

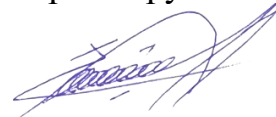
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ

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**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

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

Душанбе - 2026

Работа выполнена в Институте водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Республики Таджикистан.

Научный руководитель:	Амирзода Ориф Хамид - доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Республики Таджикистана
Официальные оппоненты:	Ахмадзода Матин Зафар - доктор технических наук, первый заместитель директора Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности Национальной академии наук Таджикистана Джурахонзода Рауф Джурахон - доктор философии (PhD), доцент, проректор по международным связям Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими.
Ведущая организация:	Горно-металлургический институт Таджикистана

Защита диссертации состоится «10» ноября 2026 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 6D.KOA-091 при Таджикском техническом университете имени академика М.С. Осими по адресу: 734042, г. Душанбе, ул. академиков Раджабовых, 10а. E-mail: hboboev1967@gmail.com тел.: (+992) 933101167.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими www.ttu.tj.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета,
кандидат технических наук

Х.Б. Бобоев

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. [1], Герасимовым И.П. [2] и Соколовым В.Е. [3]. В трудах Теличенко В.И. [4], Ильичева В.А. [5], Азарова В.Н. [6], Медоуза Д. [7], Форрестера Дж. [8], Стольберга В.Ф. [9], Чистяковой С.Б. [10], Садовниковой Н.П. [11] и др. исследована проблема анализа загрязнения атмосферного воздуха при управлении урбанизированной территорией. Вопросы построения автоматизированных систем экологического мониторинга занимались российские ученые Моисеев Н.Н. [12], Аверин Г.В. [13] и др. В научных трудах Берлянда М.Е. [14], Оникул Р.И., Генихович Е.Л. [15] и др. сформулированы фундаментальные математические модели загрязнения атмосферы. Вопросы изучения уровней загрязнения воздуха мелкодисперсными частицами в городах посвящены труды С.А. Роу и D.W. Dockery [16], А.Р. Шагидуллина [17] и отечественных ученых Абдуллозода С.Ф. и Тиллозода Х.И. [18].

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» [8-А].

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 низкобюджетных 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 РМ_{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 автоматизированной информационной системы (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 Республики 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 практических рекомендаций 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении всесторонне обоснована актуальность темы исследования, определены цель, задачи, объект и предмет диссертационной работы. Изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, степень достоверности полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, а также раскрыты структура диссертации и логическая последовательность изложения материала.

В первой главе «Теоретико-методические основы мониторинга качества атмосферного воздуха и анализ экологической обстановки города Душанбе» рассмотрены методы и средства измерения концентраций загрязняющих веществ, методики расчёта индексов качества воздуха, природно-климатические и антропогенные факторы формирования загрязнения атмосферы города Душанбе, а также выполнен анализ действующей системы экологического мониторинга. Глава состоит из четырёх параграфов и завершается выводами.

1.1. Методы и средства измерения концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. Выполнена классификация технологий наблюдения по пяти группам: ручные химико-аналитические методы, автоматические стационарные посты, низкобюджетные сенсорные сети, мобильные измерительные платформы и дистанционное зондирование (рисунок 1).

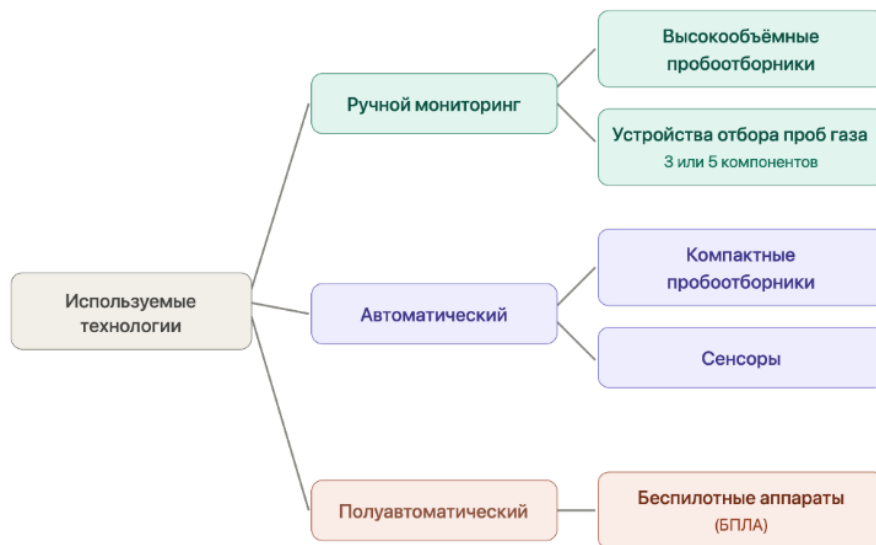


Рисунок 1. - Классификация технологий мониторинга качества атмосферного воздуха

«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». Этот вывод согласуется с оценкой E. G. Snyder и соавт. «о смене парадигмы мониторинга при переходе к компактным сенсорам» [19] и с результатами Y. Wang и соавт., по которым «оптические датчики рассеяния света обеспечивают быстрый отклик при низкой стоимости и энергопотреблении» [20].

1.2. Методики расчёта индексов качества атмосферного воздуха. Проведён сопоставительный анализ методик, принятых в России и странах СНГ (ИЗА, КИЗА, показатель Р), США и Австралии (AQI, AQC), Великобритании (DAQI), государствах Европейского союза (CAQI, ATMO), Канаде и Гонконге (AQHI), Сингапуре (PSI) и Китае (API). Выявлены основные ограничения индекса КИЗА: доминирование малых примесей, прежде всего формальдегида, в суммарном значении; опора на среднегодовые концентрации, исключающая оперативный контроль; чувствительность к пересмотру нормативов ПДК. Обосновано, что определение итогового индекса по максимальному значению подиндекса методически более корректно, поскольку усреднение способно скрыть опасное превышение по отдельному загрязнителю.

1.3. Природно-климатические и антропогенные факторы формирования загрязнения атмосферного воздуха города Душанбе. 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» [5-А]. «Основными источниками загрязнения выступают индивидуальное отопление, энергетика, транспорт, промышленность и переносимая ветром пыль» [6-А].

По прогнозной оценке, Всемирного банка, наибольший потенциал сокращения воздействия PM_{2.5} к 2040 г. связан с жилым отоплением (49 %), дорожным транспортом (25 %), муниципальными отходами (12 %), промышленностью (7 %) и электростанциями (4 %) (рисунок 2).

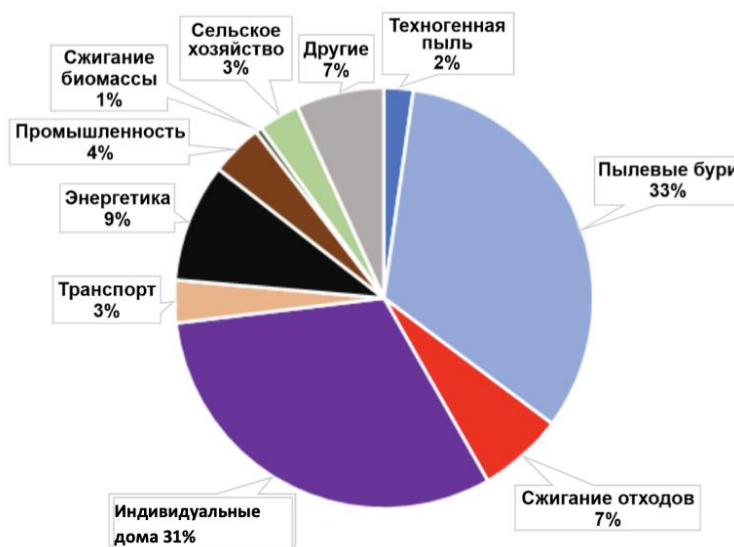


Рисунок 2. - Процентное соотношение источников выбросов PM_{2.5}

«Выявлены выраженная сезонная и межгодовая изменчивость загрязнения и эпизоды экстремального роста концентраций, связанные с пылевыми вторжениями» [5-А, 6-А]. Сопоставление данных автоматической станции и экспериментальных наблюдений показало систематическое занижение среднегодовых концентраций PM_{2.5} в эпизодических измерениях, что подтверждает необходимость непрерывного мониторинга.

1.4. Анализ действующей системы экологического мониторинга атмосферного воздуха города Душанбе. Анализ проведён «как исследование целостного организационно-функционального механизма, включающего нормативно-правовую базу» [21,22], институциональную архитектуру, наблюдательную сеть, методы получения и распространения данных. Показано, что «система институционально оформлена: субъектом мониторинга выступает Агентство по гидрометеорологии Комитета по охране окружающей среды при Правительстве Республики Таджикистан, к важнейшим задачам которого отнесены мониторинг качества атмосферного воздуха и радиационного загрязнения» [22]. Вместе с тем «выявлены существенные ограничения существующей системы: недостаточная плотность наблюдательной сети (одна автоматическая станция Агентства, пять постов с ручным управлением и одна автоматическая станция при Посольстве США), преимущественная ориентация на ПДК-модель оценки, отсутствие развитого прогностического блока и единого городского информационно-аналитического пространства (рисунок 3)» [2-А].

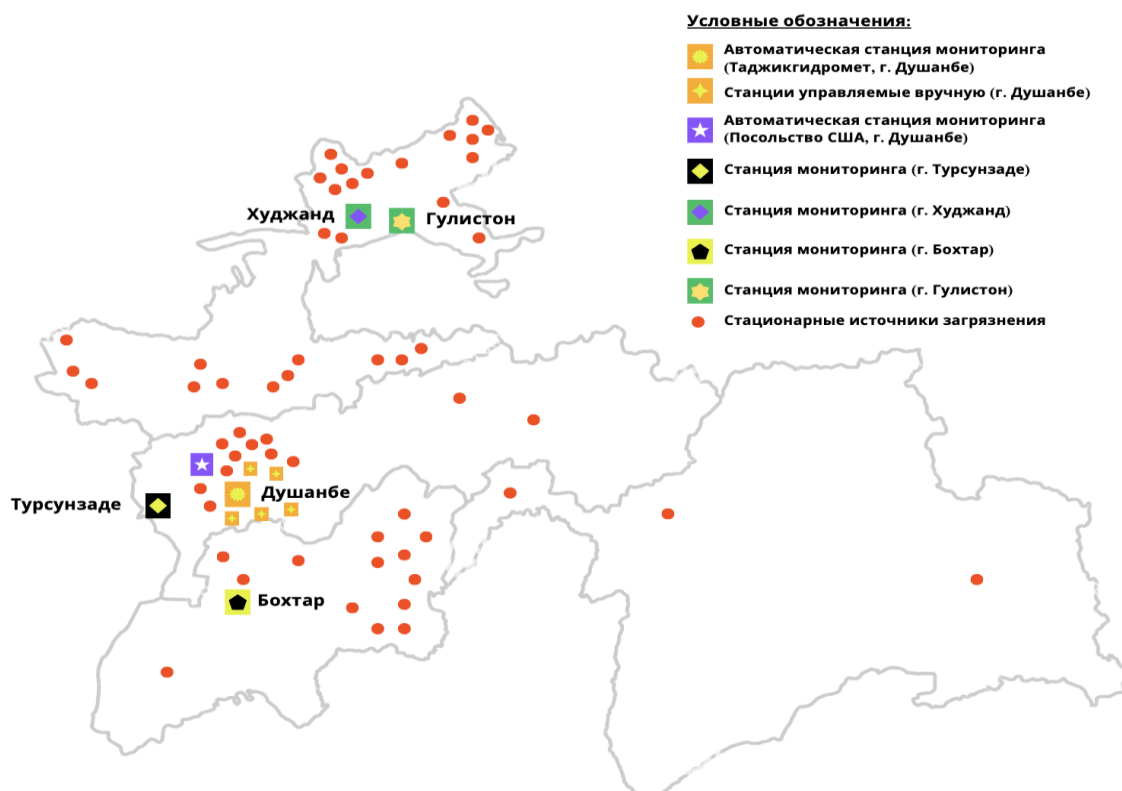


Рисунок 3. - Расположение станций мониторинга и стационарные источники загрязнения в Республике Таджикистан

Обосновано, что «совершенствование системы мониторинга требует перехода к комплексной цифровой системе, обеспечивающей плотное пространственное покрытие городской территории, интеграцию данных мобильного, стационарного и внешнего цифрового мониторинга, переход от ПДК-ориентированной отчётности к риск-ориентированной модели, развитие прогностического блока и создание единой аналитической среды для сценарного управления качеством воздуха» [2-А, 3-А, 6-А].

Вторая глава «Экспериментальные исследования и статистический анализ загрязнения атмосферного воздуха города Душанбе мелкодисперсными частицами PM_{2.5}» посвящена «обоснованию выбора измерительного оборудования, оценке метрологической пригодности оптических датчиков, результатам натурных измерений концентраций PM_{2.5} в различных природно-территориальных и метеорологических условиях и статистическому анализу многолетнего временного ряда» [4-А]. Глава состоит из четырёх параграфов и завершается выводами.

2.1. Обоснование выбора измерительного оборудования для мониторинга концентраций PM_{2.5}. «В качестве средства мониторинга обоснован выбор оптического датчика твёрдых частиц SPS30 (Sensirion), работающего на принципе лазерного рассеяния при длине волны $\lambda \approx 660$ нм и обеспечивающего измерение фракций PM_{1.0}, PM_{2.5}, PM₄ и PM₁₀ в диапазоне 0–1000 мкг/м³ с интервалом обновления данных 1 с, рабочим диапазоном температур от –10 до +60 °С и расчётным сроком службы более 10 лет» [4-А]. На рисунке 3 приведена схема работы оптического датчика типа SPS30.

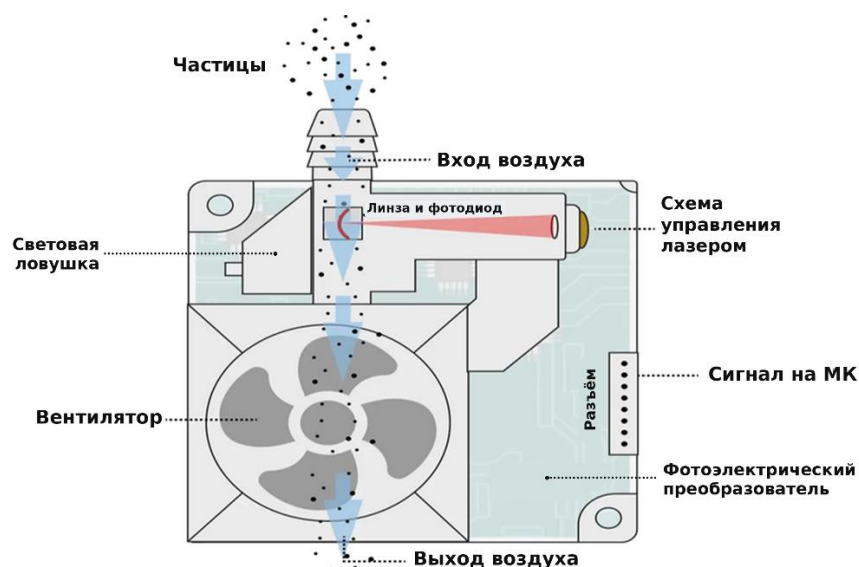


Рисунок 3. - Оптический датчик типа SPS30 (схема работы)

При пересечении лазерного луча частицами аэрозоля, которые содержатся в воздухе каждая частица рассеивает свет лазера. 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. H. Nagan и J. H. Kroll, показавшие, что «оценка массы по светорассеянию зависит от показателя преломления и плотности частиц, которые заранее неизвестны» [23].

Показано, что «подобные малогабаритные сенсоры не заменяют государственные станции наблюдения, но являются экономически эффективным решением при построении распределённых сетей в условиях ограниченного финансирования и необходимости организации большого числа точек наблюдения» [4-А].

2.2. Оценка пригодности оптических датчиков типа SPS30 для измерения PM2.5. Оценка межсенсорной воспроизводимости по группе из восьми датчиков SPS30 показала последовательное снижение коэффициента вариации при увеличении интервала усреднения: с 27,8 % при одноминутном осреднении до 17,7 % при часовом и 15,0 % при суточном. Сопоставление с эталонным монитором Fidas 200S подтвердило, что наиболее достоверные результаты достигаются при среднечасовом усреднении данных (табл. 1).

Таблица 1. – Метрики точности датчиков SPS30 и PurpleAir относительно эталонного монитора Fidas 200S

Датчик	R^2 , 15 мин	RMSE, 15 мин, мкг/м ³	a, 15 мин	R^2 , 1 час	RMSE, 1 час, мкг/м ³	a, 1 час
S1	0,51	6,05	0,65	0,85	2,94	0,85
S3	0,50	5,91	0,64	0,85	2,85	0,83
S6	0,48	9,73	0,99	0,77	5,20	1,15
Среднее по восьми SPS30	0,54	6,74	0,78	0,86	3,38	0,99
PurpleAir	0,58	8,46	1,07	0,85	4,79	1,37

Оценка соответствия целевым показателям Агентства по охране окружающей среды США показала, что по коэффициенту вариации, параметрам смещения и нормированной ошибке датчик соответствует критериям при обоих интервалах усреднения, по линейности и RMSE – при часовом усреднении, тогда как стандартное отклонение превышает рекомендуемый предел. Дополнительно установлено, что «учёт относительной влажности

в калибровочной модели повышает точность измерений (табл. 2), что подтверждает вывод R. Jayaratne и соавт. о гигроскопическом завышении показаний оптических датчиков» [24].

Таблица 2. – Калибровочные уравнения и качество модели (среднечасовые данные)

Вид модели	Уравнение	R ²	RMSE, мкг/м ³
Линейная модель	$S = a_1 \cdot PM_{2.5} + i$	0,86	3,38
Модель с учётом относительной влажности	$S = a_1 \cdot PM_{2.5} + a_2 \cdot RH + i$	0,88	3,05
Модель с учётом температуры	$S = a_1 \cdot PM_{2.5} + a_2 \cdot T + i$	0,87	3,20

Таким образом, датчик SPS30 применим «как вспомогательное измерительное средство при условии корректной обработки, среднечасового усреднения, влажностной калибровки и периодической поверки по референсным станциям, что согласуется с обобщением M. R. Giordano и соавт» [25].

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

По результатам натурных экспериментов установлена «выраженная суточная динамика концентраций PM_{2.5} в городской среде: снижение со 120–140 мкг/м³ в утренние часы до 15–25 мкг/м³ во второй половине дня при среднем значении за период наблюдения 49,4 мкг/м³ [4-A] (рисунок 4).

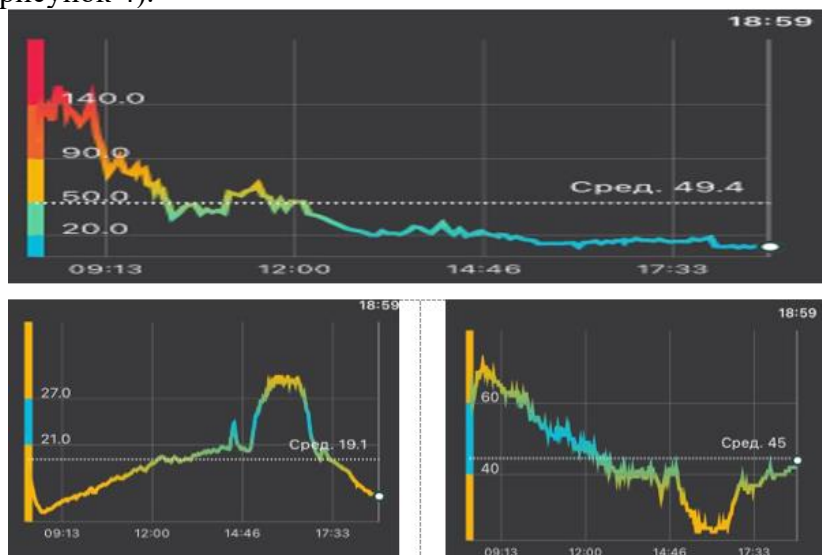


Рисунок 4. - Результаты измерений концентрации PM_{2.5}, мкг/м³

В воздушном бассейне реки Варзоб зафиксирован стабильно низкий уровень загрязнения – около 8,8 мкг/м³, близкий к рекомендациям ВОЗ [26], что «подтверждает низкую антропогенную нагрузку и эффективность естественного самоочищения атмосферы в условиях горно-долинной циркуляции [4-A] (рисунок 5).

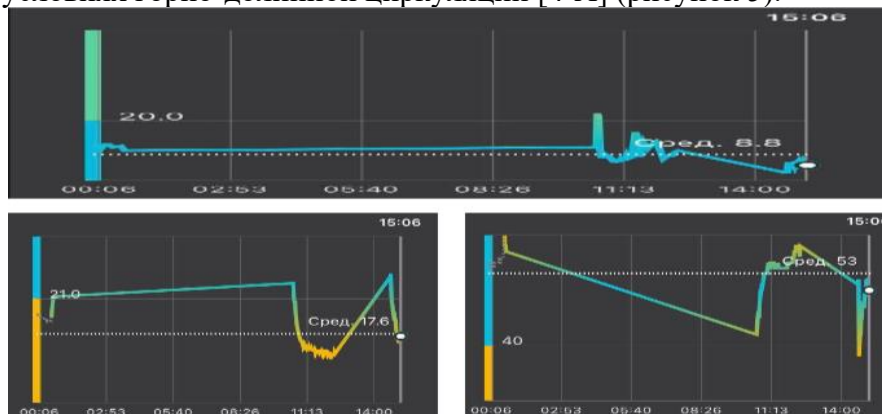


Рисунок 5. - Результаты мониторинга качества воздуха воздушного бассейна реки Варзоб, мкг/м³

«Выявленная зависимость концентраций от температуры, влажности и интенсивности вертикального перемешивания согласуется с положением J. Gong и соавт. о ведущей роли метеорологических предикторов [27] и с результатами X. Zhang и соавт. по суточному ходу концентраций» [28].

«Эксперименты в период пылевого вторжения показали увеличение среднего уровня загрязнения более чем в восемь раз – с 10,2 до 85,4 мкг/м³ при пиковых значениях 300–350 мкг/м³, что подтверждает доминирующую роль трансграничного и регионального переноса пылевых аэрозолей» [4-А] (рисунок 6).

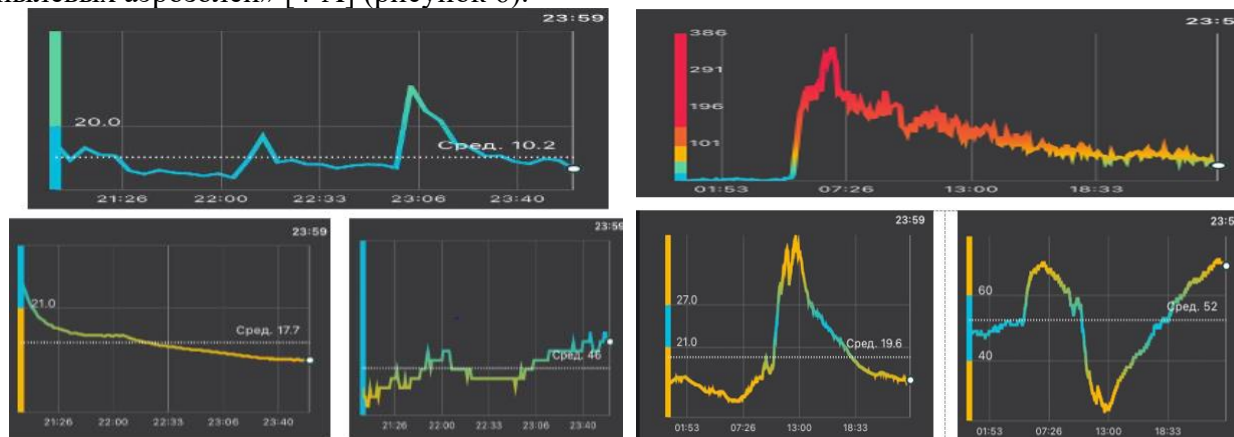


Рисунок 6. - Динамика концентрации PM2.5 до и после пылевого вторжения, мкг/м³

Наблюдения в условиях ясной погоды показали, что даже при отсутствии пылевого переноса вечернее охлаждение и ослабление вертикального перемешивания формируют умеренно повышенный уровень загрязнения (37,7 мкг/м³) с кратковременными пиками до 80–90 мкг/м³, связанными с локальными источниками, в том числе невыхлопными выбросами транспорта (рисунок 7).

