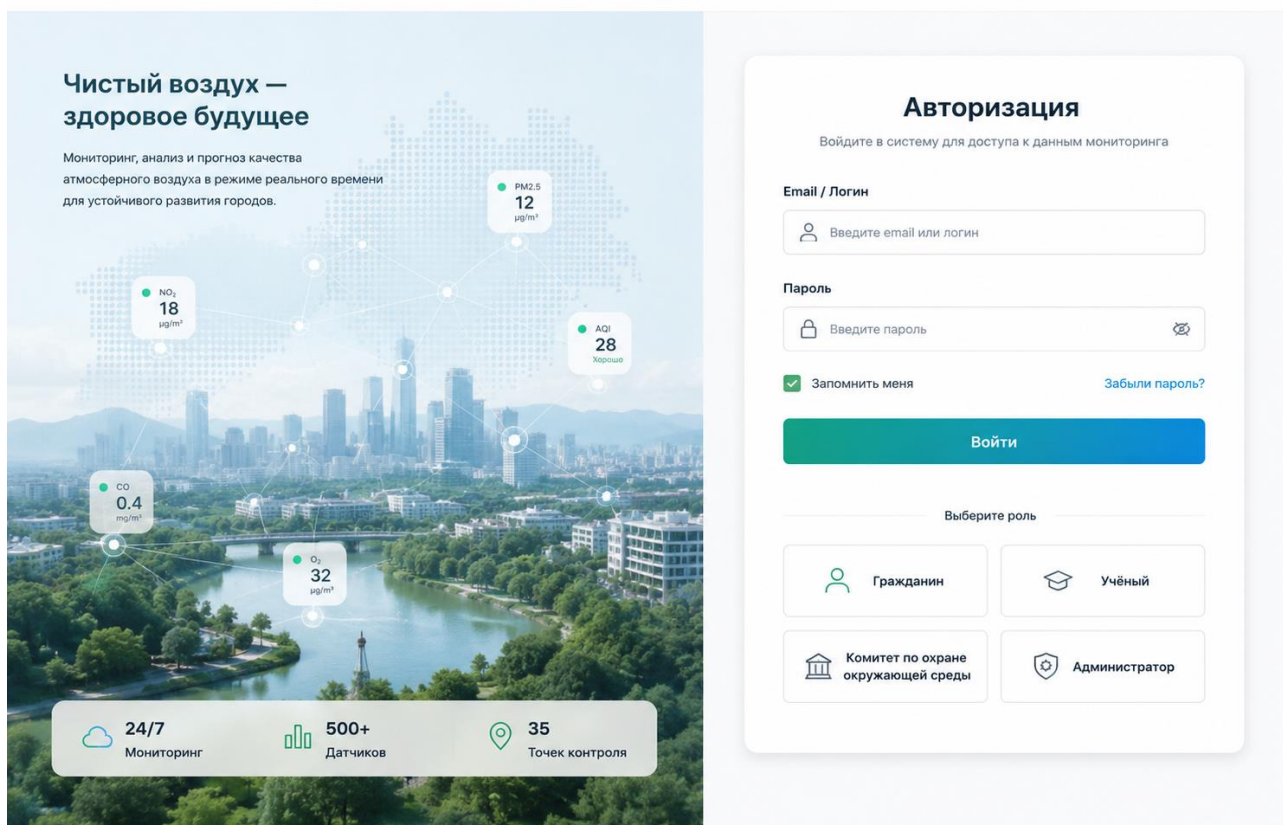


Рисунок 3.16. – Авторизация пользователя в системе

После прохождения авторизации пользователь получает доступ к системе в зависимости от выбранной роли: гражданин, учёный, представитель комитета по охране окружающей среды или администратор. Такое разделение позволяет реализовать ролевую модель доступа при которой каждая категория пользователей работает только с теми данными и функциями, которые соответствуют ее задачам. Например, гражданин может получать сведения о состоянии воздуха и предупреждения, учёный – анализировать расширенные данные и прогнозы, а администратор – управлять датчиками, базой данных и параметрами системы. Экран авторизации выполняет не только функцию входа, но и обеспечивает начальный уровень информационной безопасности системы.

Основным экраном системы является панель мониторинга, которая предназначена для оперативного отображения текущего состояния атмосферного воздуха. На данном экране сосредоточены ключевые показатели

качества воздуха, карта распределения датчиков, сведения о предупреждениях, динамика концентраций загрязняющих веществ и сводный статус экологической ситуации (рисунок 3.17).

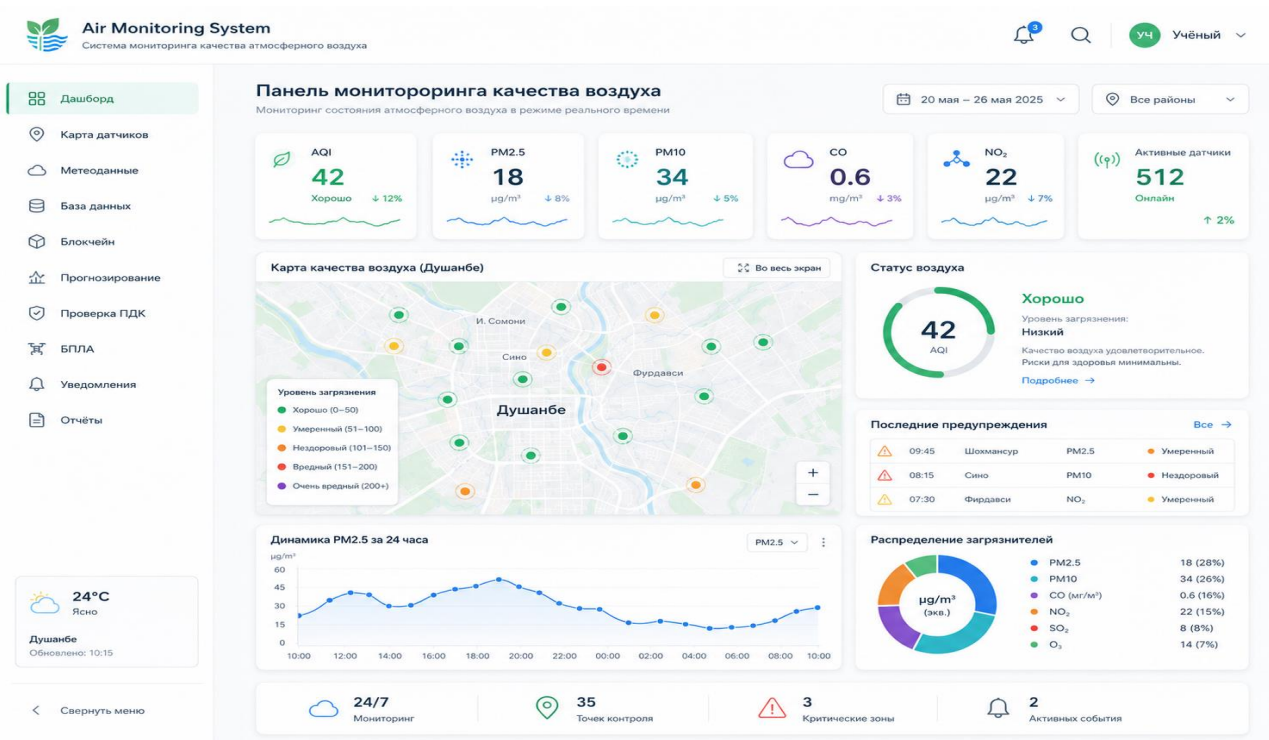


Рисунок 3.17. – Главная панель мониторинга качества воздуха

Представленный прототип показывает, что панель мониторинга выполняет функцию аналитического центра системы. Пользователь может одновременно видеть значения AQI, концентрации PM2.5, PM10, CO, NO₂, количество активных датчиков, карту качества воздуха по районам Душанбе и последние предупреждения о превышениях. Наличие графиков и карточек с показателями повышает наглядность восприятия информации и позволяет быстро определить текущий уровень риска, что особенно важен для экологического мониторинга в режиме реального времени, поскольку позволяет не только фиксировать состояние атмосферного воздуха, но и оперативно принимать управленческие решения. Требования к подобным экранным формам обобщены S. Few, указывающим, что «панель мониторинга должна уместать все ключевые показатели на одном экране без прокрутки» [209].

Для пространственного отображения сети мониторинга был разработан экран карты датчиков. Его основное назначение заключается в визуализации

расположения стационарных и мобильных измерительных устройств, а также в отображении их текущего статуса, уровня загрязнения и технического состояния (рисунок 3.18).

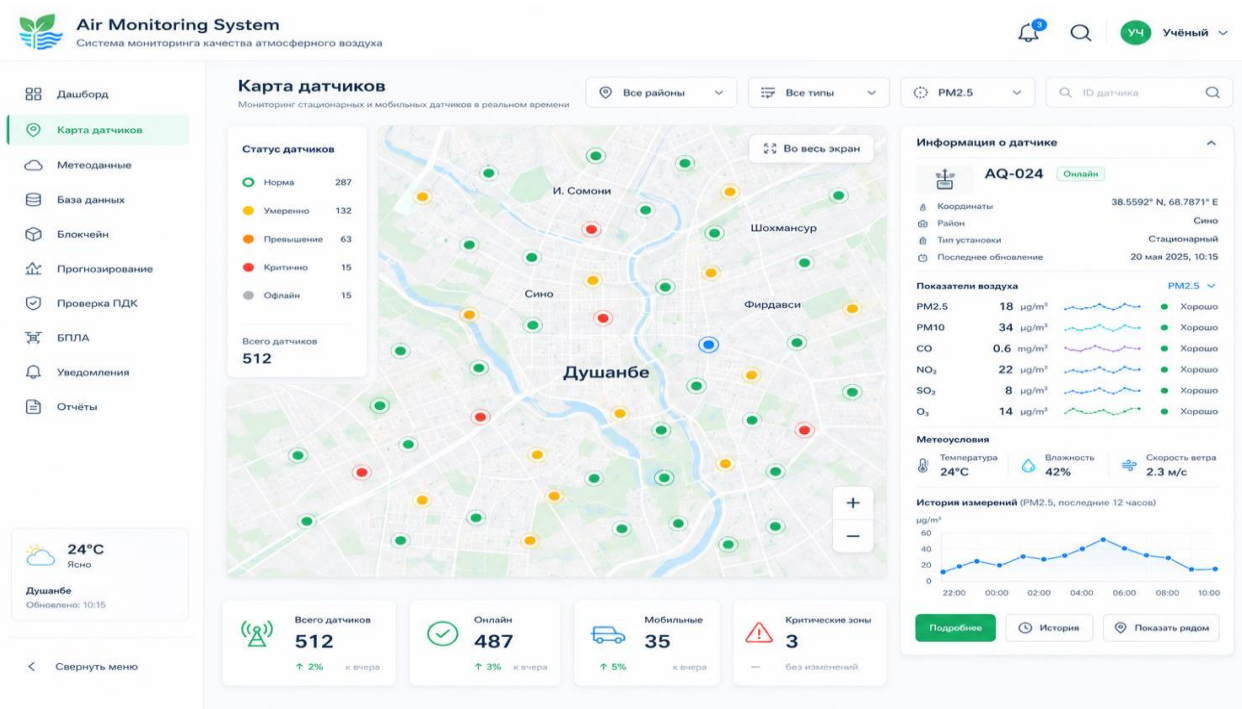


Рисунок 3.18. – Карта датчиков

На данном экране реализована возможность просмотра датчиков по районам города, фильтрации по типу устройства и контролируемому загрязнителю. Цветовая индикация позволяет быстро различать нормальные, умеренные, превышенные, критические и офлайн-состояния датчиков. Правая информационная панель содержит подробные сведения о выбранном датчике, где указаны координаты, район установки, тип устройства, время последнего обновления, концентрации загрязняющих веществ, метеоусловия и история измерений, что обеспечивает пространственную интерпретацию данных мониторинга и позволяет выявлять зоны повышенного экологического риска. Принципы такого представления сформулированы Е. R. Tufte, по которому «графика должна показывать данные, минимизируя долю неинформативных элементов изображения» [210].

Поскольку концентрация загрязняющих веществ в атмосферном воздухе зависит не только от источников выбросов, но и от метеорологических условий, в системе предусмотрен отдельный модуль работы с метеоданными, который

предназначен для отображения температуры, влажности, атмосферного давления, скорости и направления ветра, количества осадков и других погодных параметров (рисунок 3.19).



Рисунок 3.19. – Метеоданные

Разработанный экран позволяет сопоставлять изменения метеорологических параметров с динамикой загрязнения воздуха. Например, слабый ветер и повышенная влажность могут способствовать накоплению взвешенных частиц в приземном слое атмосферы, тогда как усиление ветра может приводить к рассеиванию загрязнителей либо, напротив, к переносу пыли. В прототипе предусмотрены графики динамики метеопараметров, карта метеостанций, роза ветров и блок оценки влияния погодных условий на уровень PM2.5., что повышает аналитическую ценность системы, поскольку позволяет учитывать природно-климатические факторы при интерпретации результатов мониторинга.

Для хранения, фильтрации и обработки результатов измерений был разработан экран базы данных, который отображает журнал экологических измерений, источники поступления информации, качество данных, количество записей, долю проверенных значений и сведения о превышениях нормативов (рисунок 3.20).

