МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ И НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН
Горно-металлургический институт Таджикистана

УДК: 502.3:504.3.054:551.5(575.3)

На правах рукописи



МАМАДОВ ИКРОМЖОН АХМАДАЛИЕВИЧ

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ СОСТОЯНИЯ КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ГОРОДА ХУДЖАНД

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

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

Душанбе – 2026

Работа выполнена в Горно-металлургического института Таджикистана (ГМИТ) на кафедре «Экология» факультета искусственного интеллекта и новых технологий.

Научный руководитель:	**Азизов Рустам Очильдиевич**, доктор технических наук, профессор, академик Инженерной академии Республики Таджикистан, заведующий отделом Центра инновационного развития науки и цифровых технологий Национальной академии наук Таджикистана
Официальные оппоненты:	**Абдуллозода Сабур Фузайл**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией физики атмосферы Физико-технического института имени С.У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана.
	Мирзохонзода Ситора Олтибой, кандидат технических наук, доцент кафедры метеорологии и климатологии физического факультета Таджикского национального университета.
Ведущая организация:	Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана

Защита состоится «29» декабря 2026 года в 16:30 часов на заседании диссертационного совета 6D.KOA-091 при Таджикском техническом университете имени академика М.С. Осими по адресу: 734042, г. Душанбе, проспект академиков Раджабовых, 10 а. E-mail: hboboev1967@gmail.com

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

Автореферат разослан «____» _____ 2026 года

Ученый секретарь Диссертационного совета, кандидат технических наук **Х.Б. Бобоев**

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Загрязнение атмосферного воздуха остаётся одной из наиболее значимых экологических проблем урбанизированных территорий и представляет угрозу здоровью населения, местным экосистемам и устойчивому развитию городов. Особую опасность представляют мелкодисперсные частицы PM2,5, способные проникать в глубокие отделы дыхательных путей и могут повышать риск сердечно-сосудистых и респираторных заболеваний [7].

Воздействие загрязнения атмосферного воздуха не ограничивается здоровьем человека. Взвешенные частицы от промышленных, транспортных, бытовых и природных источников переносятся воздушными массами и осаждаются на почвах, растениях и водных объектах. В зависимости от состава и интенсивности осаждения они могут негативно влиять на растения, почвенные процессы и водные экосистемы. Для Худжанда, сочетающего промышленные, жилые и озеленённые территории, мониторинг PM2,5 важен для оценки качества воздуха и потенциальной экологической нагрузки на окружающую среду.

Уровень загрязнения воздуха определяется взаимодействием антропогенных источников выбросов и природно-климатических факторов. На процессы накопления, переноса и рассеивания загрязняющих веществ влияют температура воздуха, относительная влажность, атмосферное давление, скорость и направление ветра, интенсивность атмосферных осадков, устойчивость атмосферы, особенности городской застройки, транспортная нагрузка и промышленная деятельность.

В Таджикистане мониторинг мелкодисперсных частиц особенно актуален вследствие горно-долинного рельефа, континентального климата и недостаточной плотности существующей наблюдательной сети. В г. Худжанд на качество воздуха влияют транспорт, промышленность, развитие городской инфраструктуры и сезонная изменчивость метеорологических условий. Поэтому комплексная оценка требует учёта фактических концентраций загрязнителей, источников выбросов, условий накопления и рассеивания.

Актуальность исследования усиливается социально-экономическим развитием города. Согласно Программе социально-экономического развития Худжанда на 2026–2030 годы, объём промышленного производства вырос с 1,5 млрд сомони в 2021 году до 2,1 млрд сомони в 2025 году (на 40%). За этот период пассажирские перевозки увеличились в 1,5 раза, грузовые - в 2,3 раза. Это обусловливает необходимость количественной оценки потенциальной антропогенной нагрузки по данным мониторинга и инвентаризации выбросов [16].

Дополнительное значение имеет изменение климатических условий. Отмечаемые в Программе развития города повышение температуры, учащение периодов жары, изменение режима осадков и рост риска пылевых явлений могут усиливать вторичное пылеобразование и влиять на накопление и рассеивание загрязнителей. Это требует совместного анализа метеорологических условий, природных и антропогенных источников [16].

Степень научной разработанности изучаемой проблемы. Проблематика формирования качества атмосферного воздуха городских территорий относится к числу актуальных направлений исследований в области экологии, физики атмосферы, метеорологии, экологического мониторинга и математического моделирования. Теоретические и методические основы экологического мониторинга окружающей среды сформированы в трудах Ю.А. Израэля [1], а современное состояние и ограничения системы мониторинга атмосферного воздуха Республики Таджикистан рассмотрены в профильном аналитическом исследовании [10].