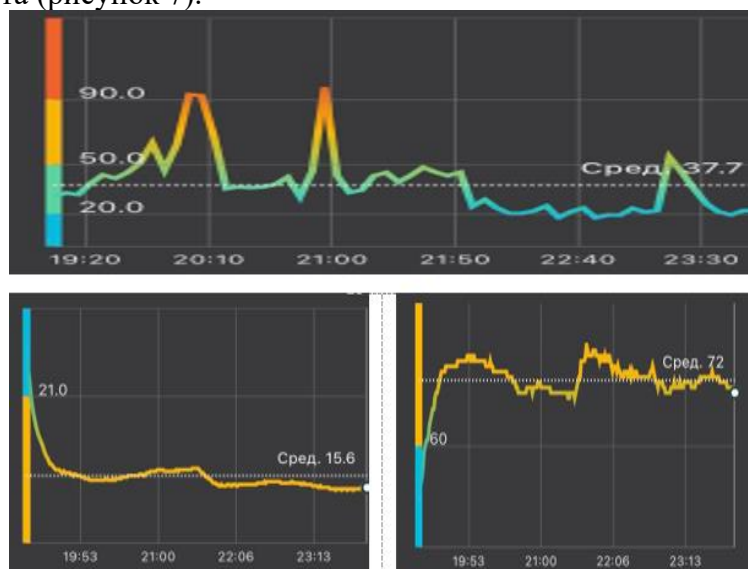


Рисунок 7. - Динамика концентрации PM2.5 в условиях ясной погоды (вечер)

2.4. Статистический анализ многолетнего временного ряда концентраций PM2.5. Статистический анализ выполнен на временном ряде среднесуточных концентраций PM2.5 объемом 2269 наблюдений за период с 25.06.2019 по 14.03.2026. Установлен стабильно высокий уровень загрязнения: среднее значение 120,9 мкг/м³ при медиане 113,0 мкг/м³, стандартном отклонении 48,3 мкг/м³ и размахе от 7,0 до 474,0 мкг/м³. Распределение признано ненормальным ($p = 2,24 \cdot 10^{-144}$), правосторонне асимметричным (коэффициент асимметрии 1,397) с тяжёлыми хвостами (эксцесс 4,318), что представлено на рисунке 8.

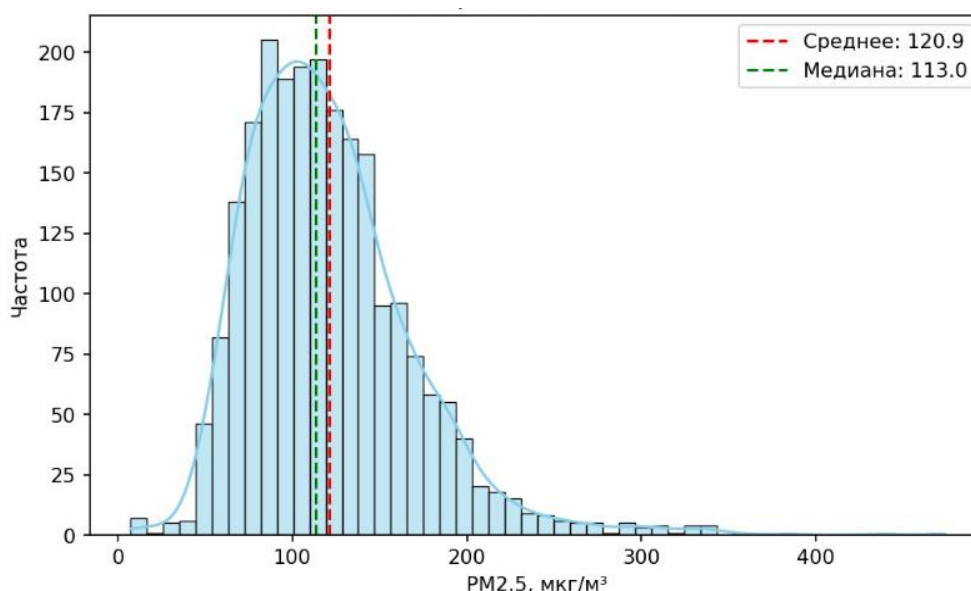


Рисунок 8. - Распределение PM2.5, мкг/м³

Методом межквартильного размаха, восходящим к подходу J. W. Tukey [29], выявлен 61 выброс (2,69 % наблюдений); по критерию 3σ выделено 33 экстремальных дня (1,45 %). Наиболее загрязненным днём за весь период наблюдений стало 23 сентября 2019 г., когда концентрация PM2.5 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 3).

Таблица 3. – Максимально зафиксированные значения PM2.5, мкг/м³

№	Дата	PM2.5, мкг/м³
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 PM2.5 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» [30].

Анализ автокорреляционной структуры показал сильную зависимость текущих концентраций от предшествующих значений: $ACF(1) = 0,727$, $ACF(2) = 0,562$, $ACF(7) = 0,351$, что подтверждает инерционный характер загрязнения и наличие недельной составляющей, связанной с режимом городской активности (рисунок 9).

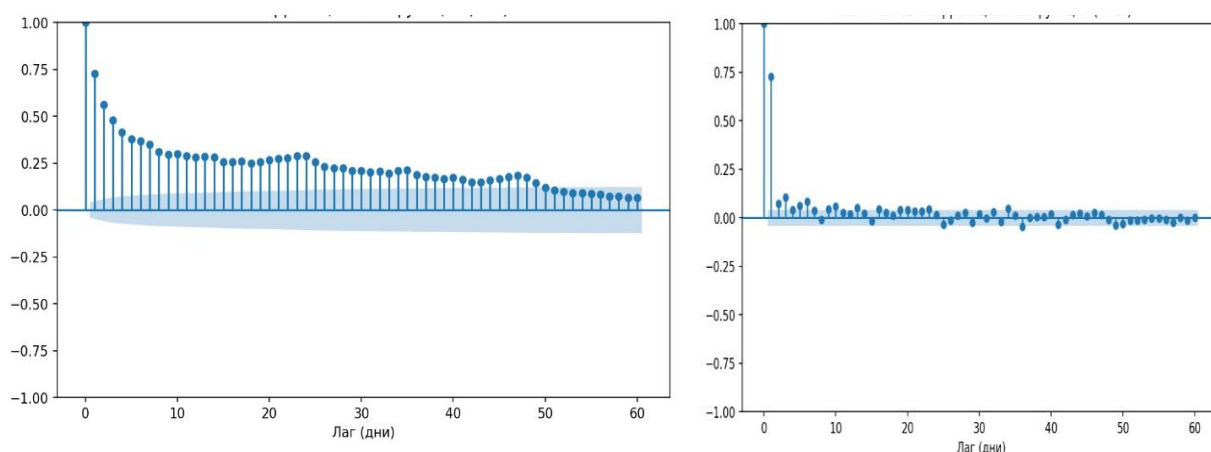


Рисунок 9. - Автокорреляционная функция и частная автокорреляционная функция

Резкое снижение частной автокорреляционной функции после первого лага указывает на авторегрессионную структуру низкого порядка. Расширенный тест Дики – Фуллера ($ADF = -4,997$; $p = 0,000023$) подтвердил стационарность ряда, что создаёт методологическую основу для построения краткосрочных прогнозных моделей на горизонте от 1 до 7 суток.

Сезонно-трендовая декомпозиция ряда показала, что наибольшую долю дисперсии объясняет сезонная компонента (табл. 4) с максимумами в декабре ($158,7 \text{ мкг/м}^3$), январе ($155,6 \text{ мкг/м}^3$) и ноябре ($139,5 \text{ мкг/м}^3$) и минимумами в апреле ($82,3 \text{ мкг/м}^3$), марте ($87,7 \text{ мкг/м}^3$) и мае ($89,5 \text{ мкг/м}^3$). Двукратное сезонное увеличение загрязнения объясняется «ростом отопительной нагрузки, формированием температурных инверсий и ослаблением вертикального перемешивания в холодный период» [31].

Таблица 4. – Доля объяснённой дисперсии компонент временного ряда PM2.5

Компонента временного ряда	Доля объяснённой дисперсии, %
Трендовая составляющая	13,2
Сезонная составляющая	37,3
Остаточная составляющая	31,2

Распределение среднемесячных значений PM2.5 приведены на рисунке 10.

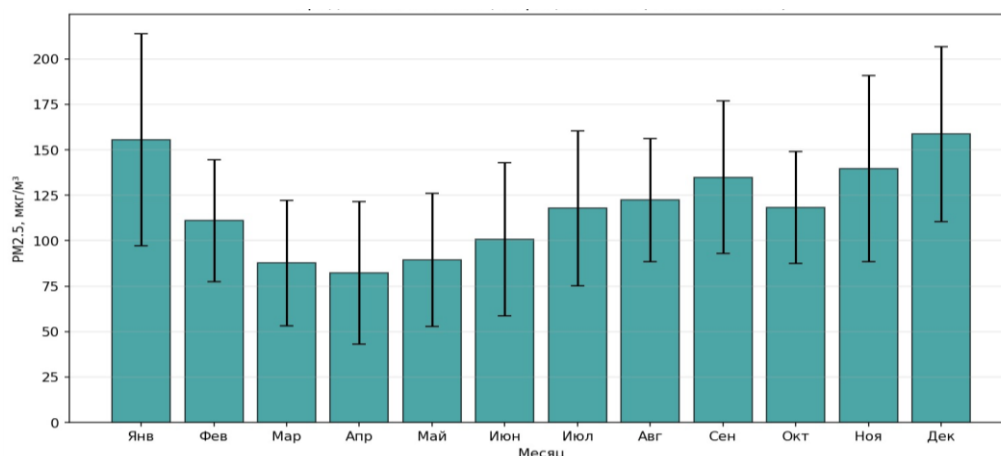


Рисунок 10. - Среднемесячные значения PM2.5, мкг/м³

Минимальные концентрации наблюдались в апреле – $82,3 \text{ мкг/м}^3$, марте – $87,7 \text{ мкг/м}^3$ и мае – $89,5 \text{ мкг/м}^3$. Наиболее загрязненными месяцами оказались декабрь – $158,7 \text{ мкг/м}^3$, январь – $155,6 \text{ мкг/м}^3$ и ноябрь – $139,5 \text{ мкг/м}^3$. Разница между декабрем и апрелем составляет $76,4 \text{ мкг/м}^3$, 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» [31]. Весеннее снижение концентраций связано с усилением ветровой активности, увеличением повторяемости осадков, улучшением атмосферного перемешивания и уменьшением отопительной нагрузки. Оценка линейного тренда выявила слабую положительную динамику концентраций – около $+0,82 \text{ мкг/м}^3$ в год, что указывает на медленное ухудшение качества атмосферного воздуха при доминирующей роли сезонных и эпизодических факторов (рисунок 11).

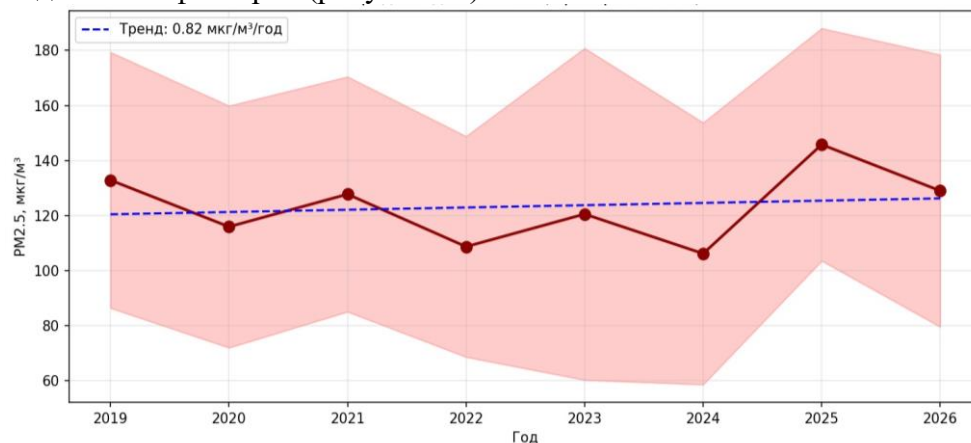


Рисунок 11. - Линейный тренд динамики концентраций PM2.5, мкг/м³

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

Третья глава «Разработка архитектуры и проектных решений автоматизированной информационной системы мониторинга качества атмосферного воздуха в условиях города Душанбе» посвящена построению архитектурной модели распределённой системы мониторинга, разработке её алгоритмического обеспечения, формированию функциональной, объектной и динамической моделей, а также прототипированию пользовательских интерфейсов. Глава состоит из пяти параграфов и завершается выводами.

3.1. Архитектурная модель распределённой системы мониторинга качества атмосферного воздуха. Архитектура системы построена «на концепции киберфизической системы и реализует полный цикл обработки экологических данных – от сбора измерений до автоматизированного реагирования на события, связанные с превышением нормативных показателей» [8-А].

Выбор архитектурного решения опирается на положение L. Atzori и соавт. о том, что «Интернет вещей объединяет разнородные устройства в единую сеть сбора и передачи данных» [32], и на требования к платформенной интеграции разнородных сервисов умного города, сформулированные A. Zanella и соавт. [33]. «Разработанная распределённая информационная система мониторинга качества атмосферного воздуха организована по модульному принципу и включает пять взаимосвязанных модулей: модуль сбора данных, модуль обработки и хранения данных, модуль аналитики и прогнозирования, модуль контроля и реагирования, модуль взаимодействия с пользователями».

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» [34]. Применимость такой организации к городской среде обоснована A. Zanella и соавт., отмечающими, что «архитектура Интернета вещей для умного города должна объединять разнородные устройства и сервисы в единую платформу» [33]. «Предлагаемая система экологического мониторинга качества атмосферного воздуха следующим образом» [8-А].

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» [35].

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 PM2.5, 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. «На архитектуру системы получен малый патент Республики Таджикистан на изобретение, которая представлена на рисунке 12» [8-А].

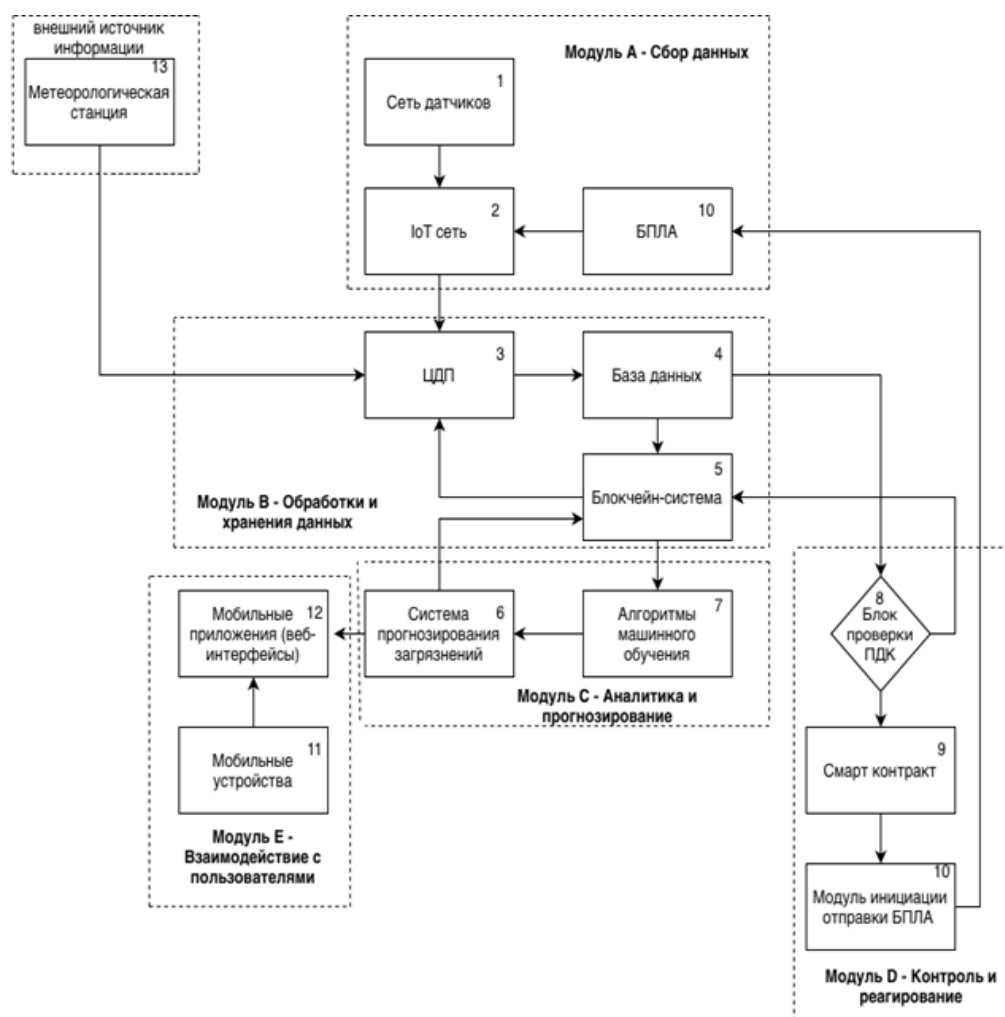


Рисунок 12. - Архитектура РИСМКАВ

3.2. Алгоритмическое обеспечение системы: прогнозирование, слияние данных, блокчейн-верификация и автоматизированное реагирование. Краткосрочное прогнозирование концентраций реализуется ансамблем моделей Random Forest, Gradient Boosting/XGBoost и рекуррентной нейронной сети типа LSTM с адаптивными весовыми коэффициентами:

$$\hat{C}_{ens} = w_1 \hat{C}_{RF} + w_2 \hat{C}_{GB} + w_3 \hat{C}_{LSTM} \quad (1)$$

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.

Обнаружение аномальных ситуаций выполняется путём сравнения текущих измерений с прогнозным доверительным интервалом: аномалия фиксируется при выполнении условия

$$A(t) = \{1, \text{если } |C(t) - \hat{C}(t)| > \lambda\sigma, 0, \text{если } |C(t) - \hat{C}(t)| \leq \lambda\sigma \quad (2)$$

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 выявлять не только уже произошедшие превышения ПДК, но и прогнозировать вероятность их возникновения в ближайшем временном интервале.

Интегральная оценка концентрации загрязняющего вещества в заданной точке территории определяется алгоритмом слияния данных разнородных источников:

$$C_{fused}(x, y, t) = \frac{\sum_{k=1}^n q_k \cdot r_k \cdot C_k(x, y, t)}{\sum_{k=1}^n q_k \cdot r_k} \quad (3)$$

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.

$$r_k = \exp(-\alpha d_k - \beta \Delta t_k) \quad (4)$$

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 предлагаемого решения и позволяет повысить достоверность оценки качества воздуха при неоднородной плотности датчиков, временных задержках передачи данных и наличии локальных выбросов.

Обоснована реализация блокчейн-системы с гибридным хранением данных: исходные массивы сохраняются в централизованной базе данных, а в распределённом реестре фиксируются их верификационные записи, включающие идентификатор датчика, временную метку, координаты источника, хэш исходного пакета данных, значение концентрации, статус проверки и цифровую подпись узла.

$$BlockRecord = \{ID_s, T, Geo, H(data), C_i, Status, Sign\} \quad (5)$$

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.

Проверка целостности выполняется повторным вычислением хэша и его сопоставлением с ранее записанным значением; при несовпадении запись маркируется как недостоверная и исключается из автоматического принятия решений.

$$H(data_{current}) = H(data_{blockchain}) \quad (6)$$

Такое решение опирается на положение S. Nakamoto о том, что «цепочка блоков с хеш-связями обеспечивает защиту записей от незаметного изменения» [36], и на свойства децентрализации, неизменяемости и прослеживаемости, выделенные Z. Zheng и соавт. [37]. Смарт-контракт, реализующий автоматическое реагирование на превышение ПДК, соответствует концепции доверенного взаимодействия устройств Интернета вещей без центрального посредника; предложен метод адаптивного построения маршрута БПЛА по показателю риска.

Условие активации смарт-контракта может быть представлено следующим образом:

$$SC = \{1, \text{если } C_{fused}(t) > PDK_i \text{ или } P(C_i(t + \Delta t) > PDK_i) > \gamma\} \quad (7)$$

{0, 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.

Маршрут БПЛА строится с учётом следующих параметров:

$$Route = F(Geo_{risk}, C_{fused}, Wind, Relief, Battery, NoFly) \quad (8)$$

где Geo_{risk} – координаты зоны экологического риска;

C_{fused} – объединённая 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:

$$R(x, y) = a \cdot \frac{C_{fused}(x, y)}{PDK_i} + b \cdot P(C_i(t + \Delta t) > PDK_i) + c \cdot V_{wind} \quad (9)$$

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.

3.3. Функциональная модель системы: бизнес-процессы, требования и варианты использования. Функционирование системы формализовано в виде четырёх взаимосвязанных бизнес-процессов – мониторинг, оценка состояния, прогнозирование и управляющее воздействие, – образующих замкнутый цикл управления. Как отмечают К. Вигерс и Дж. Битти, «качество программной системы во многом определяется полнотой и непротиворечивостью её требований» [38]. Так, были выделены 20 функциональных и 7 нефункциональных требований и построена трассировочная таблица, связывающая требования с модулями и компонентами системы.

Построены диаграммы вариантов использования, включающие 9 акторов и 21 вариант использования, объединённых в 5 функциональных пакетов. Функциональная структура подсистемы сбора данных представлена на рисунк 13, где отражены ключевые сценарии взаимодействия системы с источниками данных. В построенной диаграмме демонстрируется логическая организация процессов приема, обработки и первичной подготовки измерительной информации (рисунк 13).

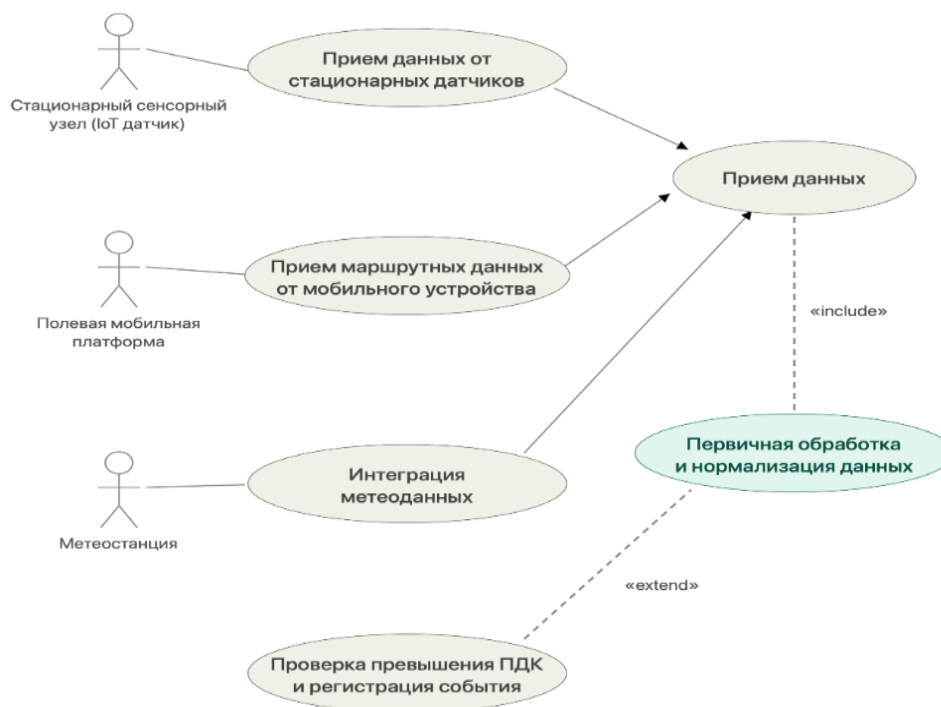


Рисунок 13. - Диаграмма вариантов использования пакета P-A: Data Acquisition (сбор первичных данных)

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 14.