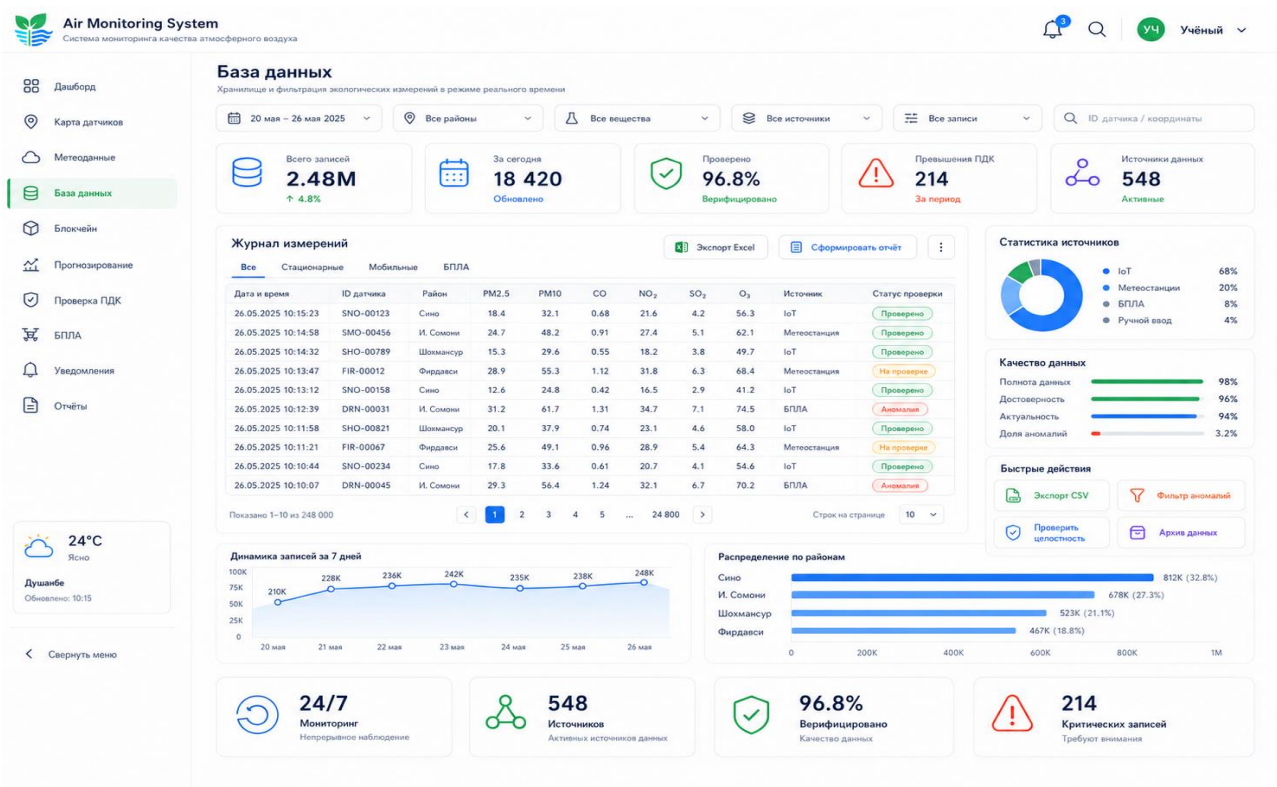


Рисунок 3.20. – Базы данных экологических данных о состоянии качества атмосферного воздуха

Вышепредставленный модуль АИС представляет собой информационное ядра системы, где представлены дата и время поступления данных, идентификатор датчика, район, концентрации загрязняющих веществ, источник данных и статус проверки. По требованию пользователю предусмотрена возможность экспорта данных в формате CSV и Excel. Фильтрация аномалий, проверки целостности и архивирования данных реализуемая в рамках данного модуля необходима для последующего статистического анализа, построения прогнозных моделей, формирования отчётов и подтверждения достоверности экологических наблюдений.

Включение модуля блокчейн-верификации обусловлено необходимостью повышения доверия к результатам экологического мониторинга качества атмосферного воздуха, что позволяет производить проверку целостности записей, фиксации транзакций, контроля блоков и подтверждения неизменности экологических данных (рисунок 3.21).

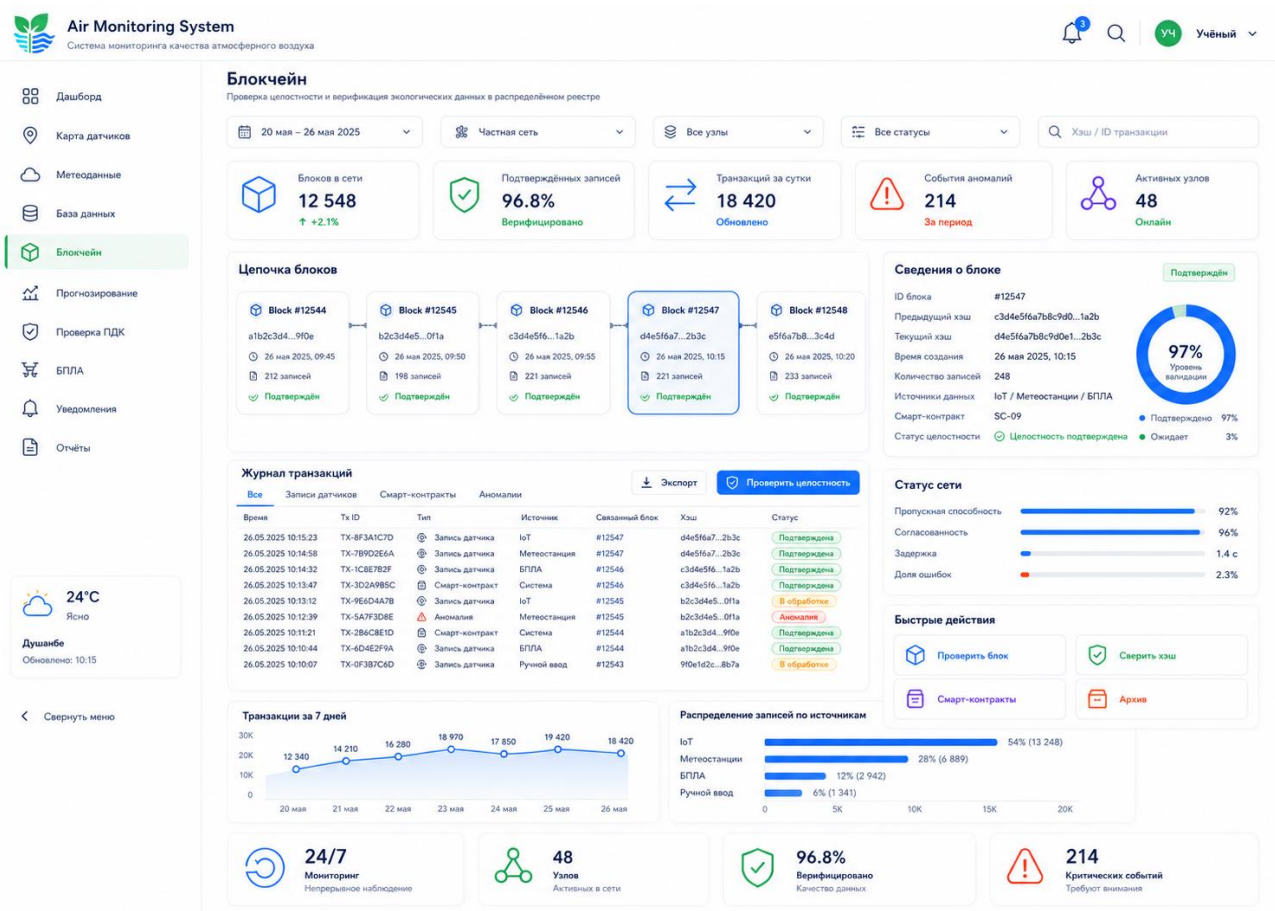


Рисунок 3.21. – Модуль блокчейн-верификации данных

Блокчейн механизм защищает результаты измерений от несанкционированного изменения и обеспечивает прозрачность происхождения данных, что важно в условиях экологического контроля, где достоверность информации имеет принципиальное значение для принятия административных, научных и общественных решений. Реализация данного модуля является предпосылкой для создания надежной базы всей информационной системы и формирует основу для автоматизированного реагирования на превышение концентрации загрязняющих веществ через смарт-контракты.

На основе исторических данных, текущих измерений и метеорологических параметров в модуле прогнозирования качества атмосферного воздуха предусмотрена возможность оценки будущих концентраций загрязняющих, где в качестве математического аппарата применяются алгоритмы машинного обучения (рисунок 3.22).



Рисунок 3.22. – Прогнозный модуль АИС экологического мониторинга

В прототипе прогнозного модуля отражена возможность прогноза значений PM2.5 на сутки, оценки вероятности превышения ПДК и уровня риска. Точность каждого из примененных алгоритмов приводится в соответствующем блоке прогнозного модуля, что позволяет выбрать наиболее эффективный алгоритм для конкретных условий мониторинга. Определение системой вероятных зон риска переводит его из режима пассивного наблюдения в режим упреждающего экологического контроля.

Для автоматического выявления превышений нормативных значений загрязняющих веществ был разработан экран проверки ПДК, что обеспечивает контроль концентраций PM2.5, PM10, CO, NO₂, SO₂ и O₃ относительно установленных предельно допустимых значений и выбранных нормативных критериев (рисунок 3.23).



Рисунок 3.23. – Модуль проверки ПДК загрязняющих веществ

Данный экран позволяет анализировать превышения по районам, веществам, источникам данных и временным периодам. На карте отображаются зоны с различным уровнем превышения, а в таблицах представлены текущие значения, нормативы, кратность превышения и статус ситуации. Отдельный блок рекомендаций системы показывает возможные действия к числу которых относятся усиление мониторинга, формирование уведомлений для населения, передача событий в смарт-контракт и решение о запуске БПЛА. Экран проверки ПДК является связующим звеном между аналитическим модулем и модулем реагирования.

Для автоматизации действий при подтвержденном превышении ПДК был разработан прототип экрана смарт-контракта, что отражает логику автоматического выполнения заданных условий, при которых система инициирует уведомления, регистрацию события в блокчейне, формирование отчёта и запуск дополнительных средств мониторинга (рисунок 3.24).

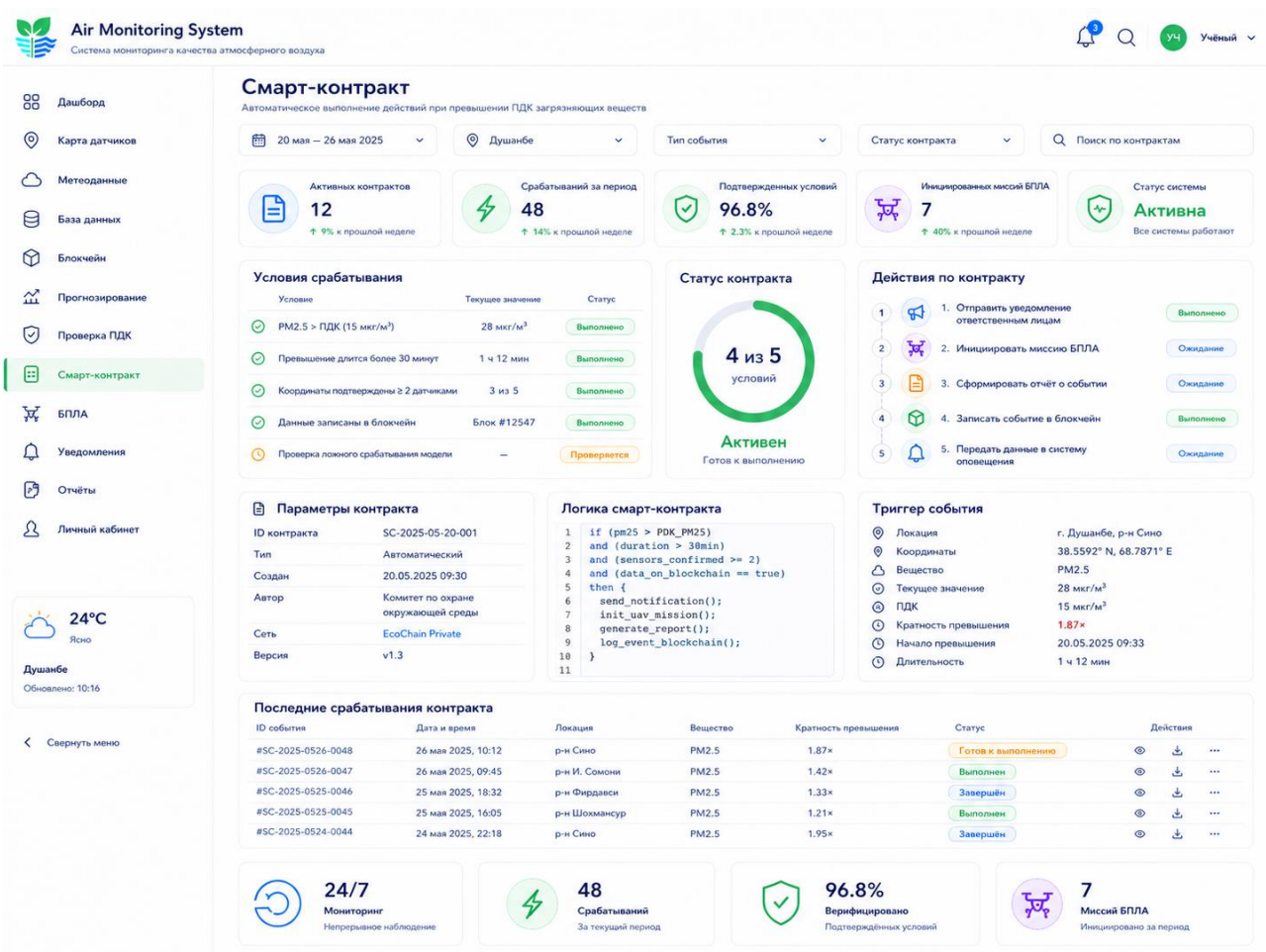


Рисунок 3.24. – Модуль реализации смарт-контракта экологического реагирования

Экран смарт-контракта показывает условия срабатывания, статус выполнения, параметры контракта, программную логику, триггер события и журнал последних срабатываний. В качестве условия может быть задано превышение концентрации PM2.5 выше ПДК, длительность превышения более 30 минут, подтверждение события несколькими датчиками и фиксация данных в блокчейне. Если заданные условия выполняются, смарт-контракт инициирует последовательность действий, который предусматривает отправку уведомления ответственным лицам, запуск миссии БПЛА, формирование отчёта и запись события в распределённый реестр, что позволяет минимизировать задержки между обнаружением опасной ситуации и началом реагирования.