Закономерности влияния метеорологических факторов на процессы накопления, переноса и рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере исследованы А.Ф. Финаевым [2], а климатические особенности и изменения условий территории Таджикистана отражены в национальных материалах по изменению климата [3, 15].

Вопросы формирования атмосферного аэрозоля, пылевых вторжений и распределения концентраций PM2,5 на территории Таджикистана рассмотрены в работах С.Ф. Абдуллаева, С.Ф. Абдуллозода, В.А. Маслова, Б.И. Назарова и соавторов [4–6]. Исследованию антропогенного загрязнения городской атмосферы, а также влияния стационарных и мобильных источников выбросов посвящены работы Х.Б. Бобоева, С.М. Каримова, С.С. Шоева, Х.Ш. Гулахмадова и соавторов [8, 9].

Методические аспекты применения низкобюджетных оптических сенсоров для экологического мониторинга представлены в современных исследованиях [11]. Основы математического моделирования распространения загрязняющих веществ изложены в работах М.Е. Берлянда [12]. Международные рекомендации по оценке загрязнения атмосферного воздуха мелкодисперсными частицами приведены в руководстве Всемирной организации здравоохранения [7].

Несмотря на значительный объём исследований, для г. Худжанд недостаточно представлены комплексные многолетние исследования пространственно-временной изменчивости концентраций PM2,5, основанные на непрерывных инструментальных наблюдениях и объединяющие анализ метеорологических и антропогенных факторов, оценку стационарных, мобильных, площадных и природных источников загрязнения и моделирование рассеивания примесей. Недостаточно изучены количественные зависимости концентраций PM2,5 от метеорологических параметров, сезонные особенности загрязнения, сравнительная роль основных групп источников, а также возможности объединения данных автоматизированного мониторинга и официальной отчётности по выбросам с методами статистического анализа и математического моделирования. Таким образом, сохраняется необходимость научного обоснования комплексного подхода к оценке и прогнозированию качества атмосферного воздуха Худжанда с учётом источников загрязнения и условий их рассеивания.

При этом недостаточно раскрыты возможности использования данных многолетнего мониторинга PM2,5 для оценки потенциальной атмосферной нагрузки на территории, подверженные антропогенному воздействию, включая жилые зоны, городские зелёные насаждения и прилегающие природные объекты. Это определяет необходимость установления закономерностей формирования загрязнения воздушного

бассейна и экологической интерпретации результатов с учётом потенциального воздействия загрязнителей на компоненты окружающей среды.

Связь исследования с программами и научными темами. Работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями государственной политики республики в области экологической безопасности, охраны атмосферного воздуха и развития экологического мониторинга.

Тематика исследования соответствует положениям Национальной стратегии развития Республики Таджикистан до 2030 года, Государственной экологической программы Республики Таджикистан на 2023–2028 годы, Стратегии адаптации к изменению климата и другим нормативно-правовым документам в сфере охраны окружающей среды [13–15].

На городском уровне исследование согласуется с приоритетами Программы развития г. Худжанд на 2026–2030 годы, предусматривающей дальнейшее развитие промышленности, транспортной и коммунальной инфраструктуры и одновременно определяющей снижение загрязнения воздуха, контроль выбросов, управление пылевой нагрузкой и повышение устойчивости городской инфраструктуры к изменению климата как актуальные направления развития [16].

Исследование направлено на решение научно-практических задач, связанных с совершенствованием методов оценки и прогнозирования качества воздуха г. Худжанд, развитием автоматизированного мониторинга, анализом экологических данных, систематизацией основных источников загрязнения и оценкой влияния природно-климатических и антропогенных факторов на процессы накопления и рассеивания загрязняющих веществ.

Этапы исследования выполнялись при взаимодействии с Гидрометеорологическим центром Согдийской области Комитета по охране окружающей среды при Правительстве РТ и Горно-металлургическим институтом Таджикистана в рамках работ по мониторингу атмосферного воздуха и развитию современных методов экологических наблюдений.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель исследования. Научное обоснование комплексного подхода к мониторингу, оценке и прогнозированию качества атмосферного воздуха г. Худжанд на основе многолетних измерений концентраций PM2,5, анализа природно-климатических и антропогенных факторов, статистической обработки данных и математического моделирования.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. Исследовать природно-климатические, топографические и антропогенные факторы, определяющие формирование воздушной среды г. Худжанд.
2. Обосновать и реализовать методику автоматизированного мониторинга концентраций PM2,5 и сопутствующих метеорологических параметров на основе сенсорных средств измерения.