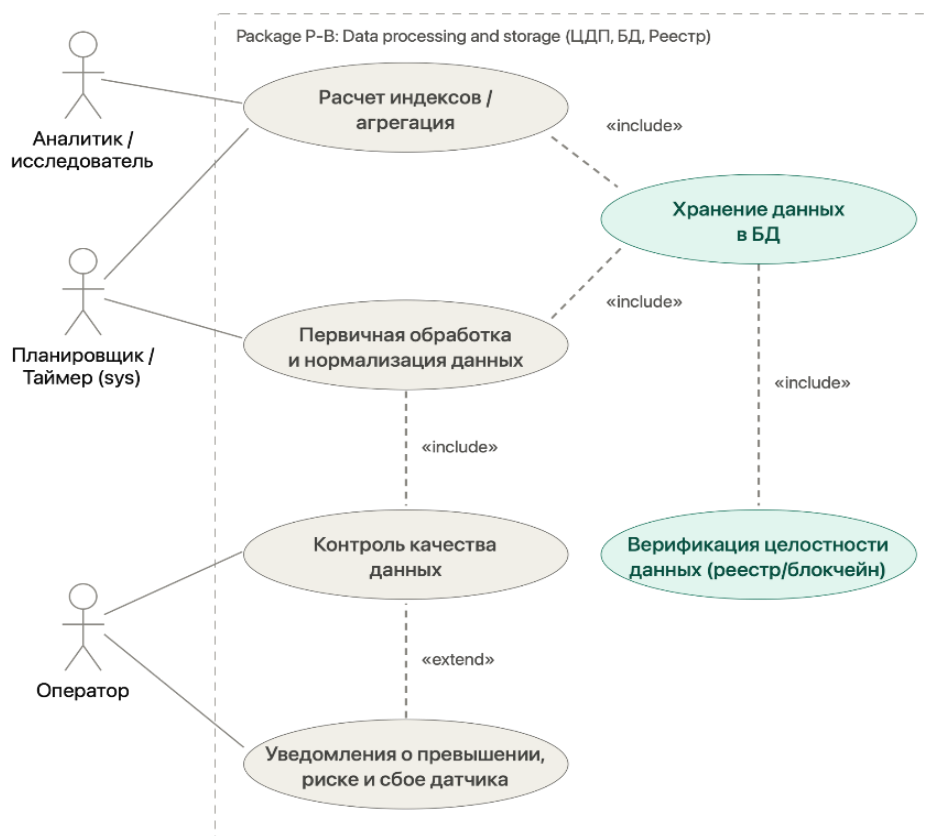


Рисунок 14. - Диаграмма вариантов использования пакета P-B: Data Processing & Storage (хранение и обработка данных)

3.4. Объектная и динамическая модели системы. Разработана диаграмма классов, включающая 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. Объектная модель обеспечивает согласование структуры данных сенсорной сети, метеорологического блока, базы данных и аналитической подсистемы. 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..*]. Выбор связей типа ассоциации, агрегации, композиции и их кратностей обусловлено семантикой предметной области и требований к целостности данных, масштабируемости и расширяемости системы.

В диаграмме последовательности SD-01 (рисунок 15) 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.

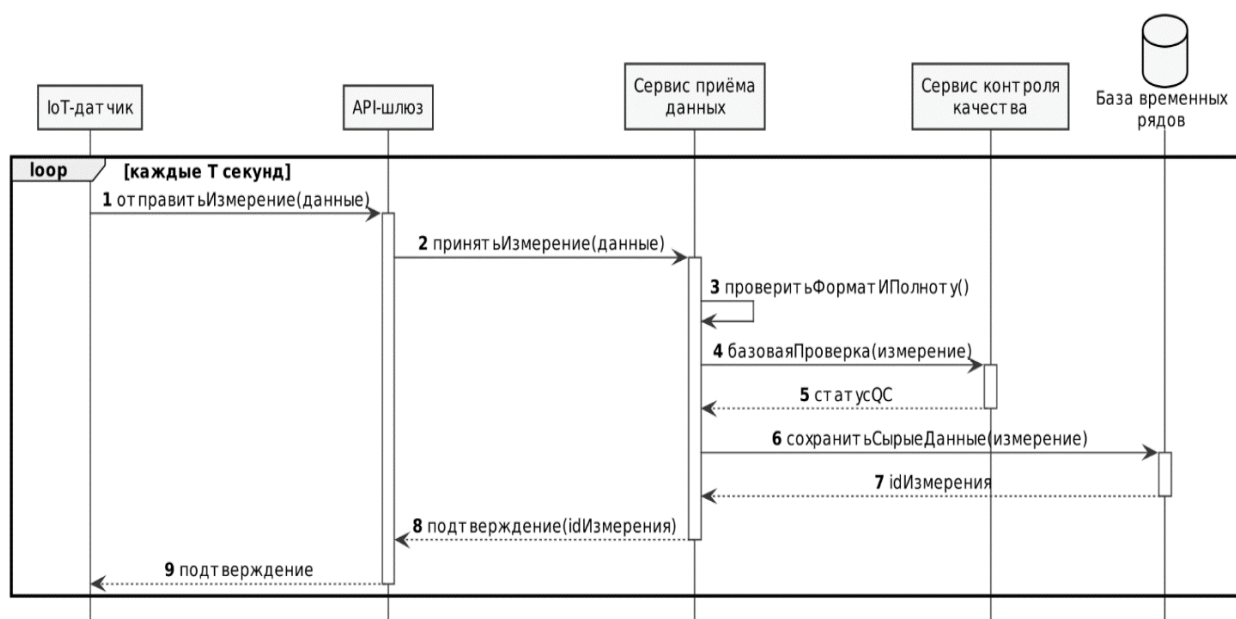


Рисунок 15. - SD-01. Передача измерений концентраций загрязняющих веществ от IoT-датчика

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.

3.5. Прототипирование пользовательских интерфейсов и ожидаемый эффект внедрения системы в условиях города Душанбе. Разработан комплект из 13 интерактивных прототипов пользовательского интерфейса – панель мониторинга, карта датчиков, информационное ядро системы, модуль блокчейн-верификации, прогнозный модуль, экран проверки ПДК, модуль смарт-контракта, модуль управления БПЛА, модуль уведомлений, модуль отчётности, личный кабинет и другие, формирующих единую цифровую платформу и подтверждающих реализуемость предложенной архитектуры. На рисунке 16 представлен один из разработанных прототипов, где отображается пространственное отображение сети мониторинга.

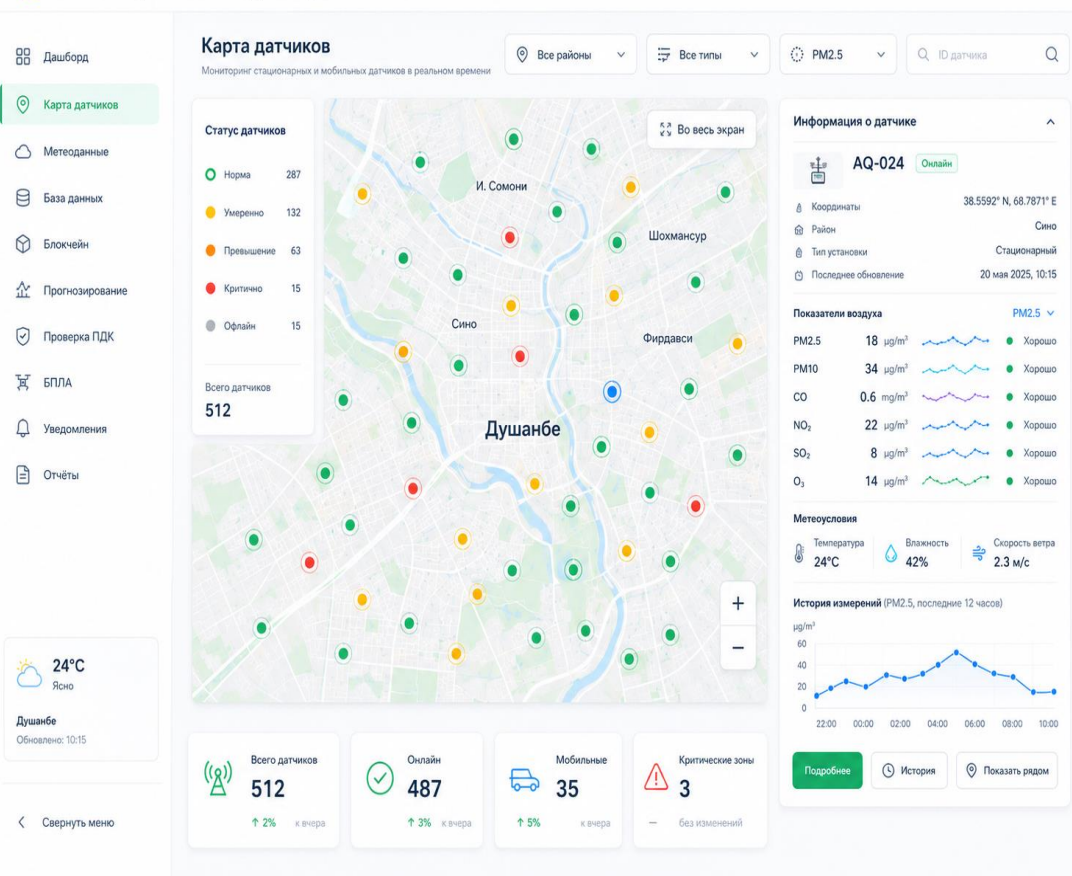


Рисунок 16. - Карта датчиков

Его основное назначение заключается в визуализации расположения стационарных и мобильных измерительных устройств, а также в отображении их текущего статуса, уровня загрязнения и технического состояния. 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» [39].

«Обоснована целостная проектная модель автоматизированной информационной системы экологического мониторинга, обеспечивающая переход от описательного (реактивного) мониторинга к проактивному управлению экологической ситуацией в условиях города Душанбе». Ожидаемый эффект внедрения системы «выражается в повышении оперативности выявления превышений допустимых концентраций, увеличении пространственной детализации наблюдений, обеспечении доказуемой целостности экологических данных и формировании информационной основы для принятия природоохранных решений» [3-А, 7-А, 8-А].

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 распределённой информационной системы мониторинга качества атмосферного воздуха и комплект проектной документации – требования, трассировочную таблицу, диаграммы классов и последовательности,

прототипы пользовательских интерфейсов рекомендуется использовать при программной реализации городской автоматизированной системы экологического мониторинга города Душанбе и других городов с аналогичными природно-климатическими и инфраструктурными условиями.

Комитету охраны окружающей среды при Правительстве Республики Таджикистан и Агентству по гидрометеорологии рекомендуется развивать наблюдательную сеть на основе интеграции стационарных постов с распределёнными сетями низкобюджетных оптических датчиков при обязательном среднечасовом усреднении данных, влажностной калибровке и периодической проверке по референсным станциям, что позволит существенно повысить пространственную детализацию наблюдений при ограниченных затратах.

При интерпретации данных мониторинга и планировании природоохранных мероприятий рекомендуется учитывать установленные закономерности сезонной динамики $PM_{2.5}$ с максимумами 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.

Методику проведения экспериментальных измерений концентраций $PM_{2.5}$ и порядок статистической обработки многолетних рядов наблюдений рекомендуется использовать в учебном процессе высших учебных заведений при преподавании дисциплин «Экология» и «Безопасность жизнедеятельности», а также при выполнении научно-исследовательских работ в области экологического мониторинга.

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. Израэль, Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды / Ю. А. Израэль. – 2-е изд. – М. : Гидрометеиздат, 1984. – 560 с.
2. Герасимов, И. П. Научные основы современного мониторинга окружающей среды / И. П. Герасимов // - Известия АН СССР. Серия географическая. – 1975. – № 3. – С. 13–25.
3. Соколов, В. Е. Биосферные заповедники – эталоны природы / В. Е. Соколов, Ю. А. Израэль // Природа. – 1981. – № 1. – С. 74–90.
4. Теличенко, В. И. Основы биосферной совместимости зданий, сооружений и городских территорий / В. И. Теличенко // Вестник МГСУ. – 2011. – № 3, т. 1. – С. 8–14.
5. Ильичёв, В. А. Биосферная совместимость: технологии внедрения инноваций. Города, развивающие человека / В. А. Ильичёв. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. – 240 с.
6. 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.
7. Медоуз, Д. Пределы роста. 30 лет спустя / Д. Медоуз, Й. Рандерс, Д. Медоуз ; пер. с англ. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 358 с.
8. Форрестер, Дж. Мировая динамика / Дж. Форрестер ; пер. с англ. – М. : АСТ ; СПб. : Terra Fantastica, 2003. – 379 с.
9. Стольберг, В. Ф. Экология города : учебник / В. Ф. Стольберг. – Киев : Либра, 2000. – 464 с.
10. Чистякова, С. Б. Охрана окружающей среды : учебник для вузов / С. Б. Чистякова. – М. : Стройиздат, 1988. – 272 с.
11. Садовникова, Н. П. Экологическая безопасность города: поддержка принятия решений : монография / Н. П. Садовникова, Д. С. Парыгин. – Волгоград : ВолгГТУ, 2013. – 116 с.
12. Моисеев, Н. Н. Математические задачи системного анализа / Н. Н. Моисеев. – М.: Наука, 1981. – 488 с.
13. Аверин, Г. В. Системодинамика : монография / Г. В. Аверин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Донецк : Фолиант, 2022. – 405 с.
14. Берлянд, М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Л. : Гидрометеиздат, 1985. – 272 с.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.

Серия: Науки о Земле и окружающей среде. Энергетика и электротехника. Химические технологии, науки о материалах, металлургия. – 2025. – № 1(5). – С. 56–64. – EDN FMFIQS.

19. 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.

20. 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.

21. 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).

22. 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).

23. 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.

24. 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.

25. 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.

26. 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).

27. 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.

28. 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.

29. Tukey, J. W. *Exploratory data analysis* / J. W. Tukey. – Reading, MA : Addison-Wesley, 1977. – 688 p. – ISBN 978-0-201-07616-5.

30. 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.

31. 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

32. 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.
33. 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/IIOT.2014.2306328.
34. 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.
35. 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/IIOT.2016.2579198.
36. 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).
37. 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.
38. 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.
39. 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-А]. **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-А]. **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-А]. **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-А]. **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-А]. **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.

АКАДЕМИЯИ МИЛЛИИ ИЛМҲОИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН

Институти масъалаҳои об, гидроэнергетика ва экология

ТДУ 504.064.36

Бо ҳукуқи дастнавис



ҲАҚДОДОВ АКБАРҶОН МАҲМАДШАРИФОВИЧ

**ТАКМИЛИ НИЗОМИ МОНИТОРИНГИ ЭКОЛОГИИ СИФАТИ
ҲАВОИ АТМОСФЕРА ДАР ШАРОИТИ ШАҲРИ ДУШАНБЕ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т И

диссертатсия барои дарёфти дараҷаи илмӣ номзади илмҳои техникӣ
аз рӯйи ихтисоси 2.9.6. Экология

Душанбе – 2026

Диссертатсия дар Институти масъалаҳои об, гидроэнергетика ва экологияи Академияи миллии илмҳои Ҷумҳурии Тоҷикистон иҷро шудааст.

Роҳбари илмӣ: Амирзода Ориф Ҳамид – доктори илмҳои техникӣ, дотсент, сарҳодими илмӣ Институти масъалаҳои об, гидроэнергетика ва экологияи Академияи миллии илмҳои Ҷумҳурии Тоҷикистон

Муқарризи расмӣ: Аҳмадзода Матин Зафар – доктори илмҳои техникӣ, муовини аввали директори Агентии амнияти химиявӣ, биологӣ, радиатсионӣ ва ядроии Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон

Ҷурахонзода Рауф Ҷурахон – доктори фалсафа (PhD), дотсент, муовини ректор оид ба робитаҳои байналмилалӣ Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ

Муассисаи пешбар: Донишкадаи кӯҳию металлургии Тоҷикистон

Ҳимояи диссертатсия «10» ноябри соли 2026, соати 14:00 дар ҷаласаи шӯрои диссертатсионии 6D.KOA-091 назди Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ баргузор мегардад. Суроға: Ҷумҳурии Тоҷикистон, 734042, ш. Душанбе, хиёбони академикҳо Раҷабовҳо, 10А. E-mail: hboboev1967@gmail.com телефони котиби илмӣ: (+992) 933101167.

Бо диссертатсия ва автореферати он дар китобхона ва сомонаи расмӣ Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ <http://www.ttu.tj> шинос шудан мумкин аст.

Автореферат « ____ » « _____ » соли 2026 равона карда шуд.

Котиби илмӣ шӯрои диссертатсионӣ, номзади илмҳои техникӣ



Ҳ.Б. Бобоев

МУҚАДДИМА

Мубрамии мавзуи таҳқиқот. Мушкилоти ифлосшавии ҳавои атмосфера ба шумори мушкилоти ҷиддии экологӣ мансуб аст, ки тибқи маълумоти Созмони умумиҷаҳонии тандурустӣ ба бемориҳои гуногуни системаҳои дилу рағӣ, нафаскашӣ ва эндокринӣ, аксуламалҳои аллергӣ, патологияҳои саратонӣ ва ғайра оварда мерасонад. Ҳиссаи асосиро дар ифлосшавии сифати ҳавои атмосфераи шаҳри Душанбе зарраҳои майдадисперсии PM_{2.5} мегузоранд, ки нишондиҳандаи калидӣ барои арзёбии сифати ҳавои атмосфера ба шумор меравад. Низоми анъанавии мониторинги сифати ҳавои атмосфера ба постҳои статсионарию мушоҳида ва коркарди даврию додаҳо асос ёфтааст, ки на ҳамеша тафсилоти зарурии фазой-вақтӣ, оперативнокии таҳлил ва пешгӯии ҳолати муҳити ҳавоиро таъмин менамояд. Рушди пуртапиши шаҳр гузаришро аз мушоҳидаҳои пароканда ба низомҳои иттилоотии автоматикунонидашудаи зехнии мониторинг тақозо мекунад, ки қодиранд ҷамъоварӣ, коркард, нигоҳдорӣ, таҳлил, пешгӯӣ ва тасвиркунии бефосилаи додаҳои экологиро дар бораи ҳолати сифати ҳавои атмосфера амалӣ намоянд. Консепсияи пешниҳодшудаи низоми иттилоотии автоматикунонидашудаи зехнии мониторинги сифати ҳавои атмосфера ба ҳамгироии як қатор технологияҳои Индустрияи 4.0 дар як низоми ягонаи модуль асос меёбад, ки вазифаи мубрами илмӣ-амалӣ буда, ҳам барои рушди назарияи мониторинги экологӣ ва ҳам барои баланд бардоштани самаранокии идоракунии ҳифзи табиат дар шароити шаҳри Душанбе аҳамият дорад.

Дарачаи коркарди илмӣ мавзуи таҳқиқот. Масъалаҳои арзёбӣ ва мониторинги сифати ҳавои атмосфера хусусияти байнифаннӣ дошта, ба таҳқиқоти бунёдӣ дар соҳаи физикаи атмосфера, метеорологияи ифлосшавӣ, мониторинги экологӣ ва моделсозии математикии парокандашавии омехтаҳо таъя мекунад. Принципиҳои гузаронидани мониторинги экологӣ дар қорҳои олимони Израэль Ю.А. [1], Герасимов И.П. [2] ва Соколов В.Е. [3] баён шудаанд. Дар осори Теличенко В.И. [4], Ильичёв В.А. [5], Азаров В.Н. [6], Медоуз Д. [7], Форрестер Ч. [8], Стольберг В.Ф. [9], Чистякова С.Б. [10], Садовникова Н.П. [11] ва дигарон мушкилоти таҳлили ифлосшавии ҳавои атмосфера ҳангоми идоракунии қаламрави урбанизатсияшуда таҳқиқ шудааст. Бо масъалаҳои сохтани низомҳои автоматикунонидашудаи мониторинги экологӣ олимони рус Моисеев Н.Н. [12], Аверин Г.В. [13] ва дигарон машғул буданд. Дар осори илмӣ Берлянд М.Е. [14], Оникул Р.И., Генихович Е.Л. [15] ва дигарон моделҳои бунёдии математикии ифлосшавии атмосфера таҳия шудаанд. Масъалаҳои омӯзиши сатҳи ифлосшавии ҳаво бо зарраҳои майдадисперсӣ дар шаҳрҳо ба осори С.А. Роре ва D.W. Dockery [16], А.Р. Шагидуллин [17] ва олимони ватанӣ Абдуллозода С.Ф. ва Тиллозода Х.И. [18] бахшида шудаанд.

Таҳлили таҳқиқоти мавҷуда нишон медиҳад, ки нисбат ба шароити шаҳри Душанбе мушкилоти сохтани низоми маҷмӯии автоматикунонидашудаи иттилоотии мониторинги экологии сифати ҳавои атмосфера ҳанӯз ба таври қофӣ коркард нашудааст. Равишҳои мавҷуда аксаран ё ба ҷамъоварӣ ва нигоҳдории додаҳо ва ё ба унсурҳои алоҳидаи таҳлил ниғаронида шудаанд, вале архитектураи яклухтеро таъмин намекунанд, ки ҷамъоварию сенсорию додаҳо, иттилооти метеорологӣ, санҷиши эътимодноқӣ, пешгӯӣ, назорати зиёдравӣ аз концентратсияҳои ниҳонии иҷозатдодашуда, ташаккули худкори огоҳиномаҳо, ҳамгироии воситаҳои бесарнишин ва дастгирии қабули қарорҳои муттаҳид созад. Ин зарурати таҳқиқоти минбаъдаи илмӣ ва таҳияи ҳалли архитектурӣ, методӣ ва иттилоотӣ-технологиро муайян мекунад, ки ба тақмили низоми мониторинги экологии сифати ҳавои атмосфера дар шаҳри Душанбе равона шудаанд.

Алоқамандии таҳқиқот бо барномаҳо ва мавзӯҳои илмӣ. Мавзӯи қор бо Барномаи давлатии экологии Ҷумҳурии Тоҷикистон барои солҳои 2023–2028 алоқаманд аст, ки дар асоси Стратегияи миллии рушди Ҷумҳурии Тоҷикистон барои давраи то соли 2030 ва солҳои 2025–2030-и рушди иқтисодиёти рақамӣ ва инноватсия дар Тоҷикистон, ки аз ҷониби Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон, мухтарам Эмомалӣ Раҳмон эълон шудааст, таҳия гардидааст.

ТАВСИФИ УМУМИИ ТАҲҚИҚОТ

Мақсади таҳқиқот асосноккунии илмӣ тақмили низоми мониторинги экологии сифати ҳавои атмосфера дар асоси тарҳрезии низоми автоматикунонидашудаи иттилоотӣ-таҳлилӣ мебошад.

Вазифаҳои таҳқиқот. Барои расидан ба ҳадафи гузошташуда ҳалли вазифаҳои зерин зарур аст:

1. Омӯхтани равишҳои асосии чен кардани консентратсияи моддаҳои ифлоскунандаи ҳавои атмосфера, аз ҷумла усулҳои статсионарӣ, сайёр, сенсорӣ, аз масофа ва мушоҳидаи автоматикунонидашуда;
2. Гузаронидани баррасии ҳолати сифати ҳавои атмосфера дар шаҳри Душанбе бо назардошти моддаҳои асосии ифлоскунанда, омилҳои ташаккули ифлосшавӣ, тағйирёбандагии мавсимӣ ва таъсири шароити табиӣ-иқлимӣ;
3. Иҷрои таҳлили низоми мавҷудаи мониторинги экологии сифати ҳавои атмосфера дар шаҳри Душанбе, ошкор кардани маҳдудиятҳои ташкилӣ, техникӣ ва иттилоотӣ-таҳлилии он;
4. Асоснок кардани татбиқпазирии датчикҳои оптикӣ камхарҷ дар низомҳои мониторинги сифати ҳавои атмосфера;
5. Тарҳрезии низоми автоматикунонидашудаи иттилоотии мониторинги сифати ҳавои атмосфера, ки модулҳои функционалии ҷамъоварӣ, коркард, нигоҳдорӣ, таҳлил, пешгӯӣ, назорати зиёдрӯӣ, тасвиркунӣ, огоҳиномаҳо ва ташаккули ҳисоботро дар бар мегирад.

Объекти таҳқиқот низоми мониторинги экологии сифати ҳавои атмосфера дар шароити шаҳри Душанбе мебошад.

Мавзӯи (предмети) таҳқиқот сифати ҳавои атмосфера ва усулҳо, моделҳо, ҳалли архитектурии ва иттилоотӣ-технологии тақмили низоми мониторинги экологии сифати ҳавои атмосфера дар асоси тарҳрезии низоми автоматикунонидашудаи иттилоотӣ мебошанд.