Для уточнения данных в зоне повышенного загрязнения в системе предусмотрен модуль управления беспилотными летательными аппаратами. Он предназначен для запуска миссий БПЛА, контроля маршрута, сбора

дополнительных измерений и передачи данных в систему мониторинга (рисунок 3.25)

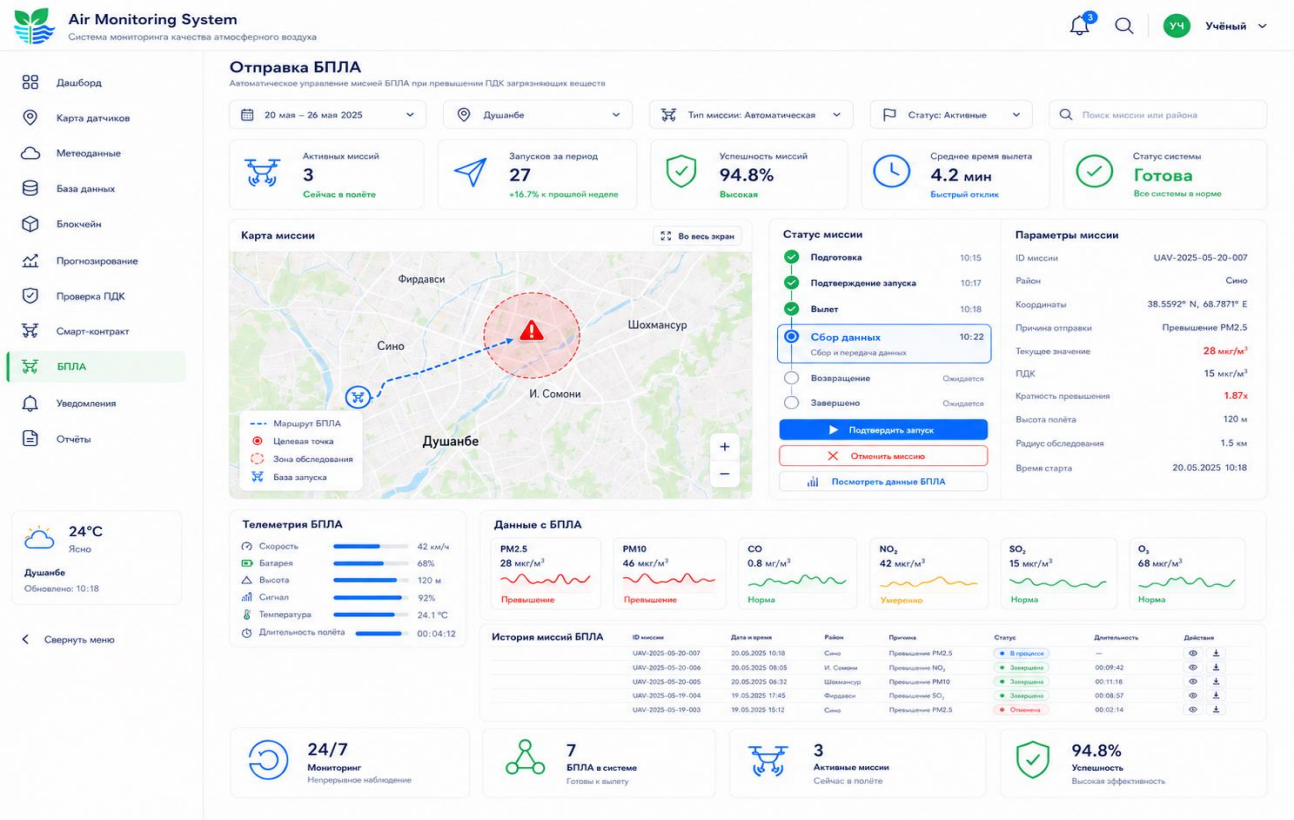


Рисунок 3.25. – Модуль отправки БПЛА

На экране отображается карта миссии, маршрут полёта, целевая зона обследования, статус выполнения этапов, параметры миссии и телеметрия БПЛА. Использование БПЛА позволяет оперативно получать дополнительные данные в районах, где зафиксировано превышение ПДК и имеются сомнения в достоверности стационарных измерений.

Необходимость реализации модуля отправки уведомлений обусловлена необходимостью своевременного информирования пользователей и ответственных структур, которая предназначена для отображения критических сообщений, системных событий, предупреждений для населения и статусов доставки оповещений (рисунок 3.26).

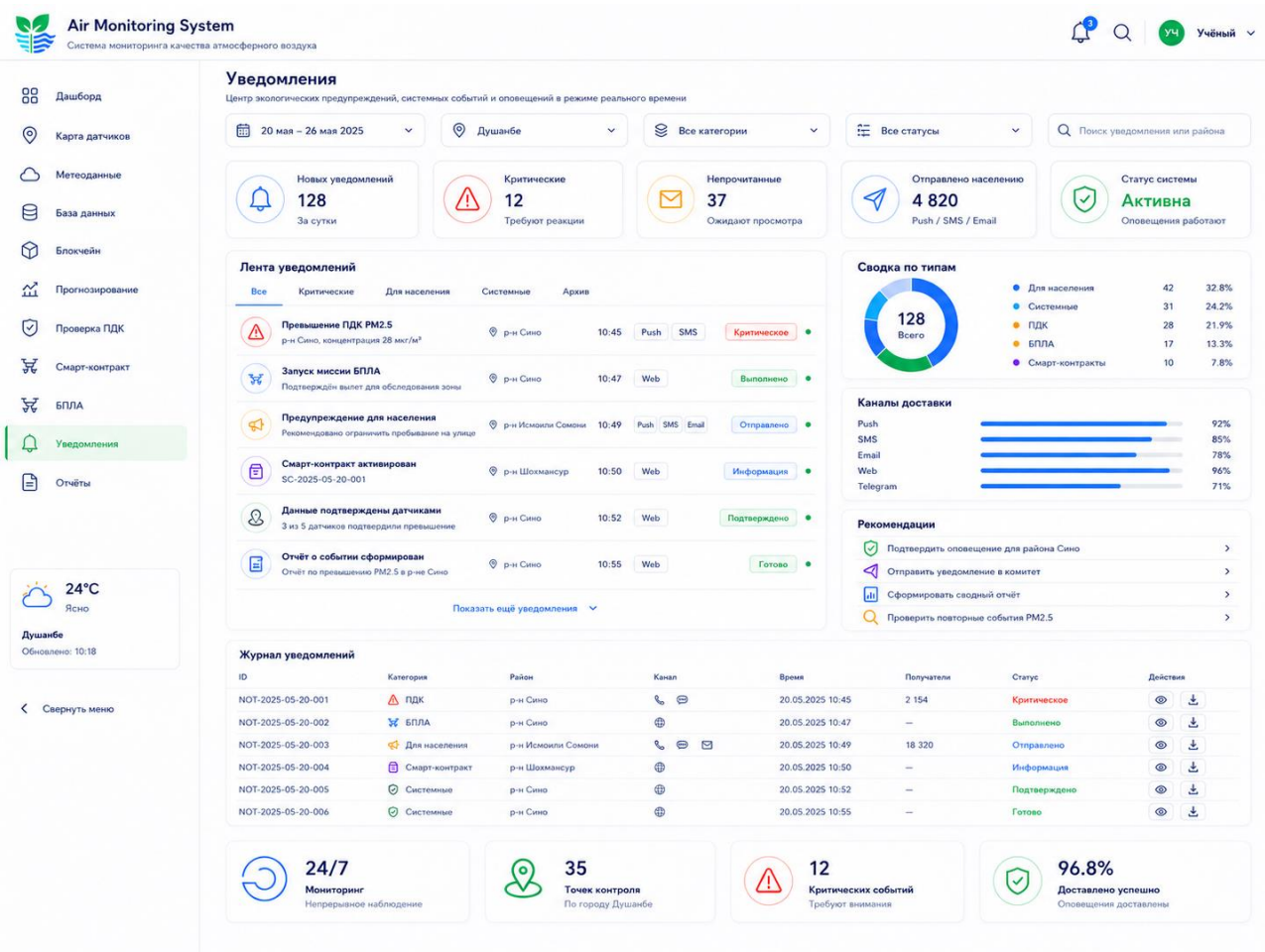


Рисунок 3.26. – Модуль отправки и получения уведомлений

В модуле уведомлений отображаются сообщения о превышении ПДК, запуске миссии БПЛА, активации смарт-контракта, подтверждении данных датчиками и формировании отчётов, что обеспечивает контроль информационного взаимодействия между системой, населением и ответственными органами. Наличие такого модуля повышает практическую значимость системы, поскольку экологический мониторинг должен быть связан не только с накоплением данных, но и с оперативным предупреждением заинтересованных сторон.

Для аналитического обобщения результатов мониторинга был разработан экран отчётов, который предназначен для формирования сводных, недельных, месячных и сравнительных отчетов по качеству атмосферного воздуха, превышениям ПДК, структуре загрязнителей и районам города (рисунок 3.27).



Рисунок 3.27. – Модуль выгрузки отчетов

Экран отчётов позволяет визуализировать динамику PM2.5 за выбранный период, сравнивать районы города, анализировать структуру загрязнителей и формировать ключевые выводы. В системе предусмотрена возможность выгрузки отчётов в PDF и Excel, что важно для научного анализа, административной отчётности и последующего документирования результатов мониторинга. Представленный прототип показывает, что отчётный модуль объединяет данные из сенсорной сети, базы данных, блока проверки ПДК и аналитического модуля, обеспечивая комплексную оценку экологической ситуации.

Для управления профилем, настройками доступа и персональными параметрами системы был разработан экран личного кабинета, что обеспечивает настройку уведомлений, выбор предпочтительного района мониторинга, управление языком интерфейса, форматом отчётов и параметрами безопасности (рисунок 3.28).

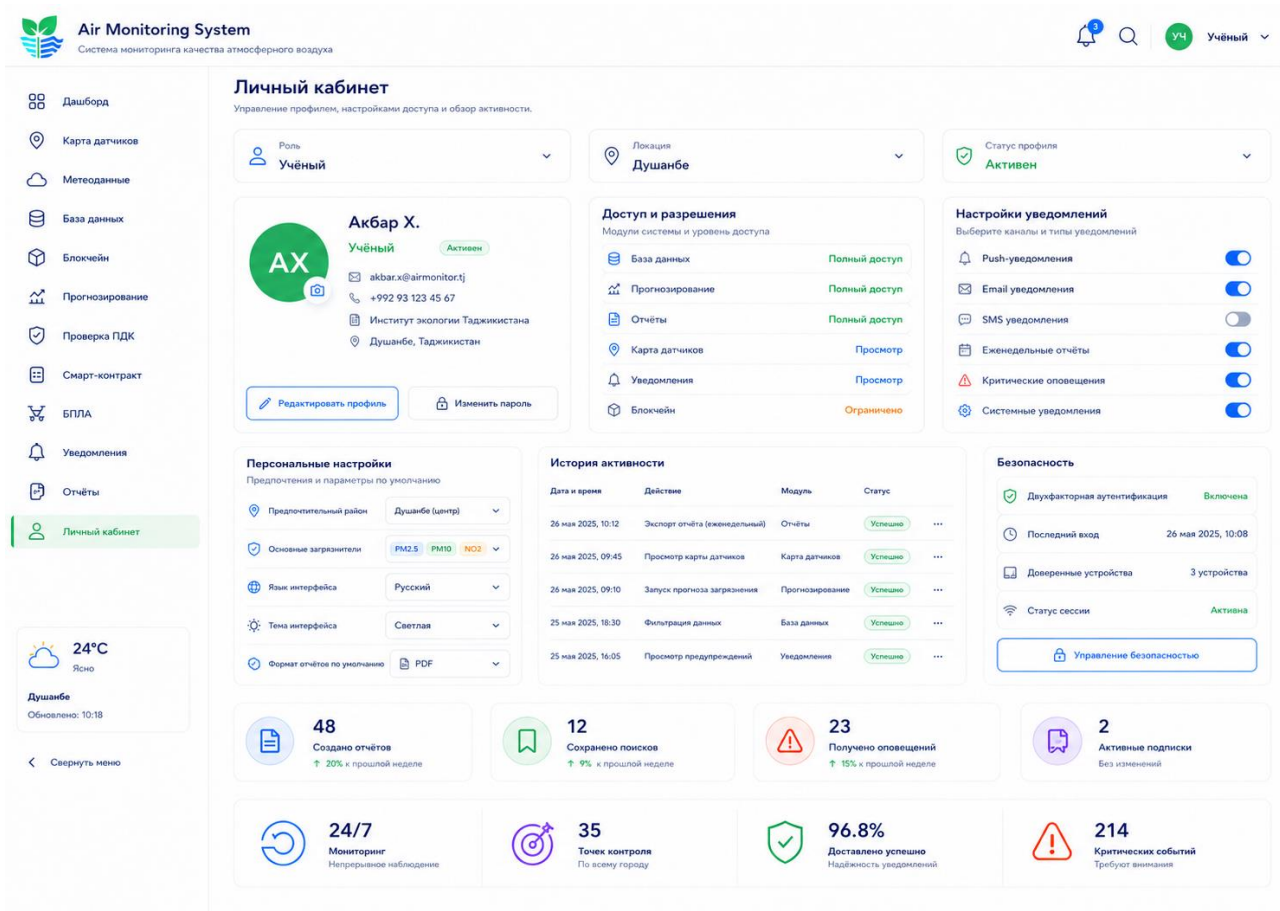


Рисунок 3.28. – Личный кабинет пользователя системы

Экран личного кабинета отражает персонализированный уровень работы с системой, что поддерживает принципы информационной безопасности за счет разграничения прав доступа к возможностям системы.

Целостная структура АИС мониторинга качества атмосферного воздуха представлена 13 разработанными прототипами, которые в совокупности формируют единую цифровую платформу, что обеспечивает полный цикл работы с экологическими данными. В предложенном интерфейсном решении сочетается аналитической наглядность и управленческой функциональность, которая выражается как доступу к текущим значениям загрязнителей, так и к пространственной карте датчиков, прогнозам, метеофакторам, журналу событий, блокчейн-проверке и рекомендациям системы, что позволяет рассматривать разработанный прототип как основу для дальнейшей программной реализации информационной системы экологического мониторинга в условиях города Душанбе. Экранные формы, полученные в ходе прототипирования могут быть

использованы при создании веб-приложения, интеграции с базой данных, подключении сенсорных устройств, разработке алгоритмов прогнозирования и реализации механизмов автоматического реагирования на превышение ПДК, что подтверждает реализуемость предложенной архитектуры и позволяет уточнить состав основных модулей системы.

Выводы по третьей главе

- Разработана архитектура распределённой информационной системы мониторинга качества атмосферного воздуха (РИСМКАВ), построенная на концепции киберфизической системы и реализующая полный цикл обработки экологических данных.

- Система организована по модульному принципу и включает модули сбора данных, обработки и хранения, аналитики и прогнозирования, контроля и реагирования, а также взаимодействия с пользователями; архитектура защищена малым патентом Республики Таджикистан на изобретение.

- Предложено алгоритмическое обеспечение системы: ансамблевое прогнозирование на основе моделей Random Forest, Gradient Boosting и LSTM с адаптивными весами, алгоритм обнаружения аномалий по прогнозному доверительному интервалу и алгоритм слияния данных от разнородных источников с учётом коэффициентов качества и пространственно-временной релевантности, что является существенным отличительным признаком решения.

- Обоснована реализация блокчейн-системы с гибридным хранением данных, при котором исходные массивы сохраняются в централизованной базе, а их верификационные записи фиксируются в блокчейне, что обеспечивает доказуемую целостность и неизменяемость измерений. Предложены смарт-контракт для автоматического реагирования на превышение ПДК и метод адаптивного построения маршрута БПЛА по показателю риска.

- Функционирование системы формализовано в виде четырёх взаимосвязанных бизнес-процессов (мониторинг, оценка состояния, прогнозирование, управляющее воздействие), образующих замкнутый цикл управления.

- Выделены 20 функциональных и 7 нефункциональных требований и построена трассировочная таблица, связывающая требования с модулями и компонентами системы.

- Построены диаграммы вариантов использования (9 акторов, 21 вариант использования, объединённых в 5 функциональных пакетов), диаграмма классов (31 класс с ядром Measurement) и восемь диаграмм последовательности (SD-01...SD-08), образующих формальную динамическую модель функционирования системы и описывающих полный цикл от приёма измерений до управляющих воздействий.

- Разработан комплект из 13 интерактивных прототипов пользовательского интерфейса, формирующих единую цифровую платформу и подтверждающих реализуемость предложенной архитектуры.

- Обоснована целостная проектная модель автоматизированной информационной системы экологического мониторинга, обеспечивающая переход от описательного (реактивного) мониторинга к проактивному управлению экологической ситуацией в условиях города Душанбе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что совершенствование экологического мониторинга качества атмосферного воздуха в городе Душанбе требует перехода к комплексной цифровой системе, обеспечивающей непрерывный сбор, обработку, анализ и прогнозирование экологических данных; существующая наблюдательная сеть не обеспечивает необходимой пространственно-временной детализации и не содержит развитого прогностического блока [1-А, 2-А].

2. Показано, что существующие подходы к измерению загрязняющих веществ атмосферного воздуха обладают различными преимуществами и ограничениями, поэтому наиболее эффективной является их интеграция в единую информационно-аналитическую систему, объединяющую стационарные, мобильные, сенсорные и дистанционные источники данных [2-А].

3. Выявлено, что качество атмосферного воздуха в условиях города Душанбе формируется под воздействием совокупности антропогенных и природно-климатических факторов; экспериментально установлены суточная динамика концентраций $PM_{2.5}$ (среднее $49,4 \text{ мкг/м}^3$ в городской среде против $8,8 \text{ мкг/м}^3$ в воздушном бассейне реки Варзоб) и более чем восьмикратный рост среднего уровня загрязнения в период пылевого вторжения – с $10,2$ до $85,4 \text{ мкг/м}^3$ [4-А, 5-А, 6-А].

4. Обоснована применимость оптических датчиков типа SPS30 в системах мониторинга качества атмосферного воздуха: достоверные результаты достигаются при среднечасовом усреднении данных ($R^2 = 0,86$; $RMSE = 3,38 \text{ мкг/м}^3$), а учёт относительной влажности в калибровочной модели дополнительно повышает точность ($R^2 = 0,88$; $RMSE = 3,05 \text{ мкг/м}^3$); при этом датчик применим только как вспомогательное измерительное средство при периодической поверке по референсным станциям.

5. Статистическим анализом многолетнего временного ряда из 2269 наблюдений установлены стабильно высокий уровень загрязнения (среднее $120,9 \text{ мкг/м}^3$ при медиане $113,0 \text{ мкг/м}^3$), ненормальность и правосторонняя

асимметрия распределения, доминирующая роль сезонной компоненты (37,3 % дисперсии) с максимумами в ноябре – январе, инерционный характер загрязнения ($ACF(1) = 0,727$) и стационарность ряда, что создаёт методологическую основу для краткосрочного прогнозирования на горизонте 1–7 суток.

6. Обоснована необходимость применения технологий Индустрии 4.0 для повышения эффективности экологического мониторинга, включая Интернет вещей, сенсорные сети, интеллектуальную обработку данных, геоинформационный анализ, блокчейн-верификацию и автоматизированное формирование уведомлений [3-А, 5-А].

7. Разработана архитектура автоматизированной информационной системы мониторинга качества атмосферного воздуха, обеспечивающая связь между измерительными устройствами, базой данных, аналитическим модулем, прогнозной подсистемой, модулем контроля ПДК, системой уведомлений и пользовательскими интерфейсами; на архитектуру получен малый патент Республики Таджикистан на изобретение [3-А, 7-А, 8-А].

8. Предложены алгоритм слияния данных разнородных источников с учётом коэффициентов качества и пространственно-временной релевантности, а также логика автоматизированного реагирования на превышение ПДК, что позволяет повысить оперативность выявления опасных ситуаций и обеспечить доказуемую целостность экологических измерений [8-А].

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предложенную архитектуру РИСМКАВ и комплект проектной документации (требования, трассировочная таблица, диаграммы классов и последовательности, прототипы интерфейсов) рекомендуется использовать при программной реализации городской автоматизированной системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха города Душанбе и других городов с аналогичными природно-климатическими условиями;

Комитету охраны окружающей среды при Правительстве Республики Таджикистан и Агентству по гидрометеорологии рекомендуется развивать наблюдательную сеть на основе интеграции стационарных постов с распределенными сетями низкобюджетных оптических датчиков при обязательном среднечасовом усреднении данных, влажностной калибровке и периодической поверке по референсным станциям;

При интерпретации данных мониторинга и планировании природоохранных мероприятий рекомендуется учитывать установленные закономерности сезонной динамики PM_{2.5} (максимумы в ноябре–январе), инерционный характер загрязнения и определяющую роль пылевых вторжений, а прогностический блок-системы строить на моделях временных рядов и машинного обучения с лаговыми и метеорологическими признаками.

Результаты исследования рекомендуется использовать в учебном процессе высших учебных заведений при преподавании дисциплин «Экология» и «Безопасность жизнедеятельности».

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением сети сенсорных наблюдений, накоплением массивов экспериментальных данных, повышением точности прогнозных моделей, интеграцией спутниковой информации, развитием ГИС-визуализации, совершенствованием алгоритмов оценки экологических рисков и практической апробацией разработанной системы в реальных условиях города Душанбе.

Список литературы

1. Всемирная организация здравоохранения. Загрязнение атмосферного воздуха : информационный бюллетень [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (дата обращения: 31.03.2023).
2. Effects of air pollution on health: a mapping review of systematic reviews and meta-analyses / F. H. Dominski, J. H. Branco, G. Buonanno [et al.] // *Environmental Research*. – 2021. – Vol. 201. – P. 111487. – DOI: 10.1016/j.envres.2021.111487.
3. Development and validation of a UAV based system for air pollution measurements / T. F. Villa, F. Salimi, K. Morton [et al.] // *Sensors*. – 2016. – Vol. 16, № 12. – P. 2202. – DOI: 10.3390/s16122202.
4. Всемирная организация здравоохранения. Глобальные рекомендации ВОЗ по качеству воздуха, касающиеся твёрдых частиц (ТЧ_{2,5} и ТЧ₁₀), озона, двуокиси азота, двуокиси серы и окиси углерода [Электронный ресурс]. – 2021. – URL: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345334/9789240035409-rus.pdf> (дата обращения: 31.03.2023).
5. Оценка качества атмосферного воздуха в разных странах (обзор) / М. В. Поздняков, С. И. Мазиллов, С. В. Райкова [и др.] // *Экология человека*. – 2023. – Т. 30, № 5. – С. 325–339. – DOI: 10.17816/humeco456406.
6. Анализ мониторинга качества воздуха в Центральной Азии : аналитический доклад. – Казахстан, 2021. – 17 с.
7. The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities / P. Kumar, L. Morawska, C. Martani [et al.] // *Environment International*. – 2015. – Vol. 75. – P. 199–205. – DOI: 10.1016/j.envint.2014.11.019.
8. Агентство по гидрометеорологии Комитета по охране окружающей среды при Правительстве Республики Таджикистан [Электронный

- ресурс]. – URL: <https://www.meteo.tj/ru/environmental-monitoring> (дата обращения: 28.03.2026).
9. Станция наблюдения атмосферы. Посольство США в г. Душанбе [Электронный ресурс]. – URL: <https://aqicn.org/city/tajikistan/dushanbe/us-embassy/ru/> (дата обращения: 28.03.2026).
 10. Израэль, Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды / Ю. А. Израэль. – 2-е изд. – М. : Гидрометеиздат, 1984. – 560 с.
 11. Об охране атмосферного воздуха : Закон Республики Таджикистан от 28 декабря 2012 г. № 915 [Электронный ресурс]. – URL: <https://shorturl.at/ScCkD> (дата обращения: 28.03.2026).
 12. Государственная экологическая программа Республики Таджикистан на 2023–2028 годы. – Душанбе, 2023. – 24 с.
 13. Управление качеством воздуха в Республике Таджикистан / Всемирный банк. – Вашингтон : Всемирный банк, 2023.
 14. Программа ускоренной индустриализации Республики Таджикистан на 2020–2025 годы. – Душанбе, 2020. – 138 с.
 15. План действий «Зелёный город» (ПДЗГ), Душанбе / AECOM Limited. – 2022.
 16. Национальный план действий Республики Таджикистан по предупреждению и смягчению последствий песчаных пыльных бурь на 2022–2030 годы. – Душанбе ; Алматы, 2021. – 70 с.
 17. Хакдод, М. М. Современные научные подходы к решению экологических проблем в условиях Таджикистана / М. М. Хакдод, О. Х. Амирзода, А. М. Хакдодов // Водные ресурсы, энергетика и экология. – Душанбе, 2023. – № 3 (3). – С. 193–200.
 18. Data multi-scale decomposition strategies for air pollution forecasting: a comprehensive review / H. Liu, S. Yin, C. Chen, Z. Duan // Journal of Cleaner

- Production. – 2020. – Vol. 277. – P. 124023. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124023.
19. Исхаков, А. Ю. Концепция мультиагентной системы мониторинга «умного города» / А. Ю. Исхаков, А. О. Исхакова, С. К. Диане // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2018. – Вып. 62. – С. 196–202.
 20. Форрестер, Дж. Мировая динамика / Дж. Форрестер ; пер. с англ. – М. : АСТ ; СПб. : Terra Fantastica, 2003. – 379 с.
 21. Медоуз, Д. Пределы роста. 30 лет спустя / Д. Медоуз, Й. Рандерс, Д. Медоуз ; пер. с англ. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 358 с.
 22. ГОСТ Р 59059–2020. Контроль загрязнения атмосферного воздуха. Термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2020. – 12 с.
 23. World Health Organization. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. – Geneva : World Health Organization, 2021. – 273 p. – URL: <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/551b515e-2a32-4e1a-a58c-cdaecd395b19/content> (дата обращения: 17.03.2024).
 24. U.S. Environmental Protection Agency. NAAQS Table: National Ambient Air Quality Standards for Criteria Pollutants [Электронный ресурс]. – Washington, DC : U.S. EPA, 2025. – URL: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table> (дата обращения: 17.03.2024).
 25. Directive (EU) 2024/2881 of the European Parliament and of the Council of 23 October 2024 on ambient air quality and cleaner air for Europe (recast) // Official Journal of the European Union. – 2024. – OJ L, 2024/2881, 20.11.2024. – URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/2881/oj/eng> (дата обращения: 17.03.2024).
 26. Vélez-Guerrero, A. C. The evolution of air quality monitoring: measurement techniques and instruments / A. C. Vélez-Guerrero, M. Callejas-Cuervo, A. C.