Навгони илмӣ таҳқиқот дар нуқтаҳои зерин ифода меёбанд:

1. Аниқ кардани сохтори низоми муносири мониторинги экологии сифати ҳавои атмосфера ҳамчун раванди бисёрзинагии рақамӣ, ки марҳилаҳои ҷамъоварӣ, тасдиқ, нигоҳдорӣ, таҳлил, пешгӯӣ, назорати зиёдрӯӣ меёри ва дастгирии қабули қарорҳо дар бар мегирад;
2. Асоснок кардани зарурати ҳамгироии сарчашмаҳои статсионарӣ, сайёр ва махсусгардонидашудаи додаҳо дар як низоми ягонаи автоматикунонидашудаи иттилоотии мониторинги ҳавои атмосфера дар шароити шаҳри Душанбе;
3. Асоснок кардани мувофиқати датчикҳои оптикӣ камхарҷ барои чен кардани консентратсияи PM_{2.5} дар муҳити шаҳрӣ ва ба даст овардани модели калибровка бо назардошти намнокии нисбӣ, ки баланд шудани дақиқии ченкуниро таъмин мекунад;
4. Таҳияи архитектураи низоми автоматикунонидашудаи иттилоотии мониторинги экологӣ, ки бо дохил кардани модулҳои ҷамъоварии сенсории додаҳо, иттилооти метеорологӣ, пойгоҳи додаҳо, санҷиши эътимоднокии блокчейнӣ, пешгӯӣ, назорати КҲҚ, смарт-контрактҳо, огоҳиномаҳо ва ҳисоботдиҳӣ фарқ мекунад;
5. Пешниҳоди алгоритми муттаҳидсозии додаҳои сарчашмаҳои гуногунчӣ бо назардошти зарби сифати додаҳо ва зарби муносибати фазой-вақтӣ, инчунин мантиқи воқуниши автоматикунонидашуда ба зиёдрӯӣ аз консентратсияҳои иҷозатдодашудаи моддаҳои ифлоскунанда, ки ташаккули огоҳиномаҳо, сабти ҳодиса дар низоми иттилоотӣ ва огоҳии ченкуниҳои иловагӣ бо истифода аз воситаҳои сайёр ё бесарнишини мушоҳидаҳо пешбинӣ менамояд.

Аҳамияти назариявӣ ва илмӣ амалии таҳқиқот. Дар қор фаҳмиши мониторинг ҳамчун раванди иттилоотӣ-таҳлилӣ аниқ карда шудааст, ки дар он чен кардани моддаҳои ифлоскунанда танҳо яке аз марҳилаҳои низоми мураккабтари арзёбии экологӣ, пешгӯӣ ва дастгирии қарорҳои идоракунӣ мебошад. Архитектураи таҳияшуда метавонад ҳамчун асоси

методӣ барои таҳқиқоти минбаъда дар соҳаи мониторинги зеҳнии экологӣ, платформаҳои рақамии мушоҳидаи сифати ҳаво ва низомҳои пешгӯии хатарҳои экологӣ истифода шавад. Аҳамияти амалии таҳқиқот дар имконияти татбиқи натиҷаҳои бадастомада ҳангоми тақмили низоми мониторинги сифати ҳавои атмосфера дар шаҳри Душанбе ва дигар шаҳрҳо бо шароити монанди табиӣ-иқлимӣ ва инфрасохторӣ мебошад.

«Ҳалли таҳияшуда метавонад ҳангоми тарҳрезии низомҳои автоматикунонидашудаи иттилоотӣ, эҷоди панелҳои экологии шаҳрии мониторинг, ҷорӣ намудани шабакаҳои сенсорӣ, таҳияи модулҳои пешгӯии ифлосшавии ҳаво ва тайёр кардани ҳисоботҳои таҳлилий барои мақомоти идоракунӣ, ҳадамоти экологӣ, ташкилотҳои таълимӣ ва илмӣ истифода шавад» [8-М].

Нуктаҳои ба ҷимоя пешниҳодшаванда:

1. Зарурати тақмили низоми мониторинги экологии сифати ҳавои атмосфера дар шаҳри Душанбе аз ҷиҳати илмӣ асоснок карда шудааст, ки бо тафсилоти нокифояи фазой-вақтии мушоҳидаҳо, оперативнокии маҳдуди таҳлил ва зарурати дастгирии рақамии қарорҳои ҷиғзи табиат вобаста аст.

2. Натиҷаҳои таҳлили таҳқиқоти таҷрибавӣ оварда шудаанд, ки татбиқпазирии датчикҳои оптикӣ камхарҷро дар низомҳои мониторинги сифати ҳавои атмосфера асоснок мекунанд, аз ҷумла шартҳои муқарраршудаи эътимоднокии нишондиҳандаҳои онҳо – миёнагирии соатӣ ва калибровкаи намнокӣ, инчунин қонуниятҳои ошкоршудаи тағйирёбандагии фазой, шабонарӯзӣ ва мавсимии консентратсияи PM2.5 дар шароити шаҳри Душанбе.

3. Лоихаи низоми автоматикунонидашудаи иттилоотии мониторинги сифати ҳавои атмосфера пешниҳод шудааст, ки қоркарди маҷмӯии додаҳои экологӣ, тасвиркунии ҳолати муҳити ҳавоии шаҳрӣ, пешгӯии ифлосшавӣ ва дастгирии иттилоотии қабули қарорҳои ҷиғзи табиатро таъмин мекунад.

Дарачаи эътимоднокии натиҷаҳо. Эътимоднокии натиҷаҳои таҳқиқоти диссертатсионӣ бо истифодаи усулҳои аз ҷиҳати илмӣ асосноки таҳлил, низомноккунии равишҳои муосир ба мониторинги экологӣ, татбиқи муқаррароти меъёрӣ ва методӣ дар соҳаи ҷиғзи ҳавои атмосфера, таҳлили ҳолати воқеии сифати ҳавои атмосфера дар шаҳри Душанбе, инчунин мувофиқати мантиқии меъмории пешниҳодшудаи низоми автоматикунонидашудаи иттилоотӣ таъмин мегардад. Эътимоднокии ҳалли лоихавӣ бо мувофиқати дохилии модулҳои функционалии НАИ, мутобикати архитектураи таҳияшуда ба вазифаҳои мониторинги сифати ҳавои атмосфера ва имконияти татбиқи амалии ҳалли пешниҳодшуда бо истифода аз технологияҳои муосири иттилоотӣ таъмин карда мешавад.

Мутобикати диссертатсия ба шиносномаи ихтисоси илмӣ. Кори диссертатсионӣ ба бандҳои зерини шиносномаи ихтисоси илмӣ КОА-и назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон аз рӯи ихтисоси 2.9.6. Экология мутобикат мекунад:

б.3.8. Таҳия ва тақмили низоми мониторинги экологӣ ва назорат дар нақлиёт;

б.3.9. Асосҳои илмӣ идоракунӣ таъсири антропогенӣ объектҳои нақлиёт дар асоси низомҳои иттилоотӣ;

б.4.3. Принсипҳо ва механизмҳои мониторинги системавии экологӣ, назорати таҳлилий дар соҳаҳои саноат;

б.4.8. Технологияҳои иттилоотӣ ҳамчун воситаи расидан ба самаранокии экологӣ ва иқтисодии қори қорхонаҳои соҳаҳои саноат.

Саҳми шахсии докталаби дарачаи илмӣ дар таҳқиқот аз гузоштани вазифаи илмӣ, таҳлили асосҳои назариявӣ ва методии мониторинги экологии сифати ҳавои атмосфера, омӯзиши ҳолати муҳити ҳавоии шаҳри Душанбе, ошқор кардани маҳдудиятҳои низоми мавҷудаи мониторинг, таҳияи архитектураи низоми автоматикунонидашудаи иттилоотӣ, муайян кардани таркиби модулҳои функционалии он ва тарҳрезии модели иттилоотӣ-таҳлилии мониторинг иборат аст. Аз ҷониби муаллиф дар доираи таҳқиқоти мазкур мақолаҳои илмӣ нашр шуда, апробатсияи натиҷаҳои таҳқиқот дар ҷорабиниҳои илмӣ-амалӣ гузаронида шуда, прототипҳои интерфейсиҳои низоми автоматикунонидашуда

таҳия ва тавсияҳои амалӣ оид ба тақмили низоми мониторинги экологии ҳавои атмосфера дар шаҳри Душанбе таҳия шудаанд.

Тасвиб ва амалисозии натиҷаҳои таҳқиқот. Натиҷаҳои асосии таҳқиқоти диссертатсионӣ дар чорабиниҳои зерин пешниҳод шуданд:

– конференси минтақавии кишварҳои Осиёи Марказӣ C5+1, (ш. Тошканд, Ўзбекистон, соли 2024);

– II-и конференси байналмилалӣ илмӣ-амалӣ, «Масъалаҳои мубрами металлургия дар шароити индустрикунонии босуръати кишвар», ки ба солҳои рушди саноат ва 20-солагии омӯзиш ва рушди илмҳои табиатшиносӣ, дақиқ ва математикӣ дар соҳаи илму маориф бахшида шудааст, (ш. Душанбе, Тоҷикистон, соли 2025);

– конференси III-юми байналмилалӣ илмӣ-амалӣ «Ҳалли табиатнигари мушкilotи экологӣ», ш. Тошканд, Ўзбекистон, соли 2025);

– конференси XXII-юми байналмилалӣ илмӣ-амалии «Идоракунии захираҳои иттилоотӣ», (ш. Минск, Беларус, соли 2026).

Интишорот аз рӯи мавзӯи диссертатсия. Аз рӯи мавзӯи таҳқиқоти диссертатсионӣ 7 кори илмӣ нашр шудааст, аз ҷумла 4 мақола дар нашрияҳои илмӣ тақризшаванда, ки аз ҷониби Комиссияи олии аттестатсионӣ Ҷумҳурии Тоҷикистон тавсия шудаанд, ва 3 нашрия дар маводи конференсҳои байналмилалӣ ва ҷумҳуриявӣ илмӣ-амалӣ. Барои ихтирои архитектураи муосири системаи мониторинги экологии ҳавои атмосферии минтақаи саноатӣ Патенти хурди Ҷумҳурии Тоҷикистон гирифта шудааст. Дар қорҳои нашршуда натиҷаҳои асосии таҳқиқоти диссертатсионӣ, аз ҷумла таҳлили ҳолати ҳавои атмосфера, асосҳои методии мониторинги экологӣ, татбиқи технологияҳои рақамӣ, тарҳрезии меъморӣ низоми автоматикунонидашудаи иттилоотӣ ва таҳияи равишҳо ба қорқарди зеҳнии додаҳои экологӣ инъикос ёфтаанд.

Соҳтор ва ҳаҷми диссертатсия. Диссертатсия аз муқаддима, се боб, хулоса ва рӯйхати адабиёти истифодашуда иборат аст. Ҳаҷми умумии диссертатсия 161 саҳифаи матни мошиннависиро ташкил медиҳад. Қор 55 расм ва 30 ҷадвалро дар бар мегирад. Рӯйхати адабиёти истифодашуда 210 номгӯйро дар бар мегирад.

МАЗМУНИ АСОСИИ ДИССЕРТАТСИЯ

Дар муқаддима мубрамияти мавзӯи таҳқиқот ба таври ҳамаҷониба асоснок қарда, ҳадаф, вазифаҳо, объект ва мавзӯи қори диссертатсионӣ муайян шудаанд. Навғонии илмӣ, аҳамияти назариявӣ ва амалӣ, дараҷаи эътимоднокии натиҷаҳои бадастомада баён шуда, нуқтаҳои асосии ба ҳимоя пешниҳодшаванда таҳия қардида, инчунин соҳтори диссертатсия ва пайдарпаии мантиқии баёни мавод ошқор қарда шудаанд.

Дар боби якум «Асосҳои назариявӣ-методии мониторинги сифати ҳавои атмосфера ва таҳлили вазъи экологии шаҳри Душанбе» усулҳо ва воситаҳои ҷен қардани қонсентратсияи моддаҳои ифлосқунанда, методикаҳои ҳисоби индексҳои сифати ҳаво, омилҳои табиӣ-иқлимӣ ва антропогенӣ ташаққули ифлосшавии атмосфераи шаҳри Душанбе қаррасӣ шуда, инчунин таҳлили низоми амалқунандаи мониторинги экологӣ иҷро қарда шудааст. Боб аз қор қарақраф иборат буда, бо хулосаҳои анҷом меёбад.

1.1. Усулҳо ва воситаҳои ҷен қардани қонсентратсияи моддаҳои ифлосқунанда дар ҳавои атмосфера. Таснифи технологияҳои мушоҳида аз рӯи панҷ қурӯҳ иҷро қарда шудааст: усулҳои дастиӣ ҳимиявӣ-таҳлилий, постҳои автоматиӣ статсионарӣ, шабақаҳои сенсории қамҳарҷ, платқормаҳои сайёри ҷенқунӣ ва зондирони аз масофа (расми 1).



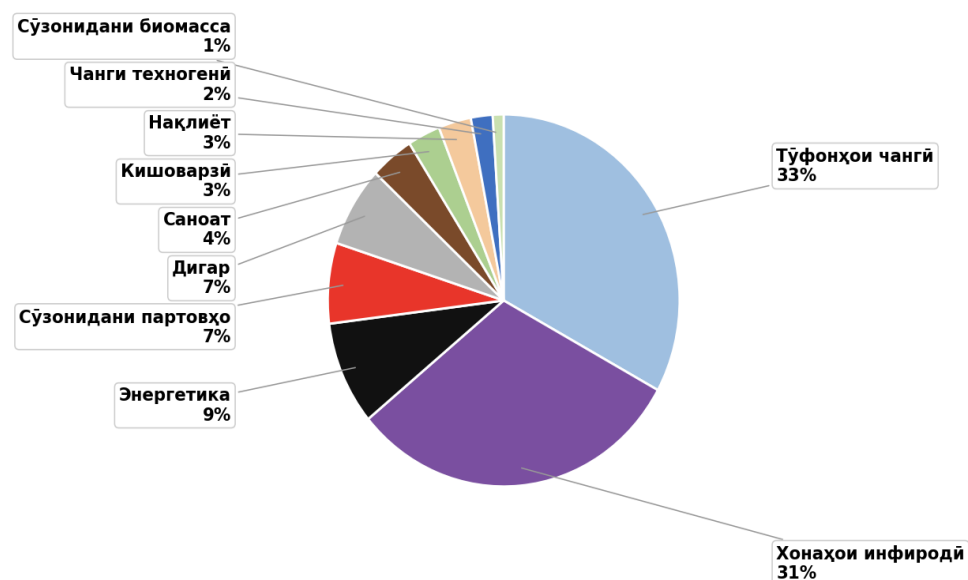
Расми 1. - Таснифи технологияҳои мониторинги сифати ҳавои атмосфера

«Муқаррар карда шудааст, ки усулҳои дастии химиявӣ-таҳлилии асри XX ба таври назаррас бо усулҳои автоматии асри XXI иваз шудаанд, ва барои сохтани шабакаҳои тақсимшудаи мониторинги зарраҳои муаллақ датчикҳои оптикӣ, ки бо принсипи парокандашавии рӯшноӣ кор мекунанд, аз сабаби арзиши паст, истеъмоли ками энергия ва ҷудокунондагии баланди фазой-вақтӣ ояндадортар мебошанд». Ин хулоса бо арзёбии E. G. Snyder ва ҳаммуалифонаш «дар бораи тағйири парадигмаи мониторинг ҳангоми гузариш ба сенсорҳои ихчам» [19] ва бо натиҷаҳои Y. Wang ва ҳаммуалифонаш, ки тибқи онҳо «датчикҳои оптикӣ парокандашавии рӯшноӣ вокуниши тезро ҳангоми арзиш ва истеъмоли пасти энергия таъмин мекунанд» [20], мувофиқат мекунад.

1.2. Методикаҳои ҳисоби индексҳои сифати ҳавои атмосфера. Таҳлили муқоисавии методикаҳои қабулшуда дар Русия ва кишварҳои ИДМ (ИЗА, КИЗА, нишондиҳандаи Р), ИМА ва Австралия (AQI, AQC), Британияи Кабир (DAQI), давлатҳои Иттиҳоди Аврупо (CAQI, АТМО), Канада ва Гонконг (AQHI), Сингапур (PSI) ва Хитой (API) гузаронида шудааст. Маҳдудиятҳои асосии индекси КИЗА ошкор карда шудаанд: бартарии омехтаҳои хурд, пеш аз ҳама формалдегид, дар қимати ҷамъӣ; таъя ба концентратсияҳои миёнасоллона, ки назорати оперативиро истисно мекунад; хассосият ба бознигирии меъёрҳои КХҚ. Асоснок карда шудааст, ки муайян кардани индекси ниҳой аз рӯи қимати ҳадди аксари зериндекс аз ҷиҳати методӣ дурусттар аст, зеро миёнагирӣ метавонад зиёдравии хатарнокро аз рӯи ифлоскунондаи алоҳида пинҳон созад.

1.3. Омилҳои табиӣ-иқлимӣ ва антропогенӣ ташаккули ифлосшавии ҳавои атмосфераи шаҳри Душанбе. Муқаррар карда шудааст, ки «ифлоскунондаи асосии ҳавои атмосфераи шаҳри Душанбе зарраҳои майдадисперсии PM_{2.5} буда, шароити номусоиди парокандашавӣ бо ҷойгиршавии шаҳр дар ҷуқурии байникӯҳӣ, бартарии бодҳои сусти самтҳои шимолӣ ва шимолу шарқӣ ва инверсияҳои ҳароратии давраи хунук вобаста аст» [5-А]. «Сарчашмаҳои асосии ифлосшавӣ гармидиҳии инфиродӣ, энергетика, нақлиёт, саноат ва ҷанги бо бод интиқолшаванда мебошанд» [6-М].

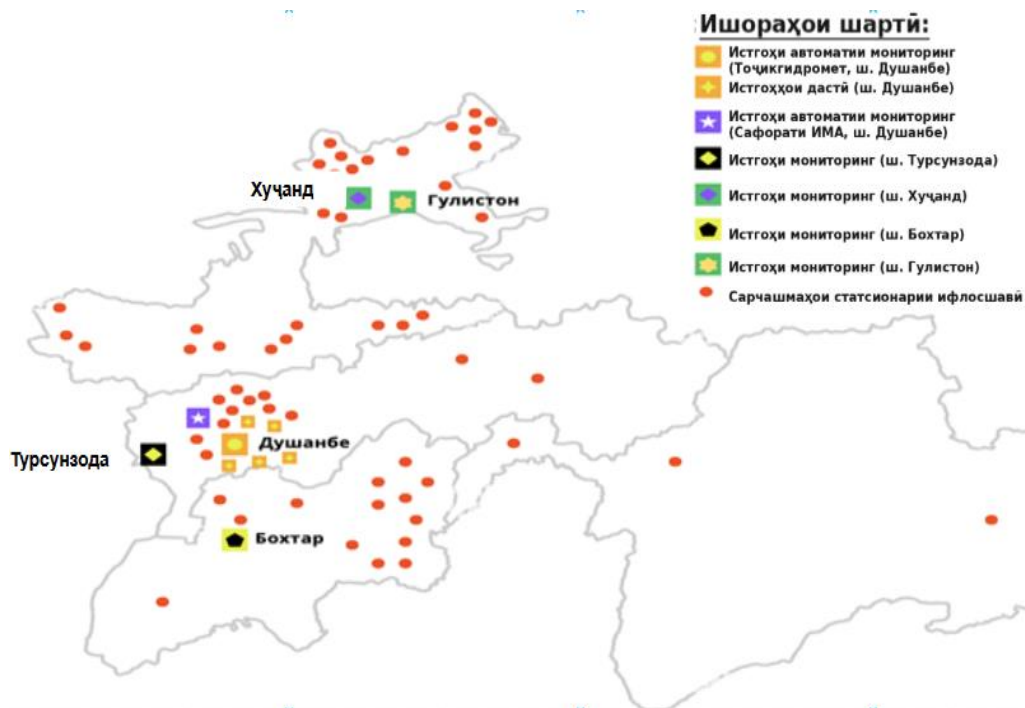
Тибқи арзёбии пешгӯишавандаи Бонки ҷаҳонӣ, иқтисодии бузургтарини коҳиши таъсири PM_{2.5} то соли 2040 бо гармидиҳии манзилӣ (49 %), нақлиёти автомобилӣ (25 %), партовҳои маишӣ (12 %), саноат (7 %) ва нерӯгоҳҳои барқӣ (4 %) вобаста аст (расми 2).



Расми 2. - Таносуби ғоизии сарчашмаҳои партови PM2.5

«Тағйирёбандагии возеҳи мавсимӣ ва байнисолонаи ифлосшавӣ ва эпизодҳои афзоиши низоми концентратсия, ки бо ҳуҷумҳои ҷангӣ алоқаманданд, ошкор карда шудаанд» [5-М, 6-М]. Муқоисаи додаҳои истгоҳи автоматӣ ва мушоҳидаҳои таҷрибавӣ камнишондиҳии системавии концентратсияҳои миёнасолонаи PM2.5-ро дар ҷанкуниҳои эпизодӣ нишон дод, ки зарурати мониторинги бефосиларо тасдиқ мекунад.

1.4. Таҳлили низоми амалкунандаи мониторинги экологии ҳавои атмосфераи шаҳри Душанбе. Таҳлил «ҳамчун таҳқиқи механизми яклухти ташкилӣ-функционалӣ, ки заминаи меъёрӣ-ҳуқуқиро дар бар мегирад» [21,22], меъмории институтсионалӣ, шабакаи мушоҳидавӣ, усулҳои ба даст овардан ва паҳн кардани додаҳо гузаронида шуд. Нишон дода шудааст, ки «низом аз ҷиҳати институтсионалӣ ба расмӣ дароварда шудааст: субъекти мониторинг Агентии гидрометеорологияи Кумитаи ҳифзи муҳити зисти назди Ҳукумати Ҷумҳурии Тоҷикистон мебошад, ки ба вазифаҳои муҳимтарини он мониторинги сифати ҳавои атмосфера ва ифлосшавии радиатсионӣ мансуб доништа шудаанд» [22]. Бо вучуди ин «маҳдудиятҳои муҳими низоми мавҷуда ошкор карда шудаанд: зичии нокифояи шабакаи мушоҳидавӣ (як истгоҳи автоматии Агентӣ, панҷ пости идоракунии дастӣ ва як истгоҳи автоматии назди Сафорати ИМА), нигаронидашавии асосӣ ба модели арзёбии КХЧ, набудани блоки инкишофёфтаи пешгӯӣ ва фазои ягонаи шаҳрии иттилоотӣ-таҳлилӣ (расми 3)» [2-М].

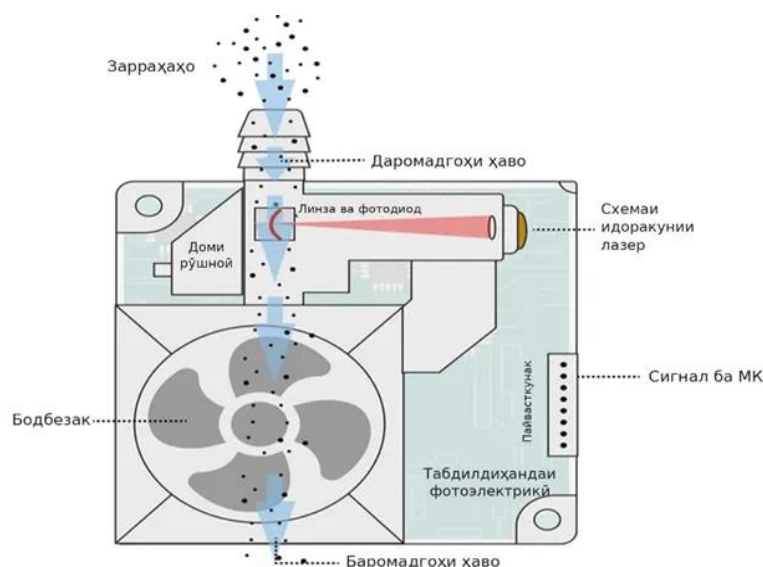


Расми 3. - Ҷойгиршавии истгоҳҳои мониторинг ва сарчашмаҳои статсионarii ифлосшавӣ дар Ҷумҳурии Тоҷикистон

Асоснок карда шудааст, ки «такмили низоми мониторинг гузаришро ба низоми маҷмӯии рақамӣ тақозо мекунад, ки фарогирии зичи фазоии қаламрави шаҳрӣ, ҳамгирии додаҳои мониторинги сайёр, статсионарӣ ва берунии рақамӣ, гузаришро аз ҳисоботдиҳии ба КҲҚ нигаронидашуда ба модели ба хатар нигаронидашуда, рушди блоки пешгӯӣ ва эҷоди муҳити ягонаи таҳлилиро барои идоракунии сенариявии сифати ҳаво таъмин мекунад» [2-М, 3-М, 6-М].

Боби дуюм «Таҳқиқоти таҷрибавӣ ва таҳлили омории ифлосшавии ҳавои атмосфераи шаҳри Душанбе бо зарраҳои майдадисперсии PM_{2.5}» ба «асоснокунии интиҳоби таҷҳизоти ченкунӣ, арзёбии мувофиқати метрологии датчикҳои оптикӣ, натиҷаҳои ченкуниҳои саҳроии консентратсияи PM_{2.5} дар шароити гуногуни табиӣ-қаламравӣ ва метеорологӣ ва таҳлили омории қатори бисёрсолаи вақтӣ» [4-М]. Боб аз чор параграф иборат буда, бо хулосаҳо анҷом меёбад.