- Alarcón-Aldana // Open Access Article. – 2023. – DOI: 10.55463/issn.1674-2974.50.5.14.
27. The changing paradigm of air pollution monitoring / E. G. Snyder, T. H. Watkins, P. A. Solomon [et al.] // Environmental Science & Technology. – 2013. – Vol. 47, № 20. – P. 11369–11377. – DOI: 10.1021/es4022602.
 28. Shin, S. E. Analysis of the measurement difference for the PM10 concentrations between beta-ray absorption and gravimetric methods at Gosan / S. E. Shin, C. H. Jung, Y. P. Kim // Aerosol and Air Quality Research. – 2011. – Vol. 11. – P. 846–853. – DOI: 10.4209/aaqr.2011.04.0041.
 29. Fu, L. A two-step approach for relating tapered element oscillating microbalance and dichotomous air sampler PM2.5 measurements / L. Fu, T. Nunifu, B. Leung // Journal of the Air & Waste Management Association. – 2014. – Vol. 64, № 10. – P. 1195–1203. – DOI: 10.1080/10962247.2014.934484.
 30. Jimenez, A. M. Chemiluminescence methods: present and future / A. M. Jimenez, M. J. Navas // Grasas y Aceites. – 2002. – Vol. 53, № 1. – P. 64–75. – DOI: 10.3989/gya.2002.v53.i1.290.
 31. Wang, Y. Laboratory evaluation and calibration of three low-cost particle sensors for particulate matter measurement / Y. Wang, J. Li, H. Jing [et al.] // Aerosol Science and Technology. – 2015. – Vol. 49, № 11. – P. 1063–1077. – DOI: 10.1080/02786826.2015.1100710.
 32. Rai, A. C. End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring / A. C. Rai, P. Kumar, F. Pilla [et al.] // Science of the Total Environment. – 2017. – Vol. 607–608. – P. 691–705. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.266.
 33. Loh, M. How sensors might help define the external exposome / M. Loh, D. Sarigiannis, A. Gotti [et al.] // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2017. – Vol. 14, № 4. – DOI: 10.3390/ijerph14040434.

34. Karagulian, F. Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring / F. Karagulian, M. Barbieri, A. Kotsev [et al.] // *Atmosphere*. – 2019. – Vol. 10, № 9. – P. 506. – DOI: 10.3390/atmos10090506.
35. Barakeh, Z. Development of a normalized multi-sensors system for low cost on-line atmospheric pollution detection / Z. Barakeh, P. Breuil, N. Redon [et al.] // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2017. – Vol. 241. – P. 1235–1243. – DOI: 10.1016/j.snb.2016.10.006.
36. AirSense: opportunistic crowd-sensing based air quality monitoring system for smart city / J. Dutta, F. Gazi, S. Roy, C. Chowdhury // 2016 IEEE Sensors, Orlando, USA, 30 October – 03 November 2016. – 2017. – DOI: 10.1109/ICSENS.2016.7808730.
37. songkiet, P. Converting aKhungir quality monitoring low cost sensor data to digital value via mobile interface / P. Khungsongkiet, E. Boonchieng // 2016 9th Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON), Luang Prabang, Laos, 07–09 December 2016. – 2016. – DOI: 10.1109/BMEiCON.2016.7859628.
38. Koehler, K. A. New methods for personal exposure monitoring for airborne particles / K. A. Koehler, T. M. Peters // *Current Environmental Health Reports*. – 2015. – Vol. 2, № 4. – P. 399–411. – DOI: 10.1007/s40572-015-0070-z.
39. Thomas, A. Correlations between gravimetry and light scattering photometry for atmospheric aerosols / A. Thomas, J. Gebhart // *Atmospheric Environment*. – 1994. – Vol. 28, № 5. – P. 935–938. – DOI: 10.1016/1352-2310(94)90251-8.
40. Metal oxide semi-conductor gas sensors in environmental monitoring / G. F. Fine, L. M. Cavanagh, A. Afonja, R. Binions // *Sensors*. – 2010. – Vol. 10, № 6. – P. 5469–5502. – DOI: 10.3390/s100605469.

41. Aleixandre, M. Review of small commercial sensors for indicative monitoring of ambient gas / M. Aleixandre, M. Gerboles // Chemical Engineering Transactions. – 2012. – Vol. 30.
42. Piedrahita, R. The next generation of low-cost personal air quality sensors for quantitative exposure monitoring / R. Piedrahita, Y. Xiang, N. Masson [et al.] // Atmospheric Measurement Techniques. – 2014. – Vol. 7, № 10. – P. 3325–3336. – DOI: 10.5194/amt-7-3325-2014.
43. Development of an unmanned aerial vehicle UAV for air quality measurement in urban areas / P. Y. Haas, C. Balistreri, P. Pontelandolfo [et al.] // 32nd AIAA Applied Aerodynamics Conference. – 2014. – P. 1–9. – DOI: 10.2514/6.2014-2272.
44. Locating industrial VOC sources with aircraft observations / P. Toscano, B. Gioli, S. Dugheri [et al.] // Environmental Pollution. – 2011. – Vol. 159, № 5. – P. 1174–1182. – DOI: 10.1016/j.envpol.2011.02.013.
45. A lightweight observation system for atmospheric carbon dioxide concentration using a small unmanned aerial vehicle / T. Watai, T. Machida, N. Ishizaki, G. Inoue // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. – 2006. – Vol. 23, № 5. – P. 700–710. – DOI: 10.1175/JTECH1866.1.
46. A small, lightweight multipollutant sensor system for ground-mobile and aerial emission sampling from open area sources / X. Zhou, J. Aurell, W. Mitchell [et al.] // Atmospheric Environment. – 2017. – Vol. 154. – P. 31–41. – DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.01.029.
47. Methods of spatial modeling for evaluation of air quality based on UAV / F. Mingireanu, S. Grigorescu, C. Cepisca [et al.] // Recent Advances in Energy and Environmental Management. – 2013. – P. 25–28. – URL: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2013/Rhodes/ENVIR/ENVIR-02.pdf> (дата обращения: 17.03.2024).

48. Review of sensors for air quality monitoring / F. Karagulian, M. Barbieri, M. Gerboles [et al.]. – Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2019.
49. Chloe, C. Over 6,000 cities now monitor air quality, WHO reveals [Электронный ресурс] / C. Chloe // Air Quality News. – 2022. – URL: <https://airqualitynews.com/2022/04/04/over-6000-cities-now-monitor-air-quality-who-reveals> (дата обращения: 24.03.2026).
50. World Air Quality Index. Worldwide Air Quality Monitoring Data Coverage [Электронный ресурс]. – URL: <https://aqicn.org/sources/> (дата обращения: 24.03.2026).
51. Hua, Z. A full-coverage daily average PM_{2.5} retrieval method with two-stage IVW fused MODIS C6 AOD and two-stage GAM model / Z. Hua, W. Sun, G. Yang, Q. Du // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11, № 13. – P. 1558. – DOI: 10.3390/rs11131558.
52. Ford, B. Exploring the uncertainty associated with satellite-based estimates of premature mortality due to exposure to fine particulate matter / B. Ford, C. L. Heald // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2016. – Vol. 16, № 5. – P. 3499–3523. – DOI: 10.5194/acp-16-3499-2016.
53. Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth / A. van Donkelaar, R. V. Martin, M. Brauer [et al.] // Environmental Health Perspectives. – 2010. – Vol. 118, № 6. – P. 847–855. – DOI: 10.1289/ehp.0901623.
54. An overview of mesoscale aerosol processes, comparisons, and validation studies from DRAGON networks / B. N. Holben, J. Kim, I. Sano [et al.] // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2018. – Vol. 18, № 2. – P. 655–671. – DOI: 10.5194/acp-18-655-2018.
55. Sorek-Hamer, M. Review: strategies for using satellite-based products in modeling PM_{2.5} and short-term pollution episodes / M. Sorek-Hamer, R.

- Chatfield, Y. Liu // *Environment International*. – 2020. – Vol. 144. – P. 106057. – DOI: 10.1016/j.envint.2020.106057.
56. Белихов, А. Б. Моделирование распространения атмосферных загрязнений с помощью системы SILAM / А. Б. Белихов, Д. Л. Леготин, А. К. Сухов // *Вестник КГУ им. Н. А. Некрасова*. – 2014. – № 1. – С. 7–11.
57. Беляев, Н. Н. Численные модели для прогноза загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта / Н. Н. Беляев // *Наука та прогрес транспорту*. – 2016. – № 6. – С. 25–32.
58. Future air pollution in the shared socioeconomic pathways / S. Rao, Z. Klimont, S. J. Smith [et al.] // *Global Environmental Change*. – 2017. – Vol. 42. – P. 346–358. – DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.012.
59. On the limit to the accuracy of regional-scale air quality models / S. T. Rao, H. Luo, M. Astitha [et al.] // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2020. – Vol. 20, № 3. – P. 1627–1639. – DOI: 10.5194/acp-20-1627-2020.
60. Methods for reducing biases and errors in regional photochemical model outputs for use in emission reduction and exposure assessments / P. S. Porter, S. T. Rao, C. Hogrefe [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2015. – Vol. 112. – P. 178–188. – DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.04.039.
61. Tella, A. GIS-based air quality modelling: spatial prediction of PM10 for Selangor State, Malaysia using machine learning algorithms / A. Tella, A. L. Balogun // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2022. – Vol. 29, № 57. – P. 86109–86125. – DOI: 10.1007/s11356-021-16150-0.
62. Шагидуллин, А. Р. Методы и средства систем локального экологического мониторинга качества атмосферного воздуха в высокоурбанизированных территориях на основе сквозных цифровых технологий : дис. ... д-ра техн. наук : 2.2.8 / А. Р. Шагидуллин. – Казань, 2022. – 649 с.

63. Scientometric and multidimensional contents analysis of PM_{2.5} concentration prediction / J. Gong, L. Ding, Y. Lu [et al.] // *Heliyon*. – 2023. – Vol. 9, № 3. – P. e14526. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e14526.
64. Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? / N. Castell, F. R. Dauge, P. Schneider [et al.] // *Environment International*. – 2017. – Vol. 99. – P. 293–302. – DOI: 10.1016/j.envint.2016.12.007.
65. Plaia, A. Air quality indices: a review / A. Plaia, M. Ruggieri // *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. – 2011. – Vol. 10, № 2. – P. 165–179. – DOI: 10.1007/s11157-010-9227-2.
66. Какарека, С. В. Методические подходы к оценке суммарного загрязнения атмосферного воздуха / С. В. Какарека // *Природопользование*. – 2014. – Вып. 25. – С. 61–69.
67. Безуглая, Э. Ю. Мониторинг состояния загрязнения атмосферы в городах / Э. Ю. Безуглая, И. В. Смирнова. – Л. : Гидрометеоиздат, 1986. – 200 с.
68. Ахтиманкина, А. В. Анализ подходов к определению уровней загрязнения атмосферного воздуха населённых мест / А. В. Ахтиманкина, В. М. Ерошкин // *Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле»*. – 2023. – Т. 44. – С. 18–32. – DOI: 10.26516/2073-3402.2023.44.18.
69. Lee, D. Constructing representative air quality indicators with measures of uncertainty / D. Lee, C. Ferguson, M. Scott // *Journal of the Royal Statistical Society. Series A*. – 2011. – Vol. 174, № 1. – P. 109–126.
70. Mayer, H. Two impact related air quality indices as tools to assess the daily and long-term air pollution / H. Mayer, F. Kalberlah // *International Journal of Environment and Pollution*. – 2009. – Vol. 36.
71. Shooter, D. Air quality indexing / D. Shooter, P. Brimblecombe // *International Journal of Environment and Pollution*. – 2009. – Vol. 36, № 1–3.

72. Kanchan. A review on air quality indexing system / Kanchan, A. K. Gorai, P. Goyal // Asian Journal of Atmospheric Environment. – 2015. – Vol. 9, № 2. – P. 101–113. – DOI: 10.5572/ajae.2015.9.2.101.
73. Руководство по контролю загрязнения атмосферы : РД 52.04.186-89. – Л. : Гидрометеоиздат, 1991.
74. Ott, W. R. Environmental indices: theory and practice / W. R. Ott. – Ann Arbor, MI : Ann Arbor Science Publishers, 1978. – 371 p. – ISBN 978-0-250-40200-4.
75. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2008 году». – М., 2009.
76. Основные принципы организации и проведения социально-гигиенического мониторинга : инструкция по применению. – Минск, 2007.
77. Appendix G to Part 58. Uniform Air Quality Index (AQI) and Daily Reporting // Federal Register. – 1999. – Vol. 64, № 149. – P. 42547–42549.
78. U.S. Environmental Protection Agency. Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI) : EPA-454/B-18-007. – Research Triangle Park, NC : U.S. EPA, 2018. – 14 p.
79. Bishoi, B. A comparative study of air quality index based on factor analysis and US-EPA methods for an urban environment / B. Bishoi, A. Prakash, V. K. Jain // Aerosol and Air Quality Research. – 2009. – Vol. 9, № 1. – P. 1–17. – DOI: 10.4209/aaqr.2008.02.0007.
80. About the air quality categories [Электронный ресурс] // NSW Department of Planning, Industry and Environment. – 2020. – URL: <https://www.environment.nsw.gov.au/topics/air/understanding-air-quality-data/air-quality-categories> (дата обращения: 09.07.2026).