2.1. Асоснокунии интиҳоби таҷҳизоти ченкунӣ барои мониторинги консентратсияи PM_{2.5}. «Ҳамчун воситаи мониторинг интиҳоби датчики оптикӣ зарраҳои саҳти SPS30 (Sensirion) асоснок карда шудааст, ки бо принципи парокандашавии лазерӣ дар дарозии мавҷи $\lambda \approx 660$ нм кор карда, чен кардани фраксияҳои PM_{1.0}, PM_{2.5}, PM₄ ва PM₁₀-ро дар доираи 0–1000 мкг/м³ бо фосилаи навсозии додаҳо 1 с, доираи қорӣи ҳарорат аз –10 то +60 °C ва мӯҳлати ҳисобии хизматрасонии зиёда аз 10 сол таъмин мекунад» [4-М]. Дар расми 3 нақшаи қорӣи датчики оптикӣ навъи SPS30 оварда шудааст.



Расми 3. - Датчики оптикӣи навъи SPS30 (нақшаи кор)

Ҳангоми буриши шуои лазер аз ҷониби зарраҳои аэрозол, ки дар ҳаво мавҷуданд, ҳар як зарра рӯшноии лазерро пароканда мекунад. Рӯшноии парокандашуда бо қабулкунандаи фотодиодӣ ба қайд гирифта шуда, аз рӯи шиддат ва шакли сигнал андоза ва миқдори зарраҳо муайян карда мешавад. Истифодаи ин принцип имконияти ба даст овардани ҷенкуниҳои оперативиро дар речаи вақти воқеӣ бо хассосияти баланд нисбат ба ифлоскуандаҳои майдадисперсӣ, аз ҷумла зарраҳои PM1.0, PM2.5, PM4 ва PM10 таъмин мекунад. Маҳдудияти физикии усулро D. H. Nagan ва J. H. Kroll қайд мекунанд, ки нишон доданд «арзёбии масса аз рӯи парокандашавии рӯшноӣ аз нишондиҳандаи шикаст ва зичии зарраҳо вобаста аст, ки пешакӣ номаълуманд» [23].

Нишон дода шудааст, ки «чунин сенсорҳои хурдҳаҷм истгоҳҳои давлатии мушоҳидаро иваз намекунанд, вале ҳалли аз ҷиҳати иқтисодӣ самаранок ҳангоми сохтани шабакаҳои тақсимшуда дар шароити маблағгузори маҳдуд ва зарурати ташкили шумораи зиёди нуктаҳои мушоҳида мебошанд» [4-М].

2.2. Арзёбии мувофиқати датчикҳои оптикӣи навъи SPS30 барои ҷен кардани PM2.5. Арзёбии такроршавандагии байнисенсорӣ аз рӯи гурӯҳи ҳашт датчики SPS30 коҳиши пайдарпаии зариби вариатсияро ҳангоми афзоиши фосилаи миёнагирӣ нишон дод: аз 27,8 % ҳангоми миёнагирии якдақиқагӣ то 17,7 % ҳангоми соатӣ ва 15,0 % ҳангоми шабонарӯзӣ. Муқоиса бо монитори эталонии Fidas 200S тасдиқ кард, ки эътимодноктарин натиҷаҳо ҳангоми миёнагирии соатии додаҳо ба даст меоянд (ҷадв. 1).

Ҷадвали 1. – Метрикаҳои дақиқии датчикҳои SPS30 ва PurpleAir нисбат ба монитори эталонии Fidas 200S

Датчик	R^2 , 15 дақ	RMSE, 15 дақ, мкг/м³	a, 15 дақ	R^2 , 1 соат	RMSE, 1 соат, мкг/м³	a, 1 соат
S1	0,51	6,05	0,65	0,85	2,94	0,85
S3	0,50	5,91	0,64	0,85	2,85	0,83
S6	0,48	9,73	0,99	0,77	5,20	1,15
Миёна аз рӯи ҳашт SPS30	0,54	6,74	0,78	0,86	3,38	0,99
PurpleAir	0,58	8,46	1,07	0,85	4,79	1,37

Арзёбии мутобиқат ба нишондиҳандаҳои ҳадафии Агентии ҳифзи муҳити зисти ИМА нишон дод, ки аз рӯи зариби вариатсия, параметрҳои ҷойивазкунӣ ва хатои меъёршуда датчик ба меъёрҳо ҳангоми ҳар ду фосилаи миёнагирӣ, аз рӯи ҳаттӣ будан ва RMSE – ҳангоми миёнагирии соатӣ мутобиқат мекунад, ҳол он ки инҳирофи стандартӣ аз ҳадди тавсияшуда зиёд аст. Илова бар ин муқаррар карда шудааст, ки «ба ҳисоб гирифтани

намнокии нисбӣ дар модели калибровка дақиқии ченкуниро баланд мебардорад (ҷадв. 2), ки хулосаи R. Jayaratne дар бораи баландшавии гигроскопии нишондиҳандаҳои датчикҳои оптикӣ тасдиқ мекунад» [24].

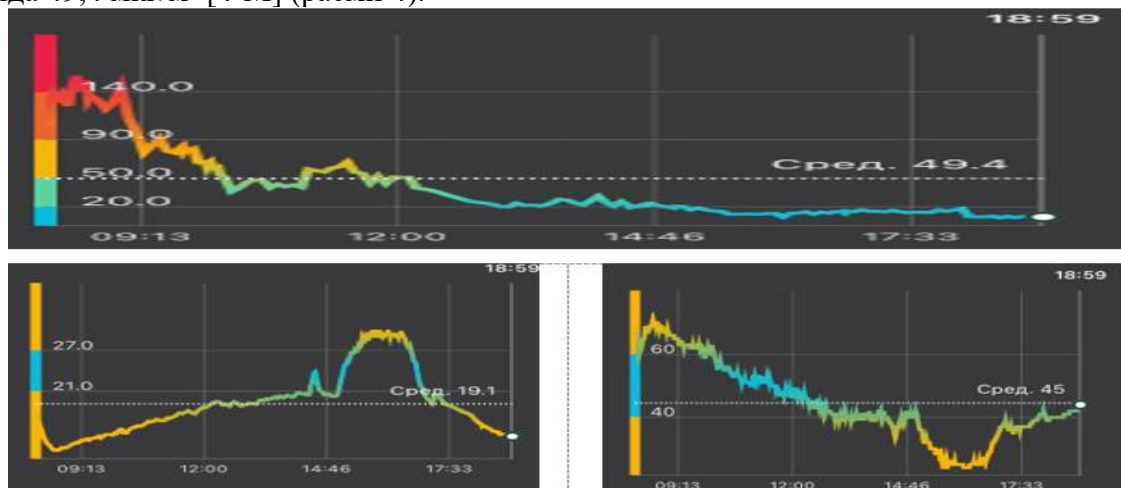
Ҷадвали 2. – Муодилаҳои калибровкӣ ва сифати модел (додаҳои миёнасоатӣ)

Навъи модел	Муодила	R ²	RMSE, мкг/м ³
Моделҳои ҳаттӣ	$S = a_1 \cdot PM_{2.5} + i$	0,86	3,38
Модел бо назардошти намнокии нисбӣ	$S = a_1 \cdot PM_{2.5} + a_2 \cdot RH + i$	0,88	3,05
Модел бо назардошти ҳарорат	$S = a_1 \cdot PM_{2.5} + a_2 \cdot T + i$	0,87	3,20

Ҳамин тавр, датчики SPS30 «ҳамчун воситаи ёридиҳандаи ченкуни ғангоми қоркарди дуруст, миёнагирии соатӣ, калибровкаи намнокӣ ва санҷиши даврӣ аз рӯи истгоҳҳои референсӣ» татбиқшаванда аст, ки бо ҷамъбасти M. R. Giordano мувофиқат мекунад [25].

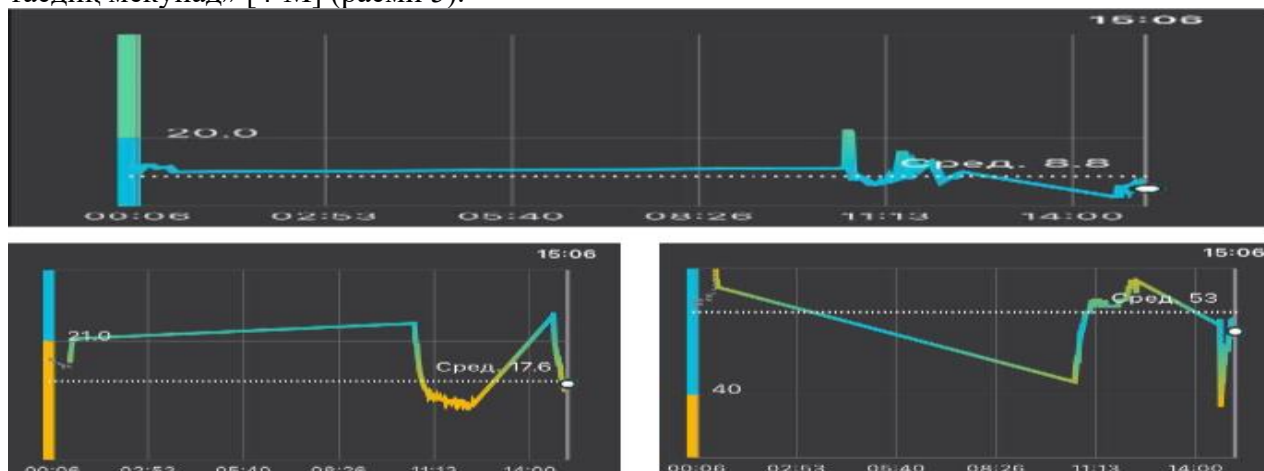
2.3. Ченкуниҳои саҳроии консентратсияи PM_{2.5} дар шароити гуногуни табиӣ-қаламравӣ ва метеорологӣ.

Аз рӯи натиҷаҳои таҷрибаҳои саҳроӣ «динамикаи возеҳи шабонарӯзии консентратсияи PM_{2.5} дар муҳити шаҳрӣ муқаррар карда шудааст: коҳиш аз 120–140 мкг/м³ дар соатҳои субҳ то 15–25 мкг/м³ дар нимаи дуюми рӯз ғангоми қимати миёнаи давраи мушоҳида 49,4 мкг/м³ [4-М] (расми 4).



Расми 4. - Натиҷаҳои ченкунии консентратсияи PM_{2.5}, мкг/м³

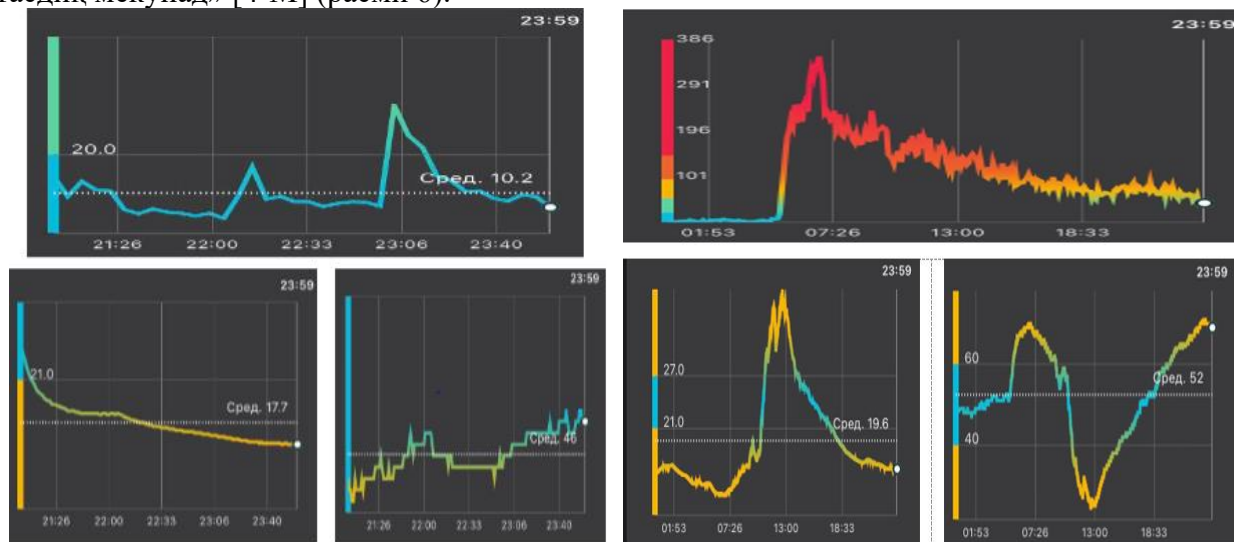
Дар ҳавзаи ҳавоии дарёи Варзоб сатҳи устувори пасти ифлосшавӣ – тақрибан 8,8 мкг/м³, наздик ба тавсияҳои СУТ [26] ба қайд гирифта шуд, ки «сарбории ками антропогенӣ ва самаранокии худтозашавии табиӣ атмосфераро дар шароити гардиши кӯҳӣ-водигӣ тасдиқ мекунад» [4-М] (расми 5).



Расми 5. - Натиҷаҳои мониторинги сифати ҳавои ҳавзаи ҳавоии дарёи Варзоб, мкг/м³

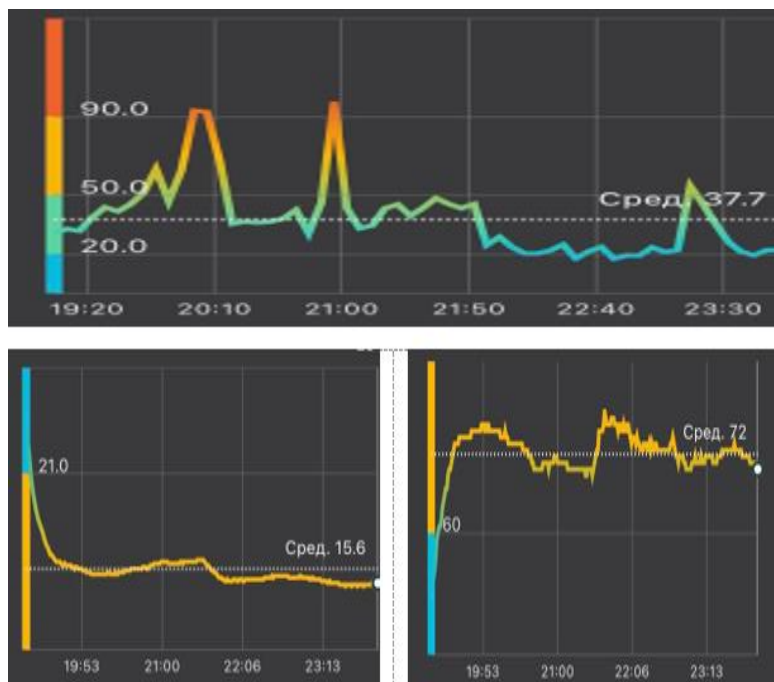
«Вобастагии ошкоршудаи консентратсия аз ҳарорат, намнокӣ ва шиддати омехташавии амудӣ бо муқаррароти J. Gong дар бораи нақши пешбари предикторҳои метеорологӣ [27] ва бо натиҷаҳои X. Zhang оид ба рафти шабонарӯзии консентратсия мувофиқат мекунад» [28].

«Таҷрибаҳо дар давраи ҳуҷуми ҷангӣ афзоиши сатҳи миёнаи ифлосшавиро зиёда аз ҳашт баробар – аз 10,2 то 85,4 мкг/м^3 ҳангоми қимматҳои қуллагии 300–350 мкг/м^3 нишон доданд, ки нақши бартаридоштаи интиқоли фаромарзӣ ва минтақавии аэрозолҳои ҷангиро тасдиқ мекунад» [4-М] (расми 6).



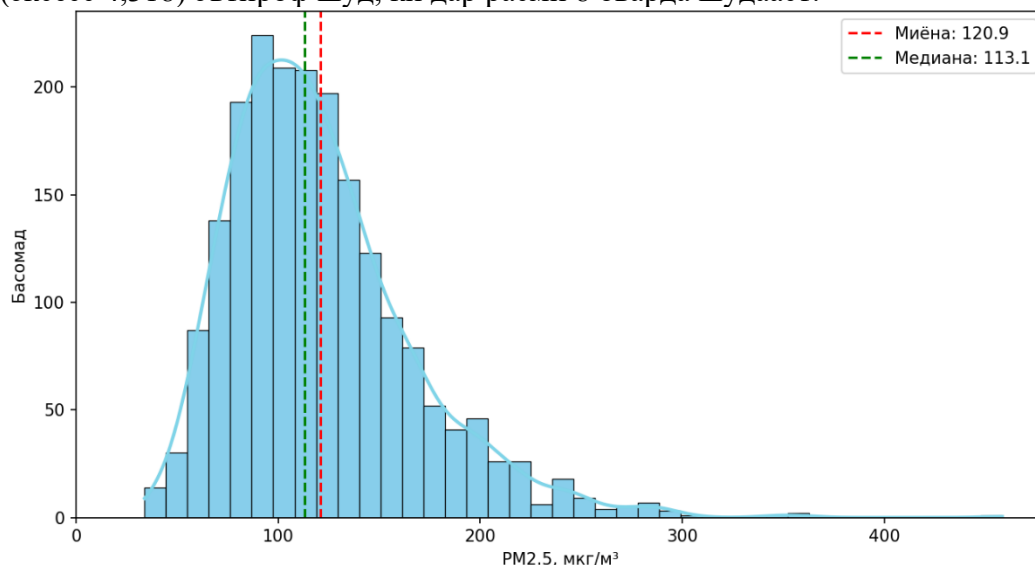
Расми 6. - Динамикаи консентратсияи $\text{PM}_{2.5}$ то ва баъд аз ҳуҷуми ҷангӣ, мкг/м^3

Мушоҳидаҳо дар шароити ҳавои соф нишон доданд, ки ҳатто ҳангоми набудани интиқоли ҷанг сард шудани бегоҳӣ ва сустшавии омехташавии амудӣ сатҳи миёнаи баланди ифлосшавиро (37,7 мкг/м^3) бо қулҳои кӯтоҳмуддат то 80–90 мкг/м^3 ташаққул медиҳанд, ки бо сарчашмаҳои маҳаллӣ, аз ҷумла партовҳои ғайриихроҷии нақлиёт алоқаманданд (расми 7).



Расми 7. - Динамикаи консентратсияи $\text{PM}_{2.5}$ дар шароити ҳавои соф (бегоҳӣ), мкг/м^3

2.4. Таҳлили оморӣ қатори бисёрсолаи вақтии консентратсияи PM2.5. Таҳлили оморӣ дар қатори вақтии консентратсияҳои миёнашабонарӯзии PM2.5 бо ҳаҷми 2269 мушоҳида барои давраи аз 25.06.2019 то 14.03.2026 иҷро карда шуд. Сатҳи устувори баланди ифлосшавӣ муқаррар карда шуд: қимати миёна 120,9 мкг/м³ ҳангоми медиана 113,0 мкг/м³, инҳирофи стандартӣ 48,3 мкг/м³ ва доманаи аз 7,0 то 474,0 мкг/м³. Тақсимот ғайринормалӣ ($p = 2,24 \cdot 10^{-144}$), рострафи асимметрий (зариби асимметрия 1,397) бо думҳои вазнин (эксесс 4,318) эътироф шуд, ки дар расми 8 оварда шудааст.



Расми 8. - Тақсимои PM2.5, мкг/м³

Бо усули доманаи байниквartilӣ, ки ба равиши J. W. Tukey [29] бармегардад, 61 партоб (2,69 % мушоҳидаҳо) ошкор карда шуд; аз рӯи меъёри 3σ 33 рӯзи фавқулодда (1,45 %) ҷудо карда шуд. Ифлостарин рӯз дар тамоми давраи мушоҳида 23 сентябри соли 2019 гардид, вақте ки консентратсияи PM2.5 ба 474 мкг/м³ расид. Инчунин ба шумори ифлостарин рӯзҳо 10 июни соли 2023 – 437 мкг/м³, 17 декабри соли 2024 – 385 мкг/м³ ва 1 ноябри соли 2025 – 361 мкг/м³ мансубанд (ҷадвали 3).

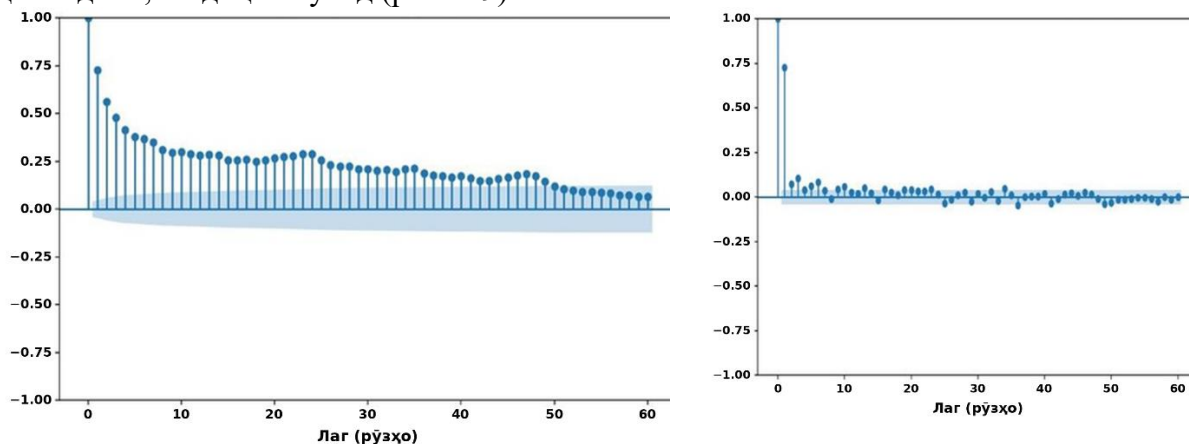
Ҷадвали 3. – Қимматҳои ҳадди аксар ба қайд гирифташудаи PM2.5, мкг/м³

№	Сана	PM2.5, мкг/м³
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

Софтарин рӯз 20 июли соли 2022 ба қайд гирифта шуд, вақте ки консентратсияи PM2.5 7 мкг/м³-ро ташкил дод. Қимматҳои паст инчунин дар августи соли 2025 мушоҳида шуданд, вақте ки якчанд рӯзи паёпай консентратсияҳо дар доираи 11–13 мкг/м³ қарор доштанд. Доманаи қимматҳо аз 7 то 474 мкг/м³ тағйирёбандагии фавқулодда баланди сифати ҳавои атмосфераро нишон медиҳад. Мавҷудияти чунин эпизодҳои муқобил тасдиқ мекунад, ки низоми мониторинг бояд на танҳо ба ҳисоби қимматҳои миёна, балки ба ошкоркунии саривақтии бадшавиҳои тези сифати ҳаво нигаронида шавад. Принципиҳои умумии сохтани чунин моделҳо аз ҷониби R. J. Hyndman ва G. Athanopoulos низомнок

карда шудаанд, ки қайд мекунад « интихоби модели пешгӯӣ бояд ба арзёбии ҳатогӣ дар интихоби баъдии вақт таъя кунад» [30].

Таҳлили сохтори автокоррелятсионӣ вобастагии қавии концентратсияҳои ҷориро аз қимматҳои пешин нишон дод: $ACF(1) = 0,727$, $ACF(2) = 0,562$, $ACF(7) = 0,351$, ки хусусияти инерсионии ифлосшавӣ ва мавҷудияти ҷузъи ҳафтаинаро, ки бо речаи ғайлонокии шаҳрӣ алоқаманд аст, тасдиқ мекунад (расми 9).



Расми 9. - Функсияи автокоррелятсионӣ ва функсияи хусусии автокоррелятсионӣ

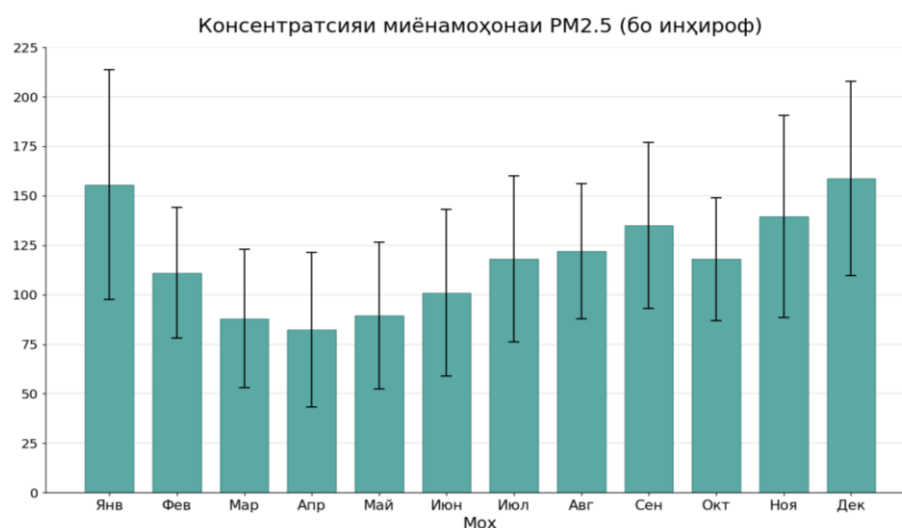
Қоҳиши тези функсияи хусусии автокоррелятсионӣ пас аз лаги якум ба сохтори авторегрессионии тартиби паст ишора мекунад. Санҷиши васеъшудаи Дики – Фуллер ($ADF = -4,997$; $p = 0,000023$) статсионарии қаторро тасдиқ кард, ки асоси методологиро барои сохтани моделҳои кӯтоҳмуддати пешгӯӣ дар уфуқи аз 1 то 7 шабонарӯз фароҳам меорад.