81. Update on Implementation of the Daily Air Quality Index [Электронный ресурс] / E. Connolly [et al.] ; DEFRA. – 2013. – URL: <https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports> (дата обращения: 09.07.2026).
82. Review of the UK Air Quality Index : a report by the Committee on the Medical Effects of Air Pollutants (COMEAP) [Электронный ресурс]. – 2011. – URL: <https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20130502165249> (дата обращения: 09.07.2026).
83. Air Pollution in the UK: 2008 : report AEAT/ENV/R/2823/Issue 1. – 2009. – 270 p.
84. Council Directive 96/62/EC of 27 September 1996 on Ambient Air Quality Assessment and Management // Official Journal of the European Communities. – 2001.
85. Comparing Urban Air Quality across Borders [Электронный ресурс] / S. van den Elshout, H. Bartelds, H. Heich, K. Léger // CiteAir. – 2012. – 58 p. – URL: https://www.airqualitynow.eu/download/CITEAIR-Comparing_Urban_Air_Quality_across_Borders.pdf (дата обращения: 09.07.2026).
86. ATMO: un chiffre pour tout savoir [Электронный ресурс]. – 2004. – URL: <http://www.airparif.asso.fr/pages/indices/atmo> (дата обращения: 09.07.2026).
87. Bulletin de la Qualité de l'air. Lundi 29 décembre 2008 [Электронный ресурс]. – 5 p. – URL: <http://www.irceline.be> (дата обращения: 09.07.2026).
88. Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: an update to the scientific statement from the American Heart Association / R. D. Brook, S. Rajagopalan, C. A. Pope [et al.] // Circulation. – 2010. – Vol. 121, № 21. – P. 2331–2378. – DOI: 10.1161/CIR.0b013e3181dbecel.
89. A new multipollutant, no-threshold air quality health index based on short-term associations observed in daily time-series analyses / D. M. Stieb, R. T.

- Burnett, M. Smith-Doiron [et al.] // Journal of the Air & Waste Management Association. – 2008. – Vol. 58, № 3. – P. 435–450. – DOI: 10.3155/1047-3289.58.3.435.
90. Definition of the air quality index [Электронный ресурс]. – 2013. – URL: http://www.irceline.be/~celinair/english/homeen_java.html (дата обращения: 09.07.2026).
91. Computation of the Pollutant Standards Index (PSI) [Электронный ресурс] // National Environmental Agency of Singapore. – 2014. – URL: [https://www.haze.gov.sg/docs/default-source/faq/computation-of-the-pollutant-standards-index-\(psi\).pdf](https://www.haze.gov.sg/docs/default-source/faq/computation-of-the-pollutant-standards-index-(psi).pdf) (дата обращения: 09.07.2026).
92. Does the AQHI reduce cardiovascular hospitalization in Hong Kong's elderly population / T. G. Mason, C. M. Schooling, J. J. Ran [et al.] // Environment International. – 2020. – Vol. 135. – P. 141–153.
93. Technological Rules Concerned «Ambient Air Quality Daily Report» [Электронный ресурс] / National Environmental Monitoring Centre, China. – 2007. – 3 p. – URL: http://fire.biol.wvu.edu/trent/alles/China_API_Rules.pdf (дата обращения: 09.07.2026).
94. Basis for Indian Air Quality Index (IND-AQI) [Электронный ресурс]. – URL: <http://home.iitk.ac.in/~mukesh/ind-aqi/basis.html> (дата обращения: 09.07.2026).
95. Ambient Air Data and Monitoring [Электронный ресурс] / Department of Environment. – 2005. – 24 p. – URL: <http://www.doe.gov.my/index> (дата обращения: 09.07.2026).
96. Good-practice guide for air quality monitoring and data management / Ministry for the Environment. – Wellington, 2009.
97. National air quality objectives and European Directive limit and target values for the protection of human health [Электронный ресурс] // COMEAP. –

2000. — URL: https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/Air_Quality_Objectives_Update.pdf (дата обращения: 09.07.2026).
98. National Environment Protection (Ambient Air Quality) Measure [Электронный ресурс] // Australian Government Federal Register of Legislation. — 2013. — URL: <https://www.legislation.gov.au/Details/C2004H03935> (дата обращения: 09.07.2026).
99. World Health Organization. Ambient (outdoor) air pollution [Электронный ресурс] : fact sheet. — Geneva : WHO, 2024. — URL: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (дата обращения: 08.07.2026).
100. Oke, T. R. Boundary layer climates / T. R. Oke. — 2nd ed. — London ; New York : Routledge, 1987. — 435 p. — ISBN 978-0-415-04319-9.
101. Стольберг, В. Ф. Экология города : учебник / В. Ф. Стольберг. — Киев : Либра, 2000. — 464 с.
102. Чистякова, С. Б. Охрана окружающей среды : учебник для вузов / С. Б. Чистякова. — М. : Стройиздат, 1988. — 272 с.
103. Meteoblue. Моделированные климатические и исторические данные для г. Душанбе (Таджикистан) [Электронный ресурс]. — URL: <https://surl.lt/saigqb> (дата обращения: 24.03.2026).
104. Безуглая, Э. Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов / Э. Ю. Безуглая. — Л. : Гидрометеиздат, 1980. — 184 с.
105. Берлянд, М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. — Л. : Гидрометеиздат, 1985. — 272 с.
106. Методика расчёта концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий (ОНД-86) / Главная

- геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова ; [Е. Л. Генихович, Р. И. Оникул и др.]. – Л. : Гидрометеиздат, 1987. – 93 с.
107. Whiteman, C. D. Mountain meteorology: fundamentals and applications / C. D. Whiteman. – New York : Oxford University Press, 2000. – 355 p. – ISBN 978-0-19-513271-7.
108. World Bank. Air Quality Management in Central Asia : Sources, Health Impacts and Policy Options. – Washington, DC : World Bank, 2023. – 96 p.
109. Stull, R. B. An introduction to boundary layer meteorology / R. B. Stull. – Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1988. – 666 p. – ISBN 978-90-277-2769-5.
110. Теличенко, В. И. Основы биосферной совместимости зданий, сооружений и городских территорий / В. И. Теличенко // Вестник МГСУ. – 2011. – № 3, т. 1. – С. 8–14.
111. Ильичёв, В. А. Биосферная совместимость: технологии внедрения инноваций. Города, развивающие человека / В. А. Ильичёв. – М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. – 240 с.
112. Thorpe, A. Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: a review / A. Thorpe, R. M. Harrison // Science of the Total Environment. – 2008. – Vol. 400, № 1–3. – P. 270–282. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2008.06.007.
113. Pope, C. A. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect / C. A. Pope, D. W. Dockery // Journal of the Air & Waste Management Association. – 2006. – Vol. 56, № 6. – P. 709–742. – DOI: 10.1080/10473289.2006.10464485.
114. Муртазоев, Ш. А. Оценка воздействия ТЭЦ «Душанбе-2» на качество приземного слоя атмосферы города Душанбе / Ш. А. Муртазоев, С. П. Смышляев, Г. Т. Фрумин // География: развитие науки и образования : сб. ст. по материалам LXXIV Герценовских чтений, Санкт-Петербург,

- 21–23 апреля 2021 г. / отв. ред. С. И. Богданов, Д. А. Субетто, А. Н. Паранина. – Санкт-Петербург : Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, 2021. – Т. 2. – С. 106–110.
115. Air quality challenges in Central Asian urban areas: a PM_{2.5} source apportionment analysis in Dushanbe, Tajikistan / S. Papagiannis, S. F. Abdullaev, V. Vasilatou [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2024. – Vol. 31, № 27. – P. 39588–39601. – DOI: 10.1007/s11356-024-33833-6.
116. Хакдодов, А. М. Учёт распространения песчано-пыльных бурь в информационной системе мониторинга качества атмосферного воздуха / А. М. Хакдодов, О. Х. Амирзода, М. М. Хакдод // *Актуальные вопросы металлургии в условиях ускоренной индустриализации страны : материалы II Междунар. науч.-практ. конф., Душанбе, 27–28 ноября 2025 г.* – Душанбе : Таджикский технический университет им. акад. М. С. Осими, 2025. – С. 335–341.
117. Indoitu, R. Dust storms in Central Asia: spatial and temporal variations / R. Indoitu, L. Orlovsky, N. Orlovsky // *Journal of Arid Environments*. – 2012. – Vol. 85. – P. 62–70. – DOI: 10.1016/j.jaridenv.2012.03.018.
118. Азаров, В. Н. Комплексная оценка пылевой обстановки и разработка мер по снижению запылённости воздушной среды промышленных предприятий : дис. ... д-ра техн. наук : 05.26.01 / В. Н. Азаров. – Ростов-на-Дону, 2004. – 341 с.
119. Long-term profiling of mineral dust and pollution aerosol with multiwavelength polarization Raman lidar at the Central Asian site of Dushanbe, Tajikistan: case studies / J. Hofer, D. Althausen, S. F. Abdullaev [et al.] // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2017. – Vol. 17, № 23. – P. 14559–14577. – DOI: 10.5194/acp-17-14559-2017.
- Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products / P. Ginoux, J.

- M. Prospero, T. E. Gill [et al.] // Reviews of Geophysics. – 2012. – Vol. 50, № 3. – RG3005. – DOI: 10.1029/2012RG000388.
120. В Таджикистане зарегистрировано 34354 единицы электротранспорта [Электронный ресурс] // Национальное информационное агентство Таджикистана «Ховар». – 2025. – 20 июля. – URL: <https://khovar.tj/rus/2025/07/v-tadzhikistane-zaregistrirovano-34354-edinitsy-elektrotransporta/> (дата обращения: 26.03.2026).
121. Программа развития электротранспорта в Республике Таджикистан на 2023–2028 годы : утв. постановлением Правительства Республики Таджикистан от 31 октября 2022 г. № 532 [Электронный ресурс]. – Душанбе, 2022. – URL: http://www.portali-huquqi.tj/publicadliya/view_qonunhovview.php?showdetail=&asosi_id=26691 (дата обращения: 26.03.2026).
122. Временные вариации массовой концентрации взвешенных частиц PM_{2.5} в атмосфере г. Душанбе за период 2014–2024 гг. / С. Ф. Абдуллозода, В. А. Маслов, С. Д. Абдуллаева, Х. С. Сафаров // Известия Национальной академии наук Таджикистана. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. – 2025. – № 1 (5). – С. 56–64.
123. Герасимов, И. П. Научные основы современного мониторинга окружающей среды / И. П. Герасимов // Известия АН СССР. Серия географическая. – 1975. – № 3. – С. 13–25.
124. Соколов, В. Е. Биосферные заповедники – эталоны природы / В. Е. Соколов, Ю. А. Израэль // Природа. – 1981. – № 1. – С. 74–90.
125. Агентство по гидрометеорологии Комитета по охране окружающей среды при Правительстве Республики Таджикистан. Экологический мониторинг [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.meteo.tj/ru/environmental-monitoring> (дата обращения: 28.03.2026).

126. Об экологическом мониторинге : Закон Республики Таджикистан от 25 марта 2011 г. № 707 : в ред. законов РТ от 26.07.2014 № 1120, от 13.11.2024 № 2097 [Электронный ресурс]. – URL: <https://shorturl.at/kKUfy> (дата обращения: 28.03.2026).
127. О гидрометеорологической деятельности: Закон Республики Таджикистан : в ред. законов РТ от 03.03.2006 № 177, от 13.06.2007 № 285, от 26.12.2011 № 786, от 26.07.2014 № 1121, от 23.07.2016 № 1345, от 13.11.2024 № 2098 [Электронный ресурс]. – URL: <https://shorturl.at/rVb8e> (дата обращения: 28.03.2026).
128. Сводный национальный отчёт по реализации Орхусской конвенции в Республике Таджикистан за 2017–2021 гг. [Электронный ресурс]. – URL: https://aarhusclearinghouse.unece.org/sites/default/files/2024-03/Tajikistan_NIR_AarhusConv_RUS_2021.pdf (дата обращения: 28.03.2026).
129. Официальная информация об Агентстве по гидрометеорологии Комитета по охране окружающей среды при Правительстве Республики Таджикистан [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.meteo.tj/ru/agency/about-us> (дата обращения: 28.03.2026).
130. Агентство по гидрометеорологии. Информация о деятельности информационно-аналитического отдела и публикации ежедневного экологического обзора [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.meteo.tj/ru/-19> (дата обращения: 28.03.2026).
131. Агентство по гидрометеорологии. «Экологический обзор»: перечень контролируемых загрязнителей и формат оценки загрязнения воздуха в Душанбе [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.meteo.tj/ru/ecological-review> (дата обращения: 28.03.2026).
132. Снакин, В. В. Экологический мониторинг / В. В. Снакин // Экология России : хрестоматия. – М. : Academia, 2007. – С. 112–128.

133. Реймерс, Н. Ф. Экология: теории, законы, правила, принципы и гипотезы / Н. Ф. Реймерс. – М. : Россия молодая, 1994. – 367 с.
134. Larssen, S. Criteria for EUROAIRNET: the EEA air quality monitoring and information network / S. Larssen, R. Sluyter, C. Helmis. – Copenhagen : European Environment Agency, 1999. – 56 p. – (EEA Technical report ; № 12).
135. Агентство по гидрометеорологии. Материал о мобильной станции мониторинга загрязнения атмосферного воздуха, используемой в том числе в Душанбе [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.meteo.tj/ru/news/2024/10/29/-175> (дата обращения: 28.03.2026).
136. Representativeness of air quality monitoring networks / J. Duyzer, D. van den Hout, P. Zandveld, S. van Ratingen // *Atmospheric Environment*. – 2015. – Vol. 104. – P. 88–101. – DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.12.067.
137. WHO Ambient Air Quality Database: подход к городским измерениям как к данным, репрезентативным для экспозиции населения [Электронный ресурс] / World Health Organization. – URL: <https://www.who.int/data/gho/data/themes/air-pollution/who-air-quality-database> (дата обращения: 28.03.2026).
138. WHO Global Air Quality Guidelines (2021): рекомендованное среднегодовое значение PM_{2.5} – 5 мкг/м³ [Электронный ресурс] / World Health Organization. – URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228> (дата обращения: 28.03.2026).
139. Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: how far have they gone? / L. Morawska, P. K. Thai, X. Liu [et al.] // *Environment International*. – 2018. – Vol. 116. – P. 286–299. – DOI: 10.1016/j.envint.2018.04.018.

140. Агентство по гидрометеорологии. Перечень специализированных услуг, включая сведения об уровне загрязнения атмосферного воздуха [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.meteo.tj/ru/services> (дата обращения: 28.03.2026).
141. Crowdsourcing for climate and atmospheric sciences: current status and future potential / C. L. Muller, L. Chapman, S. Johnston [et al.] // *International Journal of Climatology*. – 2015. – Vol. 35, № 11. – P. 3185–3203. – DOI: 10.1002/joc.4210.
142. World Air Quality Index (AQICN). Публично доступные данные станции Dushanbe US Embassy и API-идентификатор станции [Электронный ресурс]. – URL: <https://aqicn.org/city/tajikistan/dushanbe/us-embassy/ru/> (дата обращения: 28.03.2026).
143. Baron, R. Amperometric gas sensors as a low cost emerging technology platform for air quality monitoring applications: a review / R. Baron, J. Saffell // *ACS Sensors*. – 2017. – Vol. 2, № 11. – P. 1553–1566. – DOI: 10.1021/acssensors.7b00620.
144. Аверин, Г. В. Системодинамика : монография / Г. В. Аверин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Донецк : Фолиант, 2022. – 405 с.
145. 151. Lewis, A. Validate personal air-pollution sensors / A. Lewis, P. Edwards // *Nature*. – 2016. – Vol. 535, № 7610. – P. 29–31. – DOI: 10.1038/535029a.
146. Sensirion. Particulate Matter Sensor SPS30 : datasheet [Электронный ресурс]. – Stäfa : Sensirion AG. – URL: https://sensirion.com/media/documents/8600FF88/64A3B8D6/Sensirion_PM_Sensors_Datasheet_SPS30.pdf (дата обращения: 28.03.2026).
147. Laboratory evaluation of particle-size selectivity of optical low-cost particulate matter sensors / J. Kuula, T. Mäkelä, M. Aurela [et al.] // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2020. – Vol. 13, № 5. – P. 2413–2423. – DOI: 10.5194/amt-13-2413-2020.

148. Budde, M. Enabling low-cost particulate matter measurement for participatory sensing scenarios / M. Budde, M. Köpke, M. Beigl // Proceedings of the 12th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia (MUM'13). – New York : ACM, 2013. – Art. 19. – DOI: 10.1145/2541831.2541859.
149. Hagan, D. H. Assessing the accuracy of low-cost optical particle sensors using a physics-based approach / D. H. Hagan, J. H. Kroll // Atmospheric Measurement Techniques. – 2020. – Vol. 13, № 11. – P. 6343–6355. – DOI: 10.5194/amt-13-6343-2020.
150. Development and application of a next generation air sensor network for the Hong Kong marathon 2015 air quality monitoring / L. Sun, K. C. Wong, P. Wei [et al.] // Sensors. – 2016. – Vol. 16, № 2. – P. 211. – DOI: 10.3390/s16020211.
151. From low-cost sensors to high-quality data: a summary of challenges and best practices for effectively calibrating low-cost particulate matter mass sensors / M. R. Giordano, C. Malings, S. N. Pandis [et al.] // Journal of Aerosol Science. – 2021. – Vol. 158. – Art. 105833. – DOI: 10.1016/j.jaerosci.2021.105833.
152. Performance evaluation of Atmotube PRO sensors for air quality measurements in an urban location / A. I. Shittu, K. J. Pringle, S. R. Arnold [et al.] // Atmospheric Measurement Techniques. – 2025. – Vol. 18. – P. 817–828. – DOI: 10.5194/amt-18-817-2025.
153. Sousan, S. Inter-comparison of low-cost sensors for measuring the mass concentration of occupational aerosols / S. Sousan, K. Koehler, G. Thomas [et al.] // Aerosol Science and Technology. – 2016. – Vol. 50, № 5. – P. 462–473. – DOI: 10.1080/02786826.2016.1162901.
154. Long-term field comparison of multiple low-cost particulate matter sensors in an outdoor urban environment / F. M. J. Bulot, S. J. Johnston, P. J. Basford [et al.] // Scientific Reports. – 2019. – Vol. 9. – Art. 7497. – DOI: 10.1038/s41598-019-43716-3.

155. Feenstra, B. Performance evaluation of twelve low-cost PM_{2.5} sensors at an ambient air monitoring site / B. Feenstra, V. Papapostolou, S. Hasheminassab [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2019. – Vol. 216. – P. 116946. – DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.116946.
156. Bai, L. Air pollution forecasts: an overview / L. Bai, J. Wang, X. Ma, H. Lu // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2018. – Vol. 15, № 4. – P. 780. – DOI: 10.3390/ijerph15040780.
157. Field evaluation of low-cost particulate matter sensors in high- and low-concentration environments / T. Zheng, M. H. Bergin, K. K. Johnson [et al.] // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2018. – Vol. 11, № 8. – P. 4823–4846. – DOI: 10.5194/amt-11-4823-2018.
158. Jayaratne, R. The influence of humidity on the performance of a low-cost air particle mass sensor and the effect of atmospheric fog / R. Jayaratne, X. Liu, P. Thai [et al.] // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2018. – Vol. 11, № 8. – P. 4883–4890. – DOI: 10.5194/amt-11-4883-2018.
159. Pérez, A. Performance assessment of wearable Atmotube Pro sensor for air quality citizen science applications / A. Pérez, E. Illueca Fernández, S. Shah [et al.] // 2024 9th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech). – IEEE, 2024. – P. 1–6. – DOI: 10.23919/SpliTech61897.2024.10612297.
160. Evaluation of a low-cost optical particle counter (Alphasense OPC-N2) for ambient air monitoring / L. R. Crilley, M. Shaw, R. Pound [et al.] // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2018. – Vol. 11, № 2. – P. 709–720. – DOI: 10.5194/amt-11-709-2018.
161. Cities of Central Asia: new hotspots of air pollution in the world / M. Tursumbayeva, A. Muratuly, N. Baimatova [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2023. – Vol. 309. – Art. 119901. – DOI: 10.1016/j.atmosenv.2023.119901.

162. A review of land-use regression models to assess spatial variation of outdoor air pollution / G. Hoek, R. Beelen, K. de Hoogh [et al.] // *Atmospheric Environment*. – 2008. – Vol. 42, № 33. – P. 7561–7578. – DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.05.057.
163. Atmospheric aerosol compositions in China: spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols / X. Zhang, Y. Wang, T. Niu [et al.] // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2012. – Vol. 12, № 2. – P. 779–799.
164. Abdullaev, S. F. Main characteristics of dust storms and their radiative impacts: with a focus on Tajikistan / S. F. Abdullaev, I. N. Sokolik // *Journal of Atmospheric Science Research*. – 2019. – Vol. 2, № 2. – P. 1–21. – DOI: 10.30564/jasr.v2i2.352.
165. Urban air quality: the challenge of traffic non-exhaust emissions / F. Amato, F. R. Cassee, H. A. C. Denier van der Gon [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. – 2014. – Vol. 275. – P. 31–36. – DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.04.053.
166. Tukey, J. W. *Exploratory data analysis* / J. W. Tukey. – Reading, MA : Addison-Wesley, 1977. – 688 p. – ISBN 978-0-201-07616-5.
167. Shapiro, S. S. An analysis of variance test for normality (complete samples) / S. S. Shapiro, M. B. Wilk // *Biometrika*. – 1965. – Vol. 52, № 3–4. – P. 591–611. – DOI: 10.1093/biomet/52.3-4.591.
168. Wallace, J. The effect of temperature inversions on ground-level nitrogen dioxide (NO₂) and fine particulate matter (PM_{2.5}) using temperature profiles from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) / J. Wallace, P. Kanaroglou // *Science of the Total Environment*. – 2009. – Vol. 407, № 8. – P. 2654–2662. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.05.050
169. Mann, H. B. Nonparametric tests against trend / H. B. Mann // *Econometrica*. – 1945. – Vol. 13, № 3. – P. 245–259. – DOI: 10.2307/1907187.

170. Time Series Analysis: Forecasting and Control / G. E. P. Box, G. M. Jenkins, G. C. Reinsel, G. M. Ljung. – 5th ed. – Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2015. – 712 p.
171. Dickey, D. A. Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root / D. A. Dickey, W. A. Fuller // Journal of the American Statistical Association. – 1979. – Vol. 74, № 366a. – P. 427–431. – DOI: 10.1080/01621459.1979.10482531.
172. Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root / D. Kwiatkowski, P. C. B. Phillips, P. Schmidt, Y. Shin // Journal of Econometrics. – 1992. – Vol. 54, № 1–3. – P. 159–178. – DOI: 10.1016/0304-4076(92)90104-Y.
173. STL: a seasonal-trend decomposition procedure based on loess / R. B. Cleveland, W. S. Cleveland, J. E. McRae, I. Terpenning // Journal of Official Statistics. – 1990. – Vol. 6, № 1. – P. 3–73.
174. Hyndman, R. J. Forecasting: principles and practice / R. J. Hyndman, G. Athanasopoulos. – 3rd ed. – Melbourne : OTexts, 2021. – 442 p. – ISBN 978-0-9875071-3-6.
175. Atzori, L. The Internet of Things: a survey / L. Atzori, A. Iera, G. Morabito // Computer Networks. – 2010. – Vol. 54, № 15. – P. 2787–2805. – DOI: 10.1016/j.comnet.2010.05.010.
176. Bass, L. Software architecture in practice / L. Bass, P. Clements, R. Kazman. – 3rd ed. – Upper Saddle River, NJ : Addison-Wesley, 2012. – 640 p. – ISBN 978-0-321-81573-6.
177. Lee, E. A. Cyber physical systems: design challenges / E. A. Lee // 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC). – Orlando : IEEE, 2008. – P. 363–369. – DOI: 10.1109/ISORC.2008.25.

178. Internet of Things (IoT): a vision, architectural elements, and future directions / J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, M. Palaniswami // *Future Generation Computer Systems*. – 2013. – Vol. 29, № 7. – P. 1645–1660. – DOI: 10.1016/j.future.2013.01.010.
179. Internet of Things for smart cities / A. Zanella, N. Bui, A. Castellani [et al.] // *IEEE Internet of Things Journal*. – 2014. – Vol. 1, № 1. – P. 22–32. – DOI: 10.1109/JIOT.2014.2306328.
180. Edge computing: vision and challenges / W. Shi, J. Cao, Q. Zhang [et al.] // *IEEE Internet of Things Journal*. – 2016. – Vol. 3, № 5. – P. 637–646. – DOI: 10.1109/JIOT.2016.2579198.
181. Friedman, J. H. Greedy function approximation: a gradient boosting machine / J. H. Friedman // *The Annals of Statistics*. – 2001. – Vol. 29, № 5. – P. 1189–1232. – DOI: 10.1214/aos/1013203451.
182. Hochreiter, S. Long short-term memory / S. Hochreiter, J. Schmidhuber // *Neural Computation*. – 1997. – Vol. 9, № 8. – P. 1735–1780. – DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.
183. Breiman, L. Random forests / L. Breiman // *Machine Learning*. – 2001. – Vol. 45, № 1. – P. 5–32. – DOI: 10.1023/A:1010933404324.
184. Cho, K. Learning phrase representations using RNN encoder-decoder for statistical machine translation / K. Cho, B. van Merriënboer, C. Gulcehre [et al.] // *Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)*. – Doha : ACL, 2014. – P. 1724–1734. – DOI: 10.3115/v1/D14-1179.
185. Chen, T. XGBoost: a scalable tree boosting system / T. Chen, C. Guestrin // *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, San Francisco, CA, 13–17 August 2016*. – New York : ACM, 2016. – P. 785–794. – DOI: 10.1145/2939672.2939785.