Декомпозицияи мавсимӣ-трендӣ қатор нишон дод, ки ҳиссаи бузургтарини дисперсияро ҷузъи мавсимӣ (ҷадв. 4) бо ҳадди аксар дар декабр ($158,7 \text{ мкг/м}^3$), январ ($155,6 \text{ мкг/м}^3$) ва ноябр ($139,5 \text{ мкг/м}^3$) ва ҳадди ақал дар апрел ($82,3 \text{ мкг/м}^3$), март ($87,7 \text{ мкг/м}^3$) ва май ($89,5 \text{ мкг/м}^3$) шарҳ медиҳад. Афзоиши думаротибаи мавсими ифлосшавӣ бо «афзоиши сарбории гармидиҳӣ, ташаккули инверсияҳои ҳароратӣ ва сустшавии омехташавии амудӣ дар давраи хунук» шарҳ дода мешавад» [31].

Ҷадвали 4. – Ҳиссаи дисперсияи шарҳодашудаи ҷузъҳои қатори вақтии PM2.5

Ҷузъи қатори вақтӣ	Ҳиссаи дисперсияи шарҳодашуда, %
Ҷузъи трендӣ	13,2
Ҷузъи мавсимӣ	37,3
Ҷузъи боқимонда	31,2

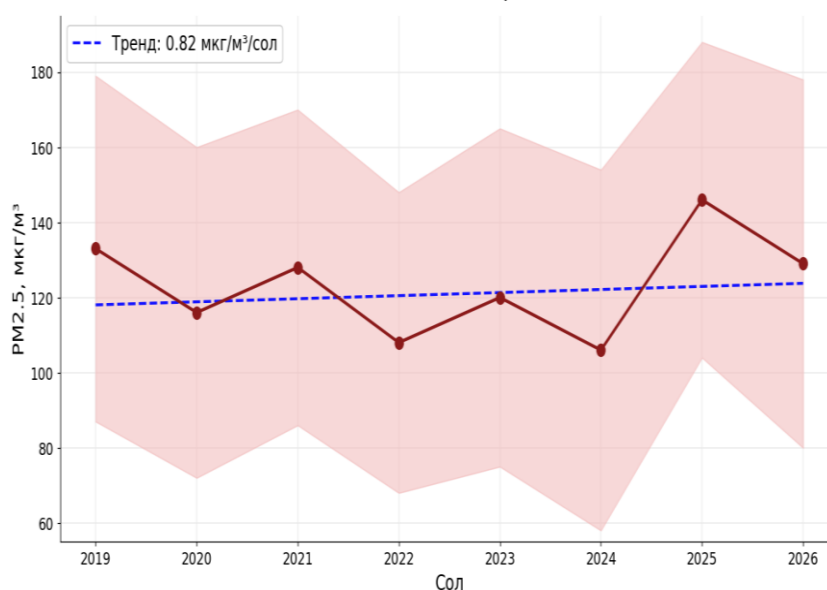
Тақсими қимматҳои миёнамоҳонаи PM2.5 дар расми 10 оварда шудаанд.



Расми 10. - Қимматҳои миёнамоҳонаи PM2.5, мкг/м^3

Концентрацияҳои ҳадди ақал дар апрел – 82,3 мкг/м³, март – 87,7 мкг/м³ ва май – 89,5 мкг/м³ мушоҳида шуданд. Ифлостарин моҳҳо декабр – 158,7 мкг/м³, январ – 155,6 мкг/м³ ва ноябр – 139,5 мкг/м³ гардиданд. Фарқият байни декабр ва апрел 76,4 мкг/м³-ро ташкил медиҳад, ки ба афзоиши думаротибаи мавсимии ифлосшавӣ ишора мекунад. Чунин манзара ба қаламравҳои шаҳрӣ хос аст, ки дар онҳо дар давраи хунук ҳиссаи гармидиҳӣ меафзояд, ҷамъшавии аэрозолҳо дар қабати наздизаминии атмосфера қавӣ мешавад, инверсияҳои ҳароратӣ бештар ташаккул меёбанд ва шиддати омехташавии амудии ҳаво коҳиш меёбад. Тибқи маълумоти J. Wallace ва P. Kanaroglou, «инверсияҳои ҳароратӣ баландии омехташавиро маҳдуд карда, ба ҷамъшавии ифлоскунандаҳо дар назди сатҳ оварда мерасонанд» [31]. Коҳиши баҳории концентрация бо қавишавии ғайбҳои бодӣ, афзоиши такроршавии боришот, беҳтаршавии омехташавии атмосферӣ ва камшавии сарбории гармидиҳӣ алоқаманд аст. Арзёбии тренди ҳаттӣ динамикаи сусти мусбати концентрацияро – тақрибан +0,82 мкг/м³ дар як сол ошкор кард, ки ба бадшавии сусти сифати ҳавои атмосфера ҳангоми нақши бартаридоштаи омилҳои мавсимӣ ва эпизодӣ ишора мекунад (расми 11).

PM2.5-и миёнасолона (бо парокандагии $\pm 1\sigma$)



Расми 11. - Тренди ҳаттӣ динамикаи концентрацияи PM2.5, мкг/м³

Натиҷаҳои бадастомада зарурати дохил кардани модулҳои таҳлили омӯрӣ, арзёбии мавсимӣ, ошкоркунии аномалияҳо ва пешгӯии концентрацияи моддаҳои ифлоскунандаро ба низоми тарҳрезиванда асоснок мекунад.

Боби сеюм «Таҳияи архитектура ва ҳалли лоиҳавии низоми автоматикунонидашудаи иттилоотии мониторинги сифати ҳавои атмосфера дар шароити шаҳри Душанбе» ба сохтани модели архитектураи низоми тақсимшудаи мониторинг, таҳияи таъминоти алгоритмӣ он, ташаккули моделҳои функционалӣ, объектӣ ва динамикӣ, инчунин прототипсозии интерфейси корбарӣ бахшида шудааст. Боб аз панҷ параграф иборат буда, бо хулосаҳо анҷом меёбад.

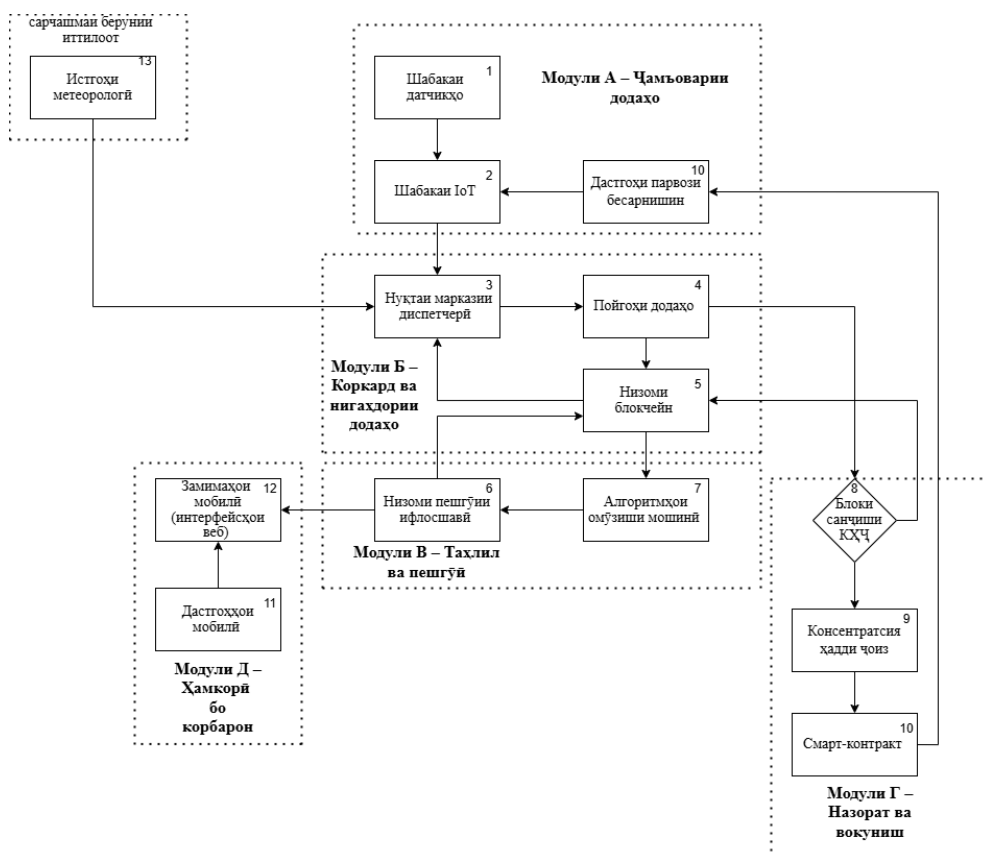
3.1. Модели архитектураи низоми тақсимшудаи мониторинги сифати ҳавои атмосфера. Архитектураи низоми «дар консепсияи низоми киберфизикӣ сохта шуда, давраи пурраи коркарди додаҳои экологиро – аз ҷамъоварии ҷангуниҳо то вокуниши автоматикунонидашуда ба ҳодисаҳои марбут ба зиёдравӣ аз нишондиҳандаҳои меъёрӣ амалӣ мекунад» [8-М].

Интиҳоби ҳалли меъморӣ ба муқаррароти L. Atzori таъяс мекунад, ки «Интернети ашӯ дастгоҳҳои гуногунҷинсро дар як шабакаи ягона ҷамъоварӣ ва интиқоли додаҳо муттаҳид мекунад» [32], ва ба талаботи ҳамгироии платформавии хидматҳои гуногунҷинси шаҳри хушманд, ки аз ҷониби A. Zanella таҳия шудаанд [33]. «Низоми тақсимшудаи таҳияшудаи иттилоотии мониторинги сифати ҳавои атмосфера аз рӯи принципи модуль ташкил шуда,

панҷ модули ба ҳам алоқамандро дар бар мегирад: модули ҷамъовариҳои додаҳо, модули коркард ва нигоҳдории додаҳо, модули таҳлил ва пешгӯӣ, модули назорат ва воқуниш, модули ҳамкорӣ бо корбарон».

Ҳар як модул бо ҷузъҳои муайяни сохторӣ пешниҳод шудааст. Ҳамин тавр, модули ҷамъовариҳои додаҳо (А) аз шабакаи датчикҳо (датчикҳои статсионарӣ, сайёр ва махсусгардонидашуда, ки дар Дастгоҳи парвози бесарнишин (ДПБ) насб шудаанд), ки бо шабакаи Интернетӣ ашъ (шабакаи IoT) муттаҳид шудаанд ва консентратсияи моддаҳои ифлоскунандаро (PM2.5, PM10, CO, NO₂, SO₂, O₃ ва диг.) ба қайд мегиранд, иборат аст; модули коркард ва нигоҳдории додаҳо (Б) нуқтаи марказии диспетчерӣ, ки додаҳоро аз модули А қабул мекунад, пойгоҳи додаҳо, ки дар он имконияти нигоҳдории дарозмуддати параметрҳои сифати ҳавои атмосфера мавҷуд аст, ва низоми блокчейнро, ки ба воситаи он нигоҳдории ғайримарказонидашудаи додаҳо бо ҳифз аз қалбакикунӣ ва сабти нишонаҳои вақтӣ таъмин мешавад, дар бар мегирад; модули таҳлил ва пешгӯӣ (В) аз низоми пешгӯӣ, ки дар алгоритмҳои омӯзиши мошинӣ кор мекунад, иборат аст; модули назорат ва воқуниш (Г) блоки санҷиши Консентратсияи ҳадди ҷоиз (КХҶ) ва смарт-контракто дорад, ки барои оғози фиристодани худкори ДПБ чиҳати таҳлили муфассали ноҳияи дорой КХҶ-и зиёдшудаи моддаҳои ифлоскунанда пешбинӣ шудааст; модули ҳамкорӣ бо корбарон (Д) бо замимаи веб, ки дар дастгоҳҳои сайёр ва компютерҳои шахсӣ кор мекунад, пешниҳод шудааст. Тавре ки J. Gubbi ва ҳаммуал. муайян мекунад, «Интернетӣ ашъ шабакаи дастгоҳҳои ба ҳам алоқаманд аст, ки якҷоя додаҳоро дар бораи муҳити зист ҷамъоварӣ ва коркард мекунад» [34]. Татбиқпазирии чунин ташкил ба муҳити шаҳрӣ аз ҷониби А. Zanella ва ҳаммуал. асоснок шудааст, ки қайд мекунад «архитекураи Интернетӣ ашъ барои шаҳри хушманд бояд дастгоҳҳо ва хидматҳои гуногунчинсро дар як платформаи ягона муттаҳид созад» [33].

«Барои лоиҳакашии архитектураи низоми мониторинги экологии сифати ҳавои атмосфера патенти хурди Ҷумҳурии Тоҷикистон барои ихтироъ ба даст оварда шудааст, ки дар расми 12 пешниҳод шудааст» [8-М].



Расми 12. - Архитекураи НТИМСҲА

«Низоми пешниҳодшудаи мониторинги экологии сифати ҳавои атмосфера ба таври зерин амал мекунад» [8-М].

Ҳамаи унсурҳо ба шабакаи Интернетӣ ашё (IoT) (2) пайваст шудаанд, ки интиқоли бесимии додаҳо ба нуқтаи марказии диспетчерӣ (НМД) (3) таъмин мекунад. Низом консентратсияи моддаҳои ифлоскунадоро (PM2.5, PM10, CO, NO₂, SO₂, O₃ ва диг.), инчунин параметрҳои физикӣ-химиявиро (ҳарорат, намнокӣ, фишор) ба қайд мегирад. Ғайр аз ин, модул додаҳо аз истгоҳи метеорологӣ (13) барои ба ҳисоб гирифтани шароити обу ҳаво ҳангоми моделсозии паҳншавии ифлосшавиҳо мегирад. Додаҳои бадастомада (чараёни додаҳои сенсорӣ ва метеорологӣ) аз модули А ба модули Б интиқол дода мешаванд.

Додаҳо дар бораи консентратсияи моддаҳои ифлоскунанда ба нуқтаи марказии диспетчерӣ (3) ворид мешаванд, ки дар он коркарди пешакии онҳо (расмиёти филтркунии садоҳо, нормализатсия ва агрегатсия) иҷро карда мешавад. Ниғаҳдории дарозмуддати параметрҳои сифати ҳавои атмосфера бо мавҷудияти пойгоҳи додаҳо (4) таъмин мешавад ва барои ниғаҳдории ғайримарказонидашудаи додаҳо бо ҳифз аз қалбакикунӣ ва сабти нишонаҳои вақтӣ низоми блокчейн истифода мешавад, ки бевосита бо НМД (3) ва пойгоҳи додаҳо (4) алоқаманд аст. Мувофиқи мақсад будани коркарди пешакии додаҳо дар наздикии сарчашма бо муқаррароти W. Shi тасдиқ мешавад, ки «ҳисоббарории канорӣ таъхир ва ҳаҷми додаҳои интиқолшавандаро ба воситаи коркард дар наздикии сарчашма коҳиш медиҳад» [35].

Ба модули В аз модули Б додаҳои коркардшуда ва тасдиқшуда барои таҳлил ва пешгӯии минбаъдаи сифати ҳавои атмосфера ва паҳншавии моддаҳои ифлоскунанда дар атмосфера ворид мешаванд. Низоми пешгӯӣ (6) пешгӯиҳои кӯтоҳмуддат ва дарозмуддати тағйири сифати ҳаворо иҷро карда, қонуниятҳо ва аномалияҳо ошкор мекунад, эҳтимолияти зиёдрӯӣ аз меъёрҳои ифлосшавиро ба воситаи истифодаи моделҳои математикӣ ва алгоритмҳои омӯзиши мошинӣ (7) муайян мекунад. Мутаносибан, натиҷаҳои таҳлил ва пешгӯӣ ба модули Г барои қабули қарорҳо ва воқуниши худкор интиқол дода мешаванд, ки дар он ба воситаи блоки санҷиши КХҚ (8) муқоисаи худкори додаҳои воқеӣ ва пешгӯишаванда бо меъёрӣ амалӣ мешавад.

Дар сурати ошкор шудани зиёдрӯӣ аз КХҚ-и моддаҳои ифлоскунанда смарт-контракт (9), ки дар низоми блокчейн амалӣ шудааст, сигналро барои фиристодани худкори ДПБ (10) бо мақсади омӯзиши муфассали ҳолати ноҳияи дорои КХҚ-и зиёдшуда оғоз мекунад, ки сохтани хатсайри парвози дронҳо дар асоси координатҳои минтақаи ифлосшавӣ, ки аз низоми пешгӯӣ (6) ба даст омадаанд, иҷро мекунад. Пас аз давр задани минтақаи ифлосшавӣ дронҳо додаҳои навро бармегардонанд, ки дубора ба модули А ворид шуда, давраи мониторинги мутобиқшавандаро мебаранд.

Бо истифодаи дастгоҳҳои сайёр ва компютерҳои шахсӣ (11) дастрасӣ ба интерфейси веб (замима) (12) амалӣ мешавад, ки имкон медиҳад додаҳо дар бораи сифати ҳавои атмосфера дар вақти воқеӣ ба категорияҳои гуногуни қорбарон (шаҳрвандон, олимон, мақомоти давлатӣ ва дигар ҷонибҳои манфиатдор) бо тақсимбандии имкониятҳои функционалӣ дода шаванд. Додаҳо аз модули Д метавонанд дубора ба модули Б (барои ҷамъоварии нишонаҳои қорбарӣ, алоқаи баръакс ё тасдиқи мушоҳидаҳо) фиристода шуда, омӯзиши низом ва баланд шудани дақиқии пешгӯиҳо таъмин намоянд.

Низоми пешгӯӣ, ки ба модули таҳлил ва пешгӯӣ дохил мешавад, бо имконияти истифодаи ансамбли алгоритмҳои омӯзиши мошинӣ, ки барои таҳлили тағйирёбандагии вақтӣ, фазой ва метеорологии ифлосшавии ҳавои атмосфера пешбинӣ шудаанд, иҷро карда шудааст. Ҳамчун аломатҳои вурӯдӣ консентратсияи моддаҳои ифлоскунандаи PM2.5, PM10, CO, NO₂, SO₂, O₃, координатҳои датчикҳо, аломатҳои вақтӣ, аз ҷумла соати шабонарӯз, рӯзи ҳафта ва мавсим, инчунин параметрҳои метеорологӣ: ҳарорат, намнокӣ, фишори атмосферӣ, суръат ва самти бод истифода мешаванд.

3.2. Таъминоти алгоритми низом: пешгӯӣ, муттаҳидсозии додаҳо, санҷиши блокчейнӣ ва воқуниши автоматикунонидашуда. Пешгӯии кӯтоҳмуддати

консентратсия бо ансамбли моделҳои Random Forest, Gradient Boosting/XGBoost ва шабакаи нейронии рекуррентии навъи LSTM бо зарбҳои вазнии мутобикшаванда амалӣ мешавад:

$$\hat{C}_{ens} = w_1 \hat{C}_{RF} + w_2 \hat{C}_{GB} + w_3 \hat{C}_{LSTM} \quad (1)$$

дар ин ҷо $\hat{C}_{RF}$, $\hat{C}_{GB}$, $\hat{C}_{LSTM}$ – пешгӯӣхое, ки мутаносибан бо моделҳои Random Forest, Gradient Boosting ва LSTM ба даст омадаанд; w_1 , w_2 , w_3 – зарбҳои вазнии моделҳо, ки аз рӯи натиҷаҳои арзёбии дақиқӣ дар интиҳоби назоратӣ муайян карда мешаванд.

Ошкоркунии вазъиятҳои аномалӣ бо роҳи муқоисаи ченкуниҳои ҷорӣ бо фосилаи бозътимоди пешгӯӣ иҷро мешавад: аномалия ҳангоми иҷрои шартӣ зерин ба қайд гирифта мешавад

$$A(t) = \{1, \text{агар } |C(t) - \hat{C}(t)| > \lambda\sigma, 0, \text{агар } |C(t) - \hat{C}(t)| \leq \lambda\sigma \quad (2)$$

дар ин ҷо $A(t)$ – индикатори аномалия;
 $C(t)$ – қимати воқеии ченшуда;
 $\hat{C}(t)$ – қимати пешгӯишаванда;
 σ – инҳирофи стандартӣ хатои пешгӯӣ;
 λ – зарби ҳассосияти низом.

Чунин сохтор имкон медиҳад, ки на танҳо зиёдравиҳои аллакай рухдодаи КҲҚ, балки эҳтимолияти пайдоиши онҳо дар фосилаи наздики вақтӣ низ пешгӯӣ карда шаванд.

Арзёбии интегралӣ консентратсияи моддаи ифлоскунанда дар нуқтаи муайяни қаламрав бо алгоритми муттаҳидсозии додаҳои сарчашмаҳои гуногунчинс муайян карда мешавад:

$$C_{fused}(x, y, t) = \frac{\sum_{k=1}^n q_k \cdot r_k \cdot C_k(x, y, t)}{\sum_{k=1}^n q_k \cdot r_k} \quad (3)$$

дар ин ҷо $C_{fused}(x, y, t)$ – арзёбии муттаҳидшудаи консентратсияи моддаи ифлоскунанда дар нуқта бо координатҳои x, y дар лаҳзаи вақт t ;
 $C_k(x, y, t)$ – қимате, ки аз сарчашмаи k -уми додаҳо ба даст омадааст;
 q_k – зарби сифати додаҳо, ки аз рӯи ҳолати датчик, басомади камбудихо ва сатҳи садо муайян мешавад;
 r_k – зарби муносибати фазой-вақтии сарчашма;
 n – миқдори сарчашмаҳои додаҳо.

$$r_k = \exp(-\alpha d_k - \beta \Delta t_k) \quad (4)$$

дар ин ҷо d_k – масофа аз сарчашмаи ченкунӣ то нуқтаи таҳлилшаванда;
 Δt_k – фосилаи вақтӣ байни лаҳзаи ченкунӣ ва лаҳзаи таҳлил;
 α , β – зарбҳои камшавии аҳамияти фазой ва вақтии додаҳо.

Истифодаи зарби сифати додаҳо ва зарби муносибати фазой-вақтӣ аломати фарқкунандаи муҳими ҳалли пешниҳодшуда буда, имкон медиҳад эътимоднокии арзёбии сифати ҳаво ҳангоми зичии ғайриряксони датчикҳо, таъхирҳои вақтии интиқоли додаҳо ва мавҷудияти партобҳои маҳаллӣ баланд бардошта шавад.

Татбиқи низоми блокчейн бо ниғаҳдории гибридии додаҳо асоснок карда шудааст: массивҳои ибтидоӣ дар пойгоҳи марказонидашудаи додаҳо нигоҳ дошта мешаванд, ва дар реестри тақсимшуда сабтҳои санҷишии онҳо, ки идентификатори датчик, нишонаи вақтӣ, координатҳои сарчашма, хэши бастаи ибтидоии додаҳо, қимати консентратсия, ҳолати санҷиш ва имзои рақамии гиреҳро дар бар мегиранд, сабт мешаванд.

$$BlockRecord = \{ID_s, T, Geo, H(data), C_i, Status, Sign\} \quad (5)$$

дар ин ҷо ID_s – идентификатори датчик ё дастгоҳи ченкунӣ;
 T – нишонаи вақтии ченкунӣ;
 Geo – координатҳои сарчашмаи додаҳо;

$H(data)$ – хэши бастаи ибтидоии додаҳо;

C_i – қимати консентратсияи моддаи ифлоскунанда ё нишондиҳандаи агрегатшуда;

$Status$ – ҳолати санчиши додаҳо;

$Sign$ – имзои рақамии гирех ё дастгоҳ.