186. Chandola, V. Anomaly detection: a survey / V. Chandola, A. Banerjee, V. Kumar // ACM Computing Surveys. – 2009. – Vol. 41, № 3. – Art. 15. – P. 1–58. – DOI: 10.1145/1541880.1541882.
187. Multisensor data fusion: a review of the state-of-the-art / B. Khaleghi, A. Khamis, F. O. Karray, S. N. Razavi // Information Fusion. – 2013. – Vol. 14, № 1. – P. 28–44. – DOI: 10.1016/j.inffus.2011.08.001.
188. Nakamoto, S. Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system [Электронный ресурс] / S. Nakamoto. – 2008. – 9 p. – URL: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf> (дата обращения: 05.07.2026).
189. Zheng, Z. Blockchain challenges and opportunities: a survey / Z. Zheng, S. Xie, H.-N. Dai [et al.] // International Journal of Web and Grid Services. – 2018. – Vol. 14, № 4. – P. 352–375. – DOI: 10.1504/IJWGS.2018.095647.
190. Hyperledger Fabric: a distributed operating system for permissioned blockchains / E. Androulaki, A. Barger, V. Bortnikov [et al.] // Proceedings of the 13th EuroSys Conference (EuroSys'18), Porto, 23–26 April 2018. – New York : ACM, 2018. – Art. 30. – P. 1–15. – DOI: 10.1145/3190508.3190538.
191. Christidis, K. Blockchains and smart contracts for the Internet of Things / K. Christidis, M. Devetsikiotis // IEEE Access. – 2016. – Vol. 4. – P. 2292–2303. – DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2566339.
192. Szabo, N. Formalizing and securing relationships on public networks / N. Szabo // First Monday. – 1997. – Vol. 2, № 9. – DOI: 10.5210/fm.v2i9.548.
193. Internet of Things: a survey on enabling technologies, protocols, and applications / A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi [et al.] // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2015. – Vol. 17, № 4. – P. 2347–2376. – DOI: 10.1109/COMST.2015.2444095.
194. Моисеев, Н. Н. Математические задачи системного анализа / Н. Н. Моисеев. – М. : Наука, 1981. – 488 с.

195. Хаммер, М. Реинжиниринг корпорации: манифест революции в бизнесе / М. Хаммер, Дж. Чампи ; пер. с англ. – М. : Манн, Иванов и Фербер, 2011. – 288 с.
196. Буч, Г. Язык UML. Руководство пользователя / Г. Буч, Дж. Рамбо, И. Якобсон ; пер. с англ. – 2-е изд. – М. : ДМК Пресс, 2006. – 496 с.
197. Fundamentals of business process management / M. Dumas, M. La Rosa, J. Mendling, H. A. Reijers. – 2nd ed. – Berlin ; Heidelberg : Springer, 2018. – 527 p. – DOI: 10.1007/978-3-662-56509-4.
198. Вигерс, К. Разработка требований к программному обеспечению / К. Вигерс, Дж. Битти ; пер. с англ. – 3-е изд. – М. : Русская редакция ; СПб. : БХВ-Петербург, 2014. – 736 с.
199. ISO/IEC 25010:2011. Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – System and software quality models. – Geneva : ISO, 2011. – 34 p.
200. Sommerville, I. Software engineering / I. Sommerville. – 10th ed. – Harlow : Pearson Education, 2016. – 816 p. – ISBN 978-1-292-09613-1.
201. Коберн, А. Современные методы описания функциональных требований к системам / А. Коберн ; пер. с англ. – М. : Лори, 2002. – 263 с.
202. Object-oriented software engineering: a use case driven approach / I. Jacobson, M. Christerson, P. Jonsson, G. Övergaard. – Wokingham : Addison-Wesley, 1992. – 528 p. – ISBN 978-0-201-54435-0.
203. Садовникова, Н. П. Экологическая безопасность города: поддержка принятия решений : монография / Н. П. Садовникова, Д. С. Парыгин. – Волгоград : ВолгГТУ, 2013. – 116 с.
204. Evans, E. Domain-driven design: tackling complexity in the heart of software / E. Evans. – Boston, MA : Addison-Wesley, 2003. – 560 p. – ISBN 978-0-321-12521-7.

205. Rumbaugh, J. The Unified Modeling Language reference manual / J. Rumbaugh, I. Jacobson, G. Booch. – 2nd ed. – Boston, MA : Addison-Wesley, 2004. – 721 p. – ISBN 978-0-321-24562-5.
206. Design patterns: elements of reusable object-oriented software / E. Gamma, R. Helm, R. Johnson, J. Vlissides. – Reading, MA : Addison-Wesley, 1994. – 395 p. – ISBN 978-0-201-63361-0.
207. Нильсен, Я. Юзабилити веб-сайтов: практика / Я. Нильсен, Х. Лоранжер ; пер. с англ. – М. : Вильямс, 2009. – 368 с.
208. Designing the user interface: strategies for effective human-computer interaction / B. Shneiderman, C. Plaisant, M. Cohen [et al.]. – 6th ed. – Boston, MA : Pearson, 2016. – 624 p. – ISBN 978-0-13-438038-2.
209. Few, S. Information dashboard design: the effective visual communication of data / S. Few. – Sebastopol, CA : O'Reilly Media, 2006. – 223 p. – ISBN 978-0-596-10016-2.
210. Tufte, E. R. The visual display of quantitative information / E. R. Tufte. – 2nd ed. – Cheshire, CT : Graphics Press, 2001. – 197 p. – ISBN 978-0-9613921-4-7.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных журналов, рекомендуемых ВАК при Президенте Республики

Таджикистан:

- [1-А]. Хакдод, А. М. Современные научные подходы к решению экологических проблем в условиях Таджикистана / М. М. Хакдод, О. Х. Амирзода, А. М. Хакдодов // Водные ресурсы, энергетика и экология. – 2023. – Т. 3, № 3. – С. 193-200, ISSN 2789–0953.
- [2-А]. Хакдодов, А. М. О совершенствовании системы мониторинга качества атмосферного воздуха / А. М. Хакдодов, О. Х. Амирзода, М. М. Хакдод // Водные ресурсы, энергетика и экология. – 2024. – Т. 4, № 1. – С. 132-141, ISSN 2789–0953.

[3-A]. Хакдодов, А. М. проектирование модели информационной системы экологического мониторинга атмосферного воздуха для города Душанбе / А. М. Хакдодов, О. Х. Амирзода, М. М. Хакдод // Водные ресурсы, энергетика и экология. – 2024. – Т. 4, № 3. – С. 146-153, ISSN 2789–0953.

[4-A]. Хакдодов, А. М. Экспериментальное измерение концентрации PM2.5 на основе применения оптического датчика типа SPS30 / А. М. Хакдодов // Политехнический вестник. Серия: Техника и общество. – 2026. – № 2(14). – С. 8-17, ISSN 3105–7098.

Публикации в материалах конференций и других научных изданиях:

[5-A]. Хакдодов, А. М. Учет распространения песчано-пыльных бурь в информационной системе мониторинга качества атмосферного воздуха / А. М. Хакдодов, О. Х. Амирзода, М. М. Хакдод // Актуальные вопросы металлургии в условиях ускоренной индустриализации страны : Материалы II-ой международной научно-практической конференции, посвященной годам развития промышленности и 20-летию изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования, Душанбе, 27–28 ноября 2025 года. – Душанбе: Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими, 2025. – С. 335-341. – EDN HWZXJZ.

[6-A]. Хакдодов, А. М. Оценка качества атмосферного воздуха в Республике Таджикистан и совершенствование системы мониторинга / А. М. Хакдодов, О. Х. Амирзода, М. М. Хакдод // Природоориентированные решения экологических проблем: Материалы III Международной научно-практической конференции, Ташкент, 2025 г.

[7-A]. Хакдодов, А. М. Интеллектуальная система прогнозно-ориентированного управления качеством атмосферного воздуха в городской среде / А. М. Хакдодов // Управление информационными ресурсами: XXII Международной научно-практической конференции «Управление информационными ресурсами», Минск, 2026 г.

**Патенты, авторские свидетельства и государственная регистрация
информационных ресурсов**

[8-А]. Хакдодов, А. М. Система экологического мониторинга атмосферного воздуха промышленного региона [Текст] / А. М. Хакдодов, О. Х. Амирзода, М. М. Хакдод, А.А. Гулахмадзода // Малый патент Республики Таджикистан №1744, зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Республики Таджикистан от 16.07.2026 г.

**МАТЕРИАЛЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ**

УТВЕРЖДАЮ

Директор Филиала Национального
исследовательского технологического
университета МИСИС в г. Душанбе
Джурзода Мумин Азизов

« » 2026 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертации Хакдодова Акбарджона Махмадшарифовича в учебный процесс кафедры «Энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий» Филиала Национального исследовательского технологического университета МИСИС в г. Душанбе

Мы, нижеподписавшиеся, подтверждаем, что результаты диссертационного исследования на тему «Совершенствование системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха в условиях города Душанбе», выполненной Хакдодовым Акбарджоном Махмадшарифовичем по специальности Экология, внедрены в учебный процесс.

В учебном процессе используются:

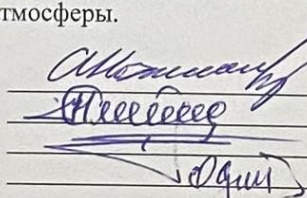
1. Методика оценки и анализа концентраций мелкодисперсных частиц PM2.5 в атмосферном воздухе.
2. Результаты исследований влияния метеорологических факторов на уровень загрязнения атмосферного воздуха.
3. Разработанные подходы к организации системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха.
4. Материалы диссертационного исследования при проведении лекционных и практических занятий по дисциплинам: «Экология», «Безопасность жизнедеятельности человека».

Внедрение позволило:

- повысить практическую направленность учебного процесса;
- обновить учебно-методические материалы современными данными по мониторингу качества воздуха;
- расширить возможности подготовки студентов в области экологического контроля и анализа загрязнения атмосферы.

Председатель комиссии

Члены комиссии



Нозимов А.А.

Махмадизода М.М.

Бобоев И.Р.

Одиназода Б.Н.

Подписи заместителя директора по учебно-методической работе, д.ф.н. профессора Нозимова А.А., членов комиссии: начальника учебно-методического отдела, д.т.н., профессора Махмадизода М.М., заместителя директора по науке, к.т.н., доцента Бобоева И.Р., зав.кафедрой «ЭиРТ», к.т.н., доцента Одиназода Б.Н.

Заверяю

Начальник отдела кадров

ДФ НИТУ МИСИС



Зарипова М.А.



«УТВЕРЖДАЮ»

Нерманов, заместитель Председателя Комитета
по охране окружающей среды при
Правительстве Республики Таджикистан

Курбонзода Исфаандиёр

2026 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертации Хаклодова Акбарджона Махмадшарифовича
в практическую деятельность Управления государственного контроля
использования и охраны атмосферного воздуха Комитета по охране окружающей
среды при Правительстве Республики Таджикистан

В практической деятельности используются:

1. Методические подходы к организации мониторинга концентраций PM_{2.5} в атмосферном воздухе.
2. Результаты анализа пространственно-временной изменчивости загрязнения атмосферного воздуха в городе Душанбе.
3. Рекомендации по совершенствованию системы экологического мониторинга и повышению оперативности получения данных о качестве атмосферного воздуха.
4. Подходы к использованию современных сенсорных технологий для контроля загрязнения атмосферы.

Внедрение результатов позволило:

- повысить эффективность экологического мониторинга атмосферного воздуха;
- улучшить качество анализа данных о загрязнении воздуха;
- расширить возможности оперативного выявления неблагоприятных экологических ситуаций;
- использовать результаты исследования при подготовке аналитических материалов и экологических рекомендаций.

Председатель
комиссии

Члены комиссии

Курбонзода Ф.

Оев С.

Кудратуллоев У.

Розилов Дж.

Зам. начальника
Управления

главный специалист

главный специалист

ведущий специалист

АВТОРСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА, ПАТЕНТЫ И СЕРТИФИКАТЫ

ҶУМҲУРИИ
ТОҶИКИСТОН



ИДОРАИ
ПАТЕНТИ

НАХУСПАТЕНТ

№ TJ 1744

БА ИХТИРОИ

Системаи мониторинги экологии ҳавои атмосфераи минтақаи саноатӣ

Дорандаи
нахустпатент: Ҳақлодов Акбарҷон Маҳмадшарифович

Сарзамин: Ҷумҳурии Тоҷикистон

Муаллиф(он): Ҳақлодов Акбарҷон Маҳмадшарифович, Амирзода Ориф
Ҳамид, Ҳақлод Маҳмадшариф Маҳмуд, Гулаҳмадзода Аминҷон Абдучабоор

Аввалияти ихтироъ: 14.10.2025

Таърихи рузи пешниҳоди ариза: 14.10.2025

Аризаи №: 2502181

Дар Феҳристи давлатии ихтироъҳои

Ҷумҳурии Тоҷикистон 16 июли с. 2026 ба қайд гирифта шуд

Нахустпатент
этибор дорад аз 14 октябри с. 2025 то 14 октябри с. 2035



ДИРЕКТОР

Исмоилзода М.Х.

РЕСПУБЛИКА ТАДЖИКИСТАН

ПАТЕНТНОЕ ВЕДОМСТВО

МАЛЫЙ ПАТЕНТ

№ ТЈ 1744

на изобретение

*СИСТЕМА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРНОГО
ВОЗДУХА ПРОМЫШЛЕННОГО РЕГИОНА*

Патентообладатель Хакдодов Акбарджон Махмадшарифович

Страна Республика Таджикистан

Автор (ы) Хакдодов Акбарджон Махмадшарифович, Амирзода Сриф Хамид,
Хакдод Махмадшариф Махмуд, Гулахмадзода Аминджон Абдуджаббор

Приоритет изобретения 14.10.2025

Дата подачи заявки 14.10.2025

Заявка № 2502181

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Республики Таджикистан

16 июля 2026

Малый
патент действителен с 14 октября 2025 г. по 14 октября 2035 г.