Санчиши яклухтӣ бо ҳисоби тақрории хэш ва муқоисаи он бо қимати қаблан сабтшуда иҷро мешавад; ҳангоми номувофиқат сабт ҳамчун безътимод аломатгузори шуда, аз қабули худкори қарорҳо истисно карда мешавад.

$$H(data_{current}) = H(data_{blockchain}) \quad (6)$$

Чунин ҳалл ба муқаррароти S. Nakamoto таъя мекунад, ки «занҷири блокҳо бо алоқаҳои хэшӣ ҳифзи сабтҳоро аз тағйири ноаён таъмин мекунад» [36], ва ба хусусиятҳои ғайримарказонидашавӣ, тағйирнопазирӣ ва пайгирнокӣ, ки аз ҷониби Z. Zheng ва ҳаммуал. ҷудо карда шудаанд [37]. Смарт-контракт, ки воқуниши автоматикунонидашударо ба зиёдравии ДПБ амалӣ мекунад, ба консепсияи ҳамкориҳои бозътимоди дастгоҳҳои Интернети ашъ бидуни миёнарави марказӣ мутобикат мекунад; усули сохтани мутобикшавандаи хатсайри ДПБ аз рӯи нишондиҳандаи хатар пешниҳод шудааст.

Шарти фаъолсозии смарт-контрактро ба таври зерин пешниҳод кардан мумкин аст:

$$SC = \{1, \text{агар } C_{fused}(t) > PDK_i \text{ ё } P(C_i(t + \Delta t) > PDK_i) > \gamma \} \quad (7)$$

{0, агар шари зиёдравӣ иҷро шавад,

дар ин ҷо SC – ҳолати смарт-контракт;

$C_{fused}(t)$ – арзёбии муттаҳидшудаи консентратсияи моддаи ифлоскунанда;

PDK_i – консентратсияи ниҳии иҷозатдодашудаи моддаи i -уми ифлоскунанда;

$P(C_i(t + \Delta t) > PDK_i)$ – эҳтимолияти пешгӯишавандаи зиёдравӣ аз КХЧ дар фосилаи наздики вақтӣ;

γ – остонаи эҳтимолият, ки ҳангоми расидан ба он низом воқуниширо оғоз мекунад.

Мантиқи смарт-контракт марҳилаҳои зеринро дар бар мегирад:

1. гирифтани додаҳои тасдиқшуда аз пойгоҳи додаҳо ва низомии блокчейн;
2. санчиши консентратсияҳои воқеии моддаҳои ифлоскунанда барои зиёдравӣ аз КХЧ;
3. санчиши қимматҳои пешгӯишаванда ва эҳтимолияти зиёдравии оянда;
4. муайян кардани координатҳои минтақаи хатар;
5. ташаққули фармон барои фиристодани ДПБ;
6. сабти ҳодисаи фаъолсозӣ дар блокчейн;
7. гирифтани ҷенкуниҳои аниқшуда аз ДПБ;
8. сабти тақрории натиҷаҳо дар пойгоҳи додаҳо ва блокчейн;
9. бастании ҳодиса ё фаъолсозии тақрории мониторинг ҳангоми боқӣ мондани хатар.

Ҳамин тавр, оғози расмиёти воқуниш ҳам ҳангоми зиёдравии воқеӣ аз КХЧ ва ҳам ҳангоми расидани эҳтимолияти пешгӯишавандаи зиёдравӣ ба қимати муқарраршудаи остона амалӣ мешавад. Смарт-контракт на танҳо вазифаи сабти ҳодиса, балки вазифаи оғози худкори расмиёти воқуниширо бидуни иштироки оператор иҷро мекунад, ки вақти воқуниши низомро ба партобҳои маҳаллӣ ва ҳолатҳои садамавӣ коҳиш медиҳад.

Хатсайри ДПБ бо назардошти параметрҳои зерин сохта мешавад:

$$Route = F(Geo_{risk}, C_{fused}, Wind, Relief, Battery, NoFly) \quad (8)$$

дар ин ҷо Geo_{risk} – координатҳои минтақаи хатари экологӣ;

C_{fused} – арзёбии муттаҳидшудаи консентратсияи моддаи ифлоскунанда;

$Wind$ – самт ва суръати бод;

$Relief$ – хусусиятҳои релеф ва сохтмони шаҳрӣ;

Battery – заряди чории аккумулятори ДПБ;

NoFly – маҳдудиятҳо ба минтақаҳои парвоз.

Афзалияти азназаргузаронии қаламрав бо бузургии хатар муайян мешавад:

$$R(x, y) = a \cdot \frac{C_{fused}(x, y)}{PDK_i} + b \cdot P(C_i(t + \Delta t) > PDK_i) + c \cdot V_{wind} \quad (9)$$

дар ин ҷо $R(x, y)$ – нишондиҳандаи хатар барои қитъаи қаламрав;

$C_{fused}(x, y)$ – консентратсияи муттаҳидшудаи моддаи ифлоскунанда;

PDK_i – қимати меъёрӣ;

$P(C_i(t + \Delta t) > PDK_i)$ – эҳтимолияти зиёдравиҳои оянда;

V_{wind} – нишондиҳандаи таъсири самт ва суръати бод;

a, b, c – зарифҳои вазнӣ.

ДПБ на танҳо ба нуктаи зиёдравӣ, балки ба минтақаи хатари ҳадди аксар, ки дар он рушди ифлосшавӣ бо назардошти самти интиқоли массаҳои ҳавой имконпазир аст, фиристода мешавад. Ҳангоми гирифтани ченкуниҳои нав хатсайр метавонад дар речаи вақти воқеӣ ислоҳ шавад. Агар ДПБ афзоиши консентратсияи моддаи ифлоскунандаро аз рӯи самти бод ба қайд гирад, низом минтақаи парвозро васеъ мекунад; агар консентратсияҳо коҳиш ёбанд, хатсайр кӯтоҳ мешавад, ки вақти парвоз ва сарфи энергияро кам мекунад. Самараи техникии ин ҳалл дар коҳиши вақти маҳаллисозии сарчашмаи ифлосшавӣ, камшавии хароҷот барои давр задани мунтазами дастӣ ва баланд шудани дақиқии фазоии мониторинг бидуни зарурати насби шумораи зиёди постҳои статсионарӣ мебошад. Сохтани худкор ва ислоҳи хатсайр дар асоси нишондиҳандаи хатар аломатҳои муҳими ихтироъ буда, коҳиши вақти маҳаллисозии сарчашмаҳои ифлосшавӣ ва камшавии сарфи энергияро таъмин мекунад.

3.3. Модели функционалии низом: равандҳои корӣ, талабот ва вариантҳои истифода. Фаъолияти низом дар шакли чор раванди кории ба ҳам алоқаманд – мониторинг, арзёбии ҳолат, пешгӯӣ ва таъсири идоракунанда, ки давраи пӯшидаи идоракуниро ташкил медиҳанд, расмӣ карда шудааст. Тавре ки К. Вигерс ва Ҷ. Битти қайд мекунад, «сифати низоми барномавӣ асосан бо пуррагӣ ва номуноқиҳои талаботи он муайян мешавад» [38]. Ҳамин тавр, 20 талаботи функционалӣ ва 7 талаботи ғайрифункционалӣ ҷудо карда шуда, ҷадвали трассировка, ки талаботро бо модулҳо ва ҷузъҳои низом мепайвандад, сохта шудааст. Д

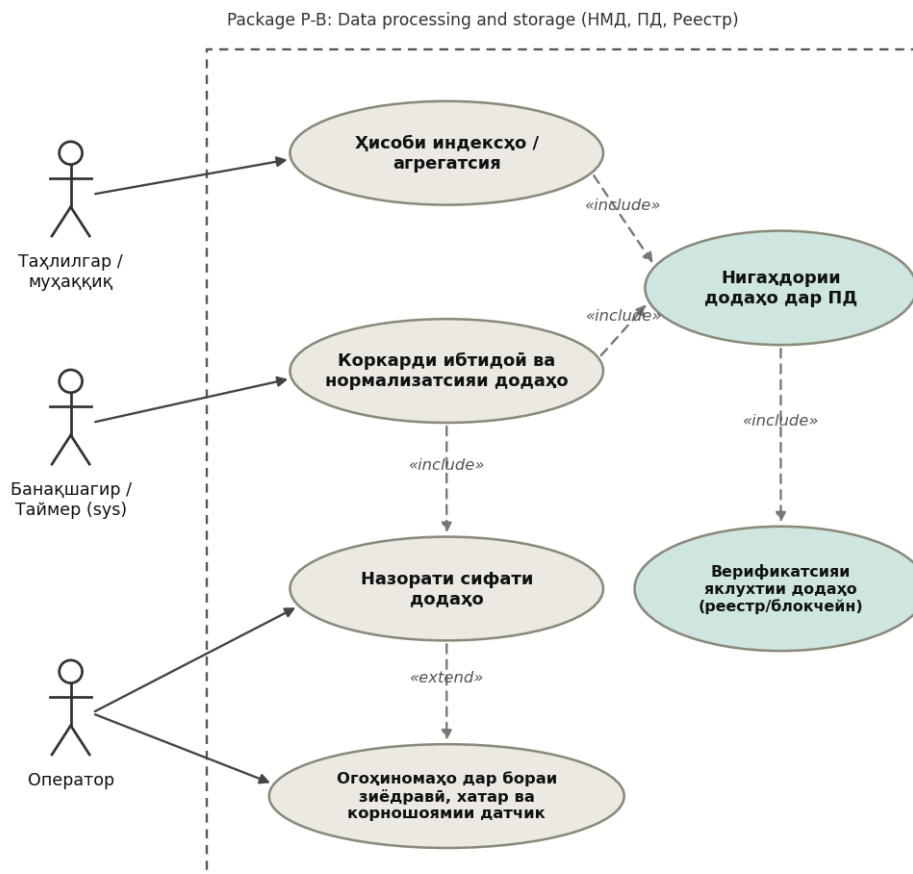
иаграммаҳои вариантҳои истифода, ки 9 актор ва 21 вариантҳои истифодаро дар бар мегиранд ва дар 5 бастаи функционалӣ муттаҳид шудаанд, сохта шудаанд. Сохтори функционалии зернизоми ҷамъоварии додаҳо дар расми 13 пешниҳод шудааст, ки дар он сценарийҳои калидии ҳамкориҳои низом бо сарчашмаҳои додаҳо инъикос ёфтаанд. Дар диаграммаи сохташуда ташкили мантиқии равандҳои қабул, коркард ва тайёрии ибтидоии иттилооти ченкунӣ намоиш дода мешавад.



Расми 13. - Диаграммаи вариантҳои истифодаи бастаи P-A: Data Acquisition (чамъоварии додаҳои ибтидоӣ)

Диаграммаи пешниҳодшудаи вариантҳои истифода (бастаи чамъоварии додаҳои ибтидоӣ) нақши шлюзи вурудиро (ingestion layer) барои тамоми низомии зехнӣ иҷро мекунад. Иҷрои вариантҳои истифода дар доираи ин баста якхелакунии форматҳои додаҳо, синхронизатсияи нишонаҳои вақтӣ, пайвасти фазоии ҷенкуниҳо ва тайёрии иттилоотро ба марҳилаҳои назорати сифат ва коркарди таҳлилӣ таъмин мекунад. Қарори ҷудо кардани зернизомии чамъоварии додаҳо ба бастаи алоҳида бо осонии ҳамгироии минбаъдаи навъҳои нави сенсорҳо (датчикҳо) ва таъмини мустақилияти технологияи сарчашмаҳои додаҳо аз модулҳои таҳлилии низом асоснок аст, яъне асоси расмӣ барои марҳилаҳои арзёбии ҳолат, пешгӯӣ ва қабули қарорҳои идоракунӣ эҷод мешавад, ки ба мантиқи модели илмӣ идоракунӣ мониторинги экологӣ мутобикат мекунад.

Додаҳои бадастомада дар зернизомии чамъоварии додаҳо ба зернизомии коркард ва нигоҳдории додаҳо мегузаранд. Вазифаи асосии ин зернизом табдили ҷараёнҳои гетерогении мушоҳидаҳо ба модели стандартикунонидашудаи иттилоотӣ, ки барои таҳлил ва пешгӯии минбаъда мувофиқ аст, мебошад. Бо ин мақсад дар доираи ин зернизом расмиёти нормализатсия, назорати сифат, санчиши дурустӣ ва агрегатсияи додаҳо амалӣ мешаванд. Баланд бардоштани сатҳи эътимод ба додаҳои бадастомада ва пайгирнокии тағйиротҳо ба воситаи истифодаи механизмҳои санчиши яклухтӣ ва сабти амалиётҳои калидӣ дар реестр имконпазир аст. Бо чунин равиш пайгирнокии тағйиротҳо таъмин мешавад. Сохтори функционалии зернизомии коркард ва нигоҳдории додаҳо дар расми 14 пешниҳод шудааст.

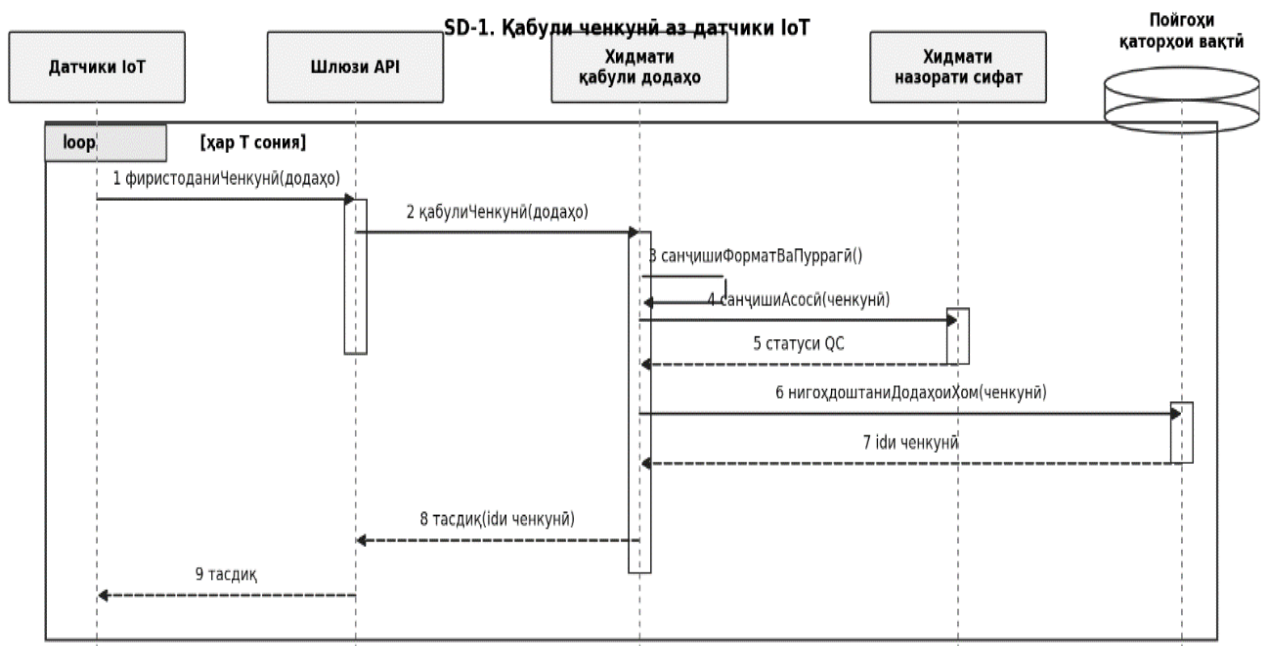


Расми 14. - Диаграммаи вариантҳои истифодаи бастан P-B: Data Processing & Storage (нигоҳдорӣ ва коркарди додаҳо)

3.4. Моделҳои объектӣ ва динамикии низом. Диаграммаи синфҳо, ки 31 синфро бо ядроии Measurement дар бар мегирад, ва ҳафт диаграммаи пайдарпай (SD-01...SD-08), ки модели расмии динамикии фаъолияти низомро ташкил медиҳанд ва давраи пурраро аз қабули ченкуниҳо то таъсири идоракунонда тавсиф мекунанд, таҳия шудаанд. Модели объектӣ мувофиқати сохтори додаҳои шабакаи сенсорӣ, блоки метеорологӣ, пойгоҳи додаҳо ва зернизоми таҳлилиро таъмин мекунад.

Барои таъмини ба ҳам алоқамандии синфҳои асосӣ алоқаҳои ассотсиатсия, композитсия ва агрегатсия истифода шуда, барои ҳар як алоқа каратҳои алоқаи навъи [1.1: 0..*, 1 : 0..*] муайян карда шудаанд. Интихоби алоқаҳои навъи ассотсиатсия, агрегатсия, композитсия ва каратҳои онҳо бо семантикаи соҳаи предметӣ ва талабот ба яклухтии додаҳо, миқдоспазирӣ ва васеъшавии низом асоснок аст.

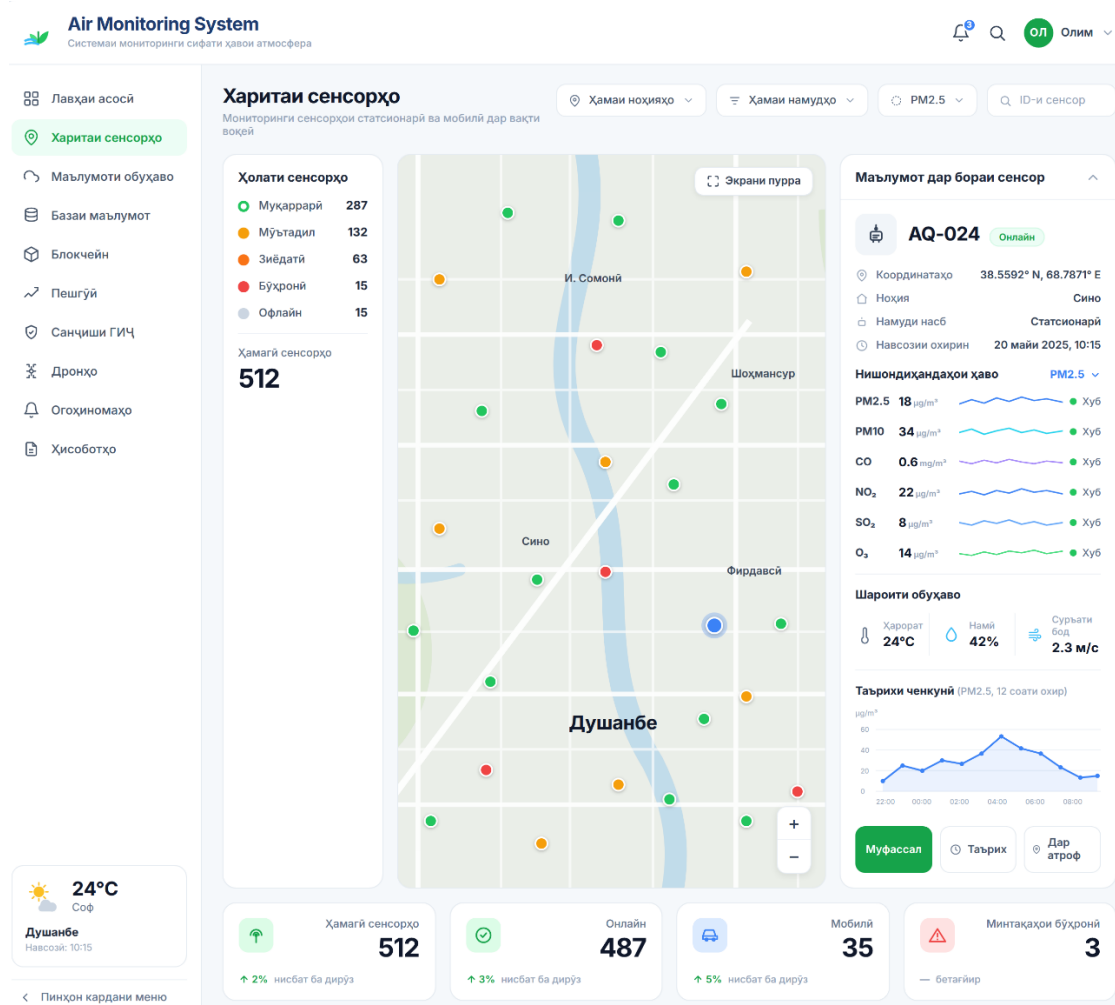
Дар диаграммаи SD-01 (расми 15) равандҳои ташаккул, тасдиқ ва нигоҳдории ченкуниҳо, ки аз датчикҳои IoT ворид мешаванд, инъикос ёфтаанд, яъне дар диаграмма контури ибтидоии воридшавии додаҳо ба низоми мониторинги экологӣ нишон дода шудааст. Диаграммаи таҳияшуда диаграммаи муҳим аст, зеро он нуқтаи вуруди тамоми мушоҳидаҳоро дар доираи низом тавсиф мекунад. Ташаббускор датчики IoT (сайёр/статсионарӣ) баромад мекунад, ки бастан ченкуниҳоро ба воситаи шлюзи API мефиристад. Шартҳои пешакӣ бақайдгирии дастгоҳ, дастрасии канали алоқа ва формати мувофиқашудаи бори муфид мебошанд. Чараҳои асосӣ интиқоли ченкунӣ, валидатсияи техникии сохтори додаҳо, санҷиши ихтиёрии асосии сифат ва нигоҳдории ченкуниҳои хом бо баргардонидани тасдиқ (АСК) ба датчикро дар бар мегирад. Хусусияти давравии мониторинг бо конструксияи loop инъикос ёфтааст, ки ба даврияти мунтазами ченкуниҳо мутобиқат мекунад.



Расми 15. - SD-01. Интиқоли ченкуниҳои консентратсияи моддаҳои ифлоскунанда аз датчики IoT

Диаграммаи дар боло овардашуда тақсими масъулиятро таъкид мекунад. Ҳамин тавр, шлюзи API ҳамчун фасади ҳамкориҳои берунӣ баромад мекунад, хидмати қабули додаҳо оркестровкаи валидатсия ва маршрутизатсияро амалӣ мекунад, ва пойгоҳи қаторҳои вақтӣ нигоҳдории дарозмуддати мушоҳидаҳои ибтидоиро таъмин мекунад. Нигоҳдории маҳз додаҳои хом (raw data) пайгирнокӣ ва такроршавандагии натиҷаҳои таҳқиқотиро таъмин мекунад, ки имкон медиҳад қоидаҳои навшудаи назорати сифат такроран бидуни гум кардани иттилооти ибтидоӣ татбиқ шаванд. Худфарёд дар хидмати қабул ҷудошавии валидатсияи техникиро аз назорати таҳлилии QC сабт мекунад.

3.5. Прототипсозии интерфейси корбарӣ ва самарани интизории ҷорӣ намудани низом дар шароити шаҳри Душанбе. Маҷмӯи 13 прототипи интерактивии интерфейси корбарӣ – панели мониторинг, харитаи датчикҳо, ядрои иттилоотии низом, модули санчиши блокчейнӣ, модули пешгӯӣ, экранҳои санчиши КХҚ, модули смарт-контракт, модули идоракунии ДПБ, модули огоҳиномаҳо, модули ҳисоботдиҳӣ, кабинети шахсӣ ва ғайра таҳия шудааст, ки платформаи ягонаи рақамиро ташкил медиҳанд ва татбиқпазирии меъмории пешниҳодшударо тасдиқ мекунанд. Дар расми 16 яке аз прототипҳои таҳияшуда пешниҳод шудааст, ки дар он тасвири фазои шабакаи мониторинг намоиш дода мешавад.



Расми 16. - Харитаи датчикҳо

Таъиноти асосии он дар тасвиркунии ҷойгиршавии дастгоҳҳои статсионарӣ ва сайёри ченкунӣ, инчунин дар инъикоси ҳолати ҷорӣ, сатҳи ифлосшавӣ ва ҳолати техникий онҳо мебошад. Дар ин экран имконияти азназаргузаронии датчикҳо аз рӯи ноҳияҳои шаҳр, филтркунӣ аз рӯи навъи дастгоҳ ва ифлоскунандаи назоратшаванда амалӣ шудааст. Ишораи рангӣ имкон медиҳад, ки ҳолатҳои муқаррарӣ, мӯътадил, зиёдшуда, бӯҳронӣ ва офлайни датчикҳо зуд фарқ карда шаванд. Панели иттилоотии рост маълумоти муфассал дар бораи датчики интиҳобшударо дар бар мегирад, ки дар он координатҳо, ноҳияи насб, навъи дастгоҳ, вақти навсозии охирин, консентратсияи моддаҳои ифлоскунанда, шароити метео ва таърихи ченкуниҳо нишон дода шудаанд, ки тафсири фазоии додаҳои мониторингро таъмин мекунад ва имкон медиҳад минтақаҳои хатари баланди экологӣ ошкор карда шаванд. Принципиҳои чунин пешниҳод аз ҷониби E. R. Tufte таҳия шудаанд, ки тибқи он «графика бояд додаҳоро нишон диҳад ва ҳиссаи унсурҳои беиттилоотӣ тасвирро ба ҳадди ақал расонад» [39].

«Моделҳои яклухтии лоиҳавии низоми автоматикунонидашудаи иттилоотии мониторинги экологӣ асоснок карда шудааст, ки гузаришро аз мониторинги тавсифӣ (реактивӣ) ба идоракунии проактивӣ вазъи экологӣ дар шароити шаҳри Душанбе таъмин мекунад». Самараи интизории ҷорӣ намудани низом «дар баланд шудани оперативнокии ошкоркунии зиёдрӯӣ аз консентратсияҳои иҷозатдодашуда, афзоиши тафсилоти фазоии мушоҳидаҳо, таъмини яклухтии исботшавандаи додаҳои экологӣ ва ташаккули асоси иттилоотӣ барои қабули қарорҳои ҳифзи табиат ифода меёбад» [3-М, 7-М, 8-М].

ХУЛОСА

1. Муқаррар карда шудааст, ки тақмили мониторинги экологии сифати ҳавои атмосфера дар шаҳри Душанбе гузаришро ба низоми маҷмӯи рақамӣ, ки ҷамъоварӣ, коркард, таҳлил ва пешгӯии бефосилаи додаҳои экологиро таъмин мекунад, тақозо менамояд; шабакаи мавҷудай мушоҳидавӣ тафсилоти зарурии фазой-вақтиро таъмин намекунад ва блоки инкишофёфтаи пешгӯиро дар бар намегирад [1-М, 2-М].

2. Нишон дода шудааст, ки равишҳои мавҷуда ба ҷен кардани моддаҳои ифлоскундаи ҳавои атмосфера бартарихо ва маҳдудиятҳои гуногун доранд, бинобар ин самараноктарин ҳамгироии онҳо дар як низоми ягонаи иттилоотӣ-таҳлилий мебошад, ки сарчашмаҳои статсионарӣ, сайёр, сенсорӣ ва аз масофавро муттаҳид мекунад [2-М].

3. Ошкор карда шудааст, ки сифати ҳавои атмосфера дар шароити шаҳри Душанбе таҳти таъсири маҷмӯи омилҳои антропогенӣ ва табиӣ-иқлимӣ ташаккул меёбад; ба таври таҷрибавӣ динамикаи шабонарӯзии консентратсияи PM_{2.5} (миёна 49,4 мкг/м³ дар муҳити шаҳрӣ дар муқобили 8,8 мкг/м³ дар ҳавзаи ҳавоии дарёи Варзоб) ва афзоиши зиёда аз ҳаштбаробари сатҳи миёнаи ифлосшавӣ дар давраи ҳуҷуми ҷангӣ – аз 10,2 то 85,4 мкг/м³ муқаррар карда шудаанд [4-М, 5-М, 6-М].

4. Татбиқпазирии датчикҳои оптикӣ навъи SPS30 дар низомҳои мониторинги сифати ҳавои атмосфера асоснок карда шудааст: натиҷаҳои бозъитимод ҳангоми миёнагирии соатии додаҳо ба даст меоянд ($R^2 = 0,86$; RMSE = 3,38 мкг/м³), ва ба ҳисоб гирифтани намоиши нисбӣ дар модели калибровкӣ дақиқиро иловатан баланд мебардорад ($R^2 = 0,88$; RMSE = 3,05 мкг/м³); ҳамзамон датчик танҳо ҳамчун воситаи ёридиҳандаи ҷенкунӣ ҳангоми санҷиши даврӣ аз рӯи истгоҳҳои референсӣ татбиқшаванда аст.

5. Бо таҳлили омории қатори бисёрсолаи вақтӣ аз 2269 мушоҳида сатҳи устувори баланди ифлосшавӣ (миёна 120,9 мкг/м³ ҳангоми медиана 113,0 мкг/м³), ғайринормалӣ ва рострафи асимметрии тақсимот, нақши бартаридоштаи ҷузъи мавсимӣ (37,3 % дисперсия) бо ҳадди аксар дар ноябр – январ, хусусияти инерсионии ифлосшавӣ (ACF(1) = 0,727) ва статсионарии қатор муқаррар карда шудаанд, ки асоси методологиро барои пешгӯии кӯтоҳмуддат дар уфуқи 1–7 шабонарӯз фароҳам меорад.

6. Зарурати татбиқи технологияҳои Индустрияи 4.0 барои баланд бардоштани самаранокии мониторинги экологӣ, аз ҷумла Интернетӣ ашё, шабакаҳои сенсорӣ, коркарди зеҳнии додаҳо, таҳлили геоиттилоотӣ, санҷиши блокчейнӣ ва ташаккули автоматикунонидашудаи огоҳиномаҳо асоснок карда шудааст [3-М, 5-М].

7. Меъмории низоми автоматикунонидашудаи иттилоотии мониторинги сифати ҳавои атмосфера таҳия шудааст, ки алоқаро байни дастгоҳҳои ҷенкунӣ, пойгоҳи додаҳо, модули таҳлилий, зернизоми пешгӯӣ, модули назорати КХҚ, низоми огоҳиномаҳо ва интерфейси қорбарӣ таъмин мекунад; барои меъморӣ патенти хурди Ҷумҳурии Тоҷикистон барои ихтироъ ба даст оварда шудааст [3-М, 7-М, 8-М].

8. Алгоритми муттаҳидсозии додаҳои сарчашмаҳои гуногунҷинс бо назардошти зарифҳои сифат ва муносибати фазой-вақтӣ, инчунин мантиқи воқуниши автоматикунонидашуда ба зиёдравӣ аз КХҚ пешниҳод шудаанд, ки имкон медиҳад оперативнокии ошкоркунии вазъиятҳои хатарнок баланд бардошта шуда, яклухтии исботшавандаи ҷенкуниҳои экологӣ таъмин гардад [8-М].

ТАВСИЯҲО ОИД БА ИСТИФОДАИ АМАЛИИ НАТИҶАҲО

Меъмории пешниҳодшудаи низоми тақсимшудаи иттилоотии мониторинги сифати ҳавои атмосфера ва маҷмӯи ҳуҷҷатҳои лоиҳавӣ – талабот, ҷадвали трассировкӣ, диаграммаҳои синфҳо ва пайдарпай, прототипҳои интерфейси қорбариро ҳангоми татбиқи барномавии низоми автоматикунонидашудаи шаҳрии мониторинги экологии шаҳри Душанбе ва дигар шаҳрҳо бо шароити монанди табиӣ-иқлимӣ ва инфрасохторӣ истифода бурдан тавсия дода мешавад.

Ба Кумитаи ҳифзи муҳити зисти назди Ҳукумати Ҷумҳурии Тоҷикистон ва Агентии гидрометеорология тавсия дода мешавад, ки шабакаи мушоҳидавиро дар асоси ҳамгироии

постҳои статсионарӣ бо шабакаҳои тақсимшудаи датчикҳои оптикӣ ва камхарҷ ҳангоми миейнагирии ҳатмӣ соати додаҳо, калибровкаи намнокӣ ва санҷиши даврӣ аз рӯи истгоҳҳои референсӣ рушд диҳанд, ки имкон медиҳад тафсилоти фазоии мушоҳидаҳои ҳангоми хароҷоти маҳдуд ба таври назаррас баланд бардошта шавад.

Ҳангоми тафсири додаҳои мониторинг ва банақшагирии чорабиниҳои ҳифзи табиат тавсия дода мешавад, ки қонуниятҳои муқарраршудаи динамикаи мавсимии PM_{2.5} бо ҳадди аксар дар ноябр – январ, хусусияти инерсионӣ ифлосшавӣ ва нақши муайянкунандаи ҳуҷумҳои ҷангӣ ба ҳисоб гирифта шаванд, ва блоки пешгӯии низом дар моделҳои қаторҳои вақтӣ ва омӯзиши мошинӣ бо аломатҳои лағӣ ва метеорологӣ сохта шавад.

Методикаи гузаронидани ҷенкуниҳои таҷрибавӣ ва консентратсияи PM_{2.5} ва тартиби коркарди оморӣ қаторҳои бисёрсолаи мушоҳидаҳоро дар раванди таълими муассисаҳои таҳсилоти олӣ ҳангоми таълими фанҳои «Экология» ва «Бехатарии фаъолияти ҳаётӣ», инчунин ҳангоми иҷрои қорҳои илмӣ-таҳқиқотӣ дар соҳаи мониторинги экологӣ истифода бурдан тавсия дода мешавад.

Дурнамои таҳқиқоти минбаъда бо васеъшавии шабакаи мушоҳидаҳои сенсорӣ, ҷамъоварии массивҳои додаҳои таҷрибавӣ, баланд бардоштани дақиқии моделҳои пешгӯӣ, ҳамгироии иттилооти моҳвораӣ, рушди тасвиркунии ГИС, тақмили алгоритмҳои арзёбии хатарҳои экологӣ ва апробатсияи амалии низоми таҳияшуда дар шароити воқеии шаҳри Душанбе алоқаманд аст.

РҶҲАТИ АДАБИЁТ

1. Израэль, Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды / Ю. А. Израэль. – 2-е изд. – М. : Гидрометеиздат, 1984. – 560 с.
2. Герасимов, И. П. Научные основы современного мониторинга окружающей среды / И. П. Герасимов // - Известия АН СССР. Серия географическая. – 1975. – № 3. – С. 13–25.
3. Соколов, В. Е. Биосферные заповедники – эталоны природы / В. Е. Соколов, Ю. А. Израэль // Природа. – 1981. – № 1. – С. 74–90.
4. Теличенко, В. И. Основы биосферной совместимости зданий, сооружений и городских территорий / В. И. Теличенко // Вестник МГСУ. – 2011. – № 3, т. 1. – С. 8–14.
5. Ильичёв, В. А. Биосферная совместимость: технологии внедрения инноваций. Города, развивающие человека / В. А. Ильичёв. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. – 240 с.
6. 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.
7. Медоуз, Д. Пределы роста. 30 лет спустя / Д. Медоуз, Й. Рандерс, Д. Медоуз ; пер. с англ. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 358 с.
8. Форрестер, Дж. Мировая динамика / Дж. Форрестер ; пер. с англ. – М. : АСТ ; СПб. : Terra Fantastica, 2003. – 379 с.
9. Стольберг, В. Ф. Экология города : учебник / В. Ф. Стольберг. – Киев : Либра, 2000. – 464 с.
10. Чистякова, С. Б. Охрана окружающей среды : учебник для вузов / С. Б. Чистякова. – М. : Стройиздат, 1988. – 272 с.
11. Садовникова, Н. П. Экологическая безопасность города: поддержка принятия решений : монография / Н. П. Садовникова, Д. С. Парыгин. – Волгоград : ВолгГТУ, 2013. – 116 с.
12. Моисеев, Н. Н. Математические задачи системного анализа / Н. Н. Моисеев. – М.: Наука, 1981. – 488 с.
13. Аверин, Г. В. Системодинамика : монография / Г. В. Аверин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Донецк : Фолиант, 2022. – 405 с.
14. Берлянд, М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Л. : Гидрометеиздат, 1985. – 272 с.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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. Серия: Науки о Земле и окружающей среде. Энергетика и электротехника. Химические технологии, науки о материалах, металлургия. – 2025. – № 1(5). – С. 56–64. – EDN FMFIQS.

19. 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.

20. 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.

21. 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).

22. 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).

23. 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.

24. 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.

25. 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.

26. 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).

27. 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.

28. 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.

29. Tukey, J. W. *Exploratory data analysis* / J. W. Tukey. – Reading, MA : Addison-Wesley, 1977. – 688 p. – ISBN 978-0-201-07616-5.

30. 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.

31. 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

32. 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.
33. 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.
34. 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.
35. 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.
36. 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).
37. 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.
38. 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.
39. 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.

РҶҶҲАТИ ИНТИШОРОТИ АСОСӢ АЗ РҶӢ МАВЗӢИ ДИССЕРТАТСИЯ

Мақолаҳои дар нашрияхои тавсияшудаи КОА назди Президенти Ҷумҳурии

Тоҷикистон

- [1-М]. **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-М]. **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-М]. **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-М]. **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.

Мақолаҳо дар маводи конференсияҳо ва дигар маҷаллаҳо

- [5-М]. **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-М]. **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-М]. **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.

**Патентҳо, шаҳодатномаҳои муаллифӣ ва бақайдгирии давлатии захираҳои
иттилоотӣ**

[8-М]. **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.

АННОТАЦИЯ

диссертации **Хакдодова Акбарджона Махмадшарифовича** на тему **«Совершенствование системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха в условиях города Душанбе»** на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности **2.9.6. Экология**

Ключевые слова: Экологический мониторинг, качество атмосферного воздуха, взвешенные частицы PM_{2.5}, автоматизированная информационная система, низкобюджетные оптические датчики, прогнозирование загрязнения воздуха, технологии Индустрии 4.0, блокчейн-верификация, город Душанбе.

Цель диссертационной работы - Научное обоснование совершенствования системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха на основе проектирования автоматизированной информационно-аналитической системы в условиях города Душанбе.

Полученные результаты и их новизна: Уточнена структура системы экологического мониторинга атмосферного воздуха как многоуровневого цифрового процесса (сбор, верификация, хранение, анализ, прогнозирование, контроль превышений). Обоснована необходимость интеграции стационарных, мобильных и специализированных источников данных в единую автоматизированную систему. Экспериментально обоснована применимость низкобюджетных оптических датчиков типа SPS30 для измерения PM_{2.5} в городской среде: получена калибровочная модель с учётом относительной влажности ($R^2 = 0,88$; RMSE = 3,05 мкг/м³ при среднечасовом усреднении). Анализом временного ряда из 2269 наблюдений установлены стабильно высокий уровень загрязнения (среднее 120,9 мкг/м³), доминирующая сезонная компонента (37,3 % дисперсии) с максимумами в ноябре–январе, инерционный характер загрязнения, а также суточная динамика PM_{2.5} (49,4 мкг/м³ в городе против 8,8 мкг/м³ в фоновой зоне) и более чем восьмикратный рост при пылевых вторжениях. Разработана архитектура автоматизированной информационной системы мониторинга (РИСМКАВ) с модулями сенсорного сбора данных, метеоинформации, базы данных, блокчейн-верификации, прогнозирования, контроля ПДК, смарт-контрактов, уведомлений и отчётности; получен малый патент Республики Таджикистан. Предложены алгоритм слияния разнородных данных с учётом коэффициентов качества и пространственно-временной релевантности и логика автоматизированного реагирования на превышение ПДК.

Рекомендации по использованию: Разработанную архитектуру РИСМКАВ и комплект проектной документации (требования, диаграммы классов и последовательности, прототипы интерфейсов) рекомендуется использовать при программной реализации городской автоматизированной системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха. Комитету охраны окружающей среды при Правительстве Республики Таджикистан и Агентству по гидрометеорологии рекомендуется развивать наблюдательную сеть путём интеграции стационарных постов с распределёнными сетями низкобюджетных оптических датчиков при обязательном среднечасовом усреднении данных и влажностной калибровке. При планировании природоохранных мероприятий рекомендуется учитывать установленные закономерности сезонной динамики PM_{2.5} и инерционный характер загрязнения, а прогностический блок-системы строить на моделях временных рядов и машинного обучения.

Область применения: Результаты диссертации могут применяться органами государственного экологического управления и гидрометеорологической службы Республики Таджикистан, проектными и научно-исследовательскими организациями при создании автоматизированных систем экологического мониторинга, городскими экологическими службами других городов со сходными природно-климатическими и инфраструктурными условиями, а также в учебном процессе высших учебных заведений при преподавании дисциплин «Экология» и «Безопасность жизнедеятельности».

АННОТАТСИЯИ

диссертатсияи Ҳақдодов Акбарҷон Маҳмадшарифович дар мавзӯи «Такмили низоми мониторинги экологии сифати ҳавои атмосфера дар шароити шаҳри Душанбе», барои дарёфти дараҷаи илмӣ номзади илмҳои техникӣ аз рӯйи ихтисоси 2.9.6. Экология.

Калимаҳои калидӣ: Мониторинги экологӣ, сифати ҳавои атмосфера, зарраҳои муаллақи PM_{2.5}, низоми иттилоотии автоматикунонидашуда, сенсорҳои оптикӣ камхарҷ, пешгӯии ифлосшавии ҳаво, технологияҳои Саноати 4.0, тасдиқи блокчейнӣ, шаҳри Душанбе.

Мақсади кори диссертатсионӣ – Асосноккунии илмӣ такмили низоми мониторинги экологии сифати ҳавои атмосфера дар асоси лоиҳакашии низоми иттилоотӣ-таҳлилии автоматикунонидашуда дар шароити шаҳри Душанбе.

Натиҷаҳои бадастомада ва навгонии онҳо: Сохтори низоми мониторинги экологии сифати ҳавои атмосфера ҳамчун раванди рақамии бисёрсатҳа (ҷамъоварӣ, тасдиқ, нигоҳдорӣ, таҳлил, пешгӯӣ, назорати аз меъёр гузаштан) мушаххас карда шудааст. Зарурати ҳамгирии сарчашмаҳои собит, мобилӣ ва махсуси додаҳо дар як низоми ягона асоснок карда шудааст. Мувофиқати истифодаи сенсорҳои оптикӣ камхарҷи навъи SPS30 барои чен кардани PM_{2.5} дар муҳити шаҳрӣ бо роҳи таҳқиқи таҷрибавӣ асоснок гардида, модели градуиронӣ бо назардошти намнокии нисбӣ таҳия шудааст ($R^2 = 0,88$; $RMSE = 3,05$ мкг/м³ ҳангоми миёнакунии соатӣ). Тавассути таҳлили силсилаи вақтии 2269 мушоҳида сатҳи баланди устувори ифлосшавӣ (миёнаи 120,9 мкг/м³), ҳиссаи бартаридоштаи фасли сол (37,3 % диспергия) бо нишонаҳои баландтарин дар моҳҳои ноябр–январ, хусусияти инерциявии ифлосшавӣ, инчунин динамикаи шабонарӯзии PM_{2.5} (49,4 мкг/м³ дар шаҳр дар муқоиса бо 8,8 мкг/м³ дар минтақаи фанӣ) ва зиёдшавии зиёда аз ҳашт маротиба дар давраи тӯфонҳои ҷангу хок муайян гардиданд. Сохтори низоми иттилоотии автоматикунонидашудаи мониторинг (СНИАМ) бо модулҳои ҷамъоварии додаҳои сенсорӣ, иттилооти метеорологӣ, пойгоҳи додаҳо, тасдиқи блокчейнӣ, пешгӯӣ, назорати КХЧ, шартномаҳои ақлӣ, огоҳиномаҳо ва ҳисоботдиҳӣ таҳия шудааст; барои сохтор патенти хурди Ҷумҳурии Тоҷикистон гирифта шудааст. Алгоритми муттаҳидсозии додаҳои сарчашмаҳои гуногун бо назардошти коэффицентҳои сифат ва алоқамандии фазо-вақтӣ, инчунин мантиқи воқуниши автоматикунонидашуда ба аз меъёр гузаштани концентратсияҳои иҷозатдодашуда пешниҳод карда шудааст.

Тавсияҳо оид ба истифода: Сохтори таҳияшудаи РИСМКАВ ва маҷмӯи ҳуҷҷатҳои лоиҳавӣ (талабот, диаграммаҳои синф ва пайдарпай, прототипҳои интерфейс) тавсия дода мешавад, ки ҳангоми татбиқи барномавии низоми автоматикунонидашудаи шаҳрии мониторинги экологии сифати ҳавои атмосфера истифода шаванд. Ба Кумитаи ҳифзи муҳити зист назди Ҳукумати Ҷумҳурии Тоҷикистон ва Агентии гидрометеорология тавсия дода мешавад, ки шабакаи мушоҳидавиро тавассути ҳамгирии постҳои собит бо шабакаҳои тарқашудаи сенсорҳои оптикӣ камхарҷ бо миёнакунии ҳатмӣ соатӣ ва градуиронии намнокӣ рушд диҳанд. Ҳангоми банақшагирии тадбирҳои ҳифзи муҳити зист тавсия дода мешавад, ки қонунмандии мавсимии концентратсияи PM_{2.5} ва хусусияти инерциявии ифлосшавӣ ба назар гирифта шаванд, инчунин блоки пешгӯии низом дар асоси моделҳои силсилаи вақтӣ ва омӯзиши мошинӣ сохта шавад.

Соҳаи татбиқ: Натиҷаҳои рисола метавонанд аз ҷониби мақомоти давлатии идоракунии экологӣ ва хидмати гидрометеорологии Ҷумҳурии Тоҷикистон, ташкилотҳои лоиҳакашӣ ва илмӣ-таҳқиқотӣ ҳангоми таҳияи низомҳои автоматикунонидашудаи мониторинги экологӣ, хидматҳои экологии шаҳрии дигар шаҳрҳо бо шароити ба ҳам монанди табиӣ-иқлимӣ ва инфрасохторӣ, инчунин дар раванди таълимии муассисаҳои таҳсилоти олӣ ҳангоми таълими фанҳои «Экология» ва «Бехтарии ғайолияти инсон» истифода шаванд.

ABSTRACT

of the dissertation by Khakdodov Akbarjon Makhmadsharifovich on the topic "Improvement of the environmental monitoring system of atmospheric air quality in the conditions of Dushanbe city", submitted for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 2.9.6. Ecology

Keywords: Environmental monitoring, atmospheric air quality, PM2.5 particulate matter, automated information system, low-cost optical sensors, air pollution forecasting, Industry 4.0 technologies, blockchain verification, city of Dushanbe.

The aim of the dissertation: Scientific substantiation of the improvement of the environmental monitoring system for atmospheric air quality through the design of an automated information-analytical system for the conditions of the city of Dushanbe.

The obtained results and their novelty: The structure of the atmospheric air quality monitoring system has been refined as a multi-level digital process (collection, verification, storage, analysis, forecasting, control of exceedances). The necessity of integrating stationary, mobile and specialized data sources into a single automated system has been substantiated. The applicability of low-cost SPS30-type optical sensors for measuring PM2.5 in an urban environment has been experimentally confirmed: a calibration model accounting for relative humidity was obtained ($R^2 = 0.88$; $RMSE = 3.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ with hourly averaging). Analysis of a time series of 2,269 observations revealed a consistently high pollution level (mean $120.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$), a dominant seasonal component (37.3% of variance) with maxima in November–January, an inertial character of pollution, as well as diurnal PM2.5 dynamics ($49.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in the city versus $8.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in the background zone) and an eightfold increase during dust-intrusion episodes. An architecture of an automated air quality monitoring information system (AAQMINS) was developed, with modules for sensor data acquisition, meteorological information, a database, blockchain verification, forecasting, MPC control, smart contracts, notifications and reporting; a small invention patent of the Republic of Tajikistan was obtained. A data-fusion algorithm for heterogeneous sources, based on data-quality and spatio-temporal relevance coefficients, and an automated response logic for exceedances of permissible concentrations, were proposed.

Recommendations for use: The developed RISMKAV architecture and the design documentation package (requirements, class and sequence diagrams, interface prototypes) are recommended for use in the software implementation of an urban automated environmental air-quality monitoring system. The Committee for Environmental Protection under the Government of the Republic of Tajikistan and the Agency for Hydrometeorology are recommended to develop the observation network by integrating stationary posts with distributed networks of low-cost optical sensors, with mandatory hourly averaging and humidity calibration. When planning environmental protection measures, the established seasonal PM2.5 patterns and the inertial character of pollution should be taken into account, and the forecasting module should be built on time-series and machine-learning models.

Field of application: The dissertation results can be applied by state environmental management and hydrometeorological authorities of the Republic of Tajikistan, design and research organizations developing automated environmental monitoring systems, municipal environmental services of other cities with similar climatic and infrastructural conditions, and in the educational process of higher education institutions in the disciplines «Ecology» and «Life Safety».

Подписано к печати _____.2026 г.
Формат 60x84/16. Гарнитураи Times New Roman.
Бумага офсетная. Тираж 100 экз.
Отпечатано в типографии ТТУ имени академика М.С.Осими
г. Душанбе, 734042, проспект академиков Раджабовых, 10а

Ба чоп _____.2026 с. ичозат дода шуд.
Андозаи 60x84/16. Гарнитураи Times New Roman.
Қоғози офсетӣ. Теъдоди нашр 100 нусха.
Нашриёти ДТТ ба номи академик М.С.Осимӣ
ш. Душанбе, 734042, хиёбони академик Раҷабовҳо, 10а