3. Установить сезонные, суточные и межгодовые закономерности изменения концентраций PM2,5 и количественно оценить их взаимосвязь с основными метеорологическими параметрами и условиями накопления и рассеивания примесей.

4. Систематизировать и провести сравнительную оценку основных стационарных, мобильных, площадных, бытовых и природных источников загрязнения атмосферного воздуха города Худжанд на основе данных официальной отчётности, материалов по источникам выбросов и результатов мониторинга.

5. Адаптировать и программно реализовать математический подход к моделированию рассеивания PM2,5 от выбранного стационарного источника для условий города Худжанд с учётом параметров источника и метеорологических условий и выполнить сопоставление расчётных результатов с данными инструментальных наблюдений.

6. Разработать подход к прогнозированию качества атмосферного воздуха и научно-практические рекомендации по совершенствованию мониторинга и снижению загрязнения атмосферного воздуха города Худжанд.

Объектом исследования является воздушный бассейн города Худжанд в условиях воздействия природно-климатических и антропогенных факторов.

Предметом исследования являются пространственно-временная изменчивость концентраций мелкодисперсных частиц PM2,5, их взаимосвязь с природно-климатическими и антропогенными факторами, структура источников загрязнения, а также методы автоматизированного мониторинга, оценки и математического моделирования, используемые для прогнозирования качества атмосферного воздуха города Худжанд.

Научная новизна исследования

1. Обоснован комплексный подход к оценке и прогнозированию качества атмосферного воздуха г. Худжанд, объединяющий многолетние данные автоматизированного мониторинга мелкодисперсных частиц, анализ природно-климатических и антропогенных факторов, сведения об источниках загрязнения и математическое моделирование рассеивания.

2. Установлены количественные зависимости между концентрациями PM2,5 и основными метеорологическими параметрами городской атмосферы, определяющими сезонные особенности накопления и рассеивания аэрозольного загрязнения.

3. Разработан и апробирован подход к комплексной оценке пространственно-временной изменчивости качества воздуха на основе интеграции данных автоматизированного мониторинга, метеорологических наблюдений и анализа функциональных зон и источников загрязнения г. Худжанд.

4. Адаптирован к природно-климатическим условиям г. Худжанд математический подход к моделированию распространения мелкодисперсных частиц и сформирована схема программной реализации расчёта рассеивания PM2,5 от стационарного источника с учётом его фактических параметров и метеоданных. Сопоставление расчётных и экспериментальных данных показало удовлетворительную согласованность результатов при расчётной погрешности 12–18%.

5. Систематизированы основные стационарные, мобильные, площадные, бытовые и природные источники загрязнения атмосферного воздуха города Худжанд и предложен подход к их сравнительной оценке с учётом данных о выбросах, пространственного размещения, результатов мониторинга и условий рассеивания.

6. Предложена интегрированная схема мониторинга, оценки и прогнозирования качества воздуха города Худжанд, объединяющая сенсорные измерения, метеорологические наблюдения, сведения об источниках выбросов, статистическую обработку и математическое моделирование.

Теоретическая и научно – практическая значимость диссертационного исследования. Теоретическая значимость исследования заключается в развитии представлений о закономерностях формирования и изменения загрязнения атмосферного воздуха г. Худжанд с учётом совместного влияния природно-климатических и антропогенных факторов. Полученные результаты расширяют научные данные о сезонной, суточной и межгодовой изменчивости концентраций PM2,5, их зависимости от метеорологических параметров и особенностей накопления и рассеивания загрязняющих веществ, а также о возможностях объединения данных мониторинга, сведений об источниках выбросов и расчётного моделирования. Проведённые исследования обосновывают комплексное применение автоматизированного сенсорного мониторинга, статистического анализа и математического моделирования для оценки и прогнозирования качества атмосферного воздуха городской среды.

Практическая значимость исследования заключается в создании и апробации автоматизированной сети мониторинга качества воздуха на основе оптических сенсоров Plantower PMS5003 и метеорологических датчиков BME280, обеспечивающей непрерывную регистрацию концентраций PM1,0, PM2,5 и PM10, температуры воздуха, относительной влажности и атмосферного давления. Сформированный за 2019–2023 гг. массив данных использован для анализа динамики загрязнения атмосферного воздуха, оценки влияния метеорологических факторов и информационного обеспечения природоохранной деятельности. Объединение результатов мониторинга со сведениями об источниках выбросов и расчётным моделированием позволяет выявлять приоритетные зоны контроля, оценивать возможное влияние отдельных источников и разрабатывать прогнозные сценарии. Предложенный подход может применяться для развития муниципальных систем экологического мониторинга, информационного обеспечения онлайн-платформ, картирования загрязнения воздуха и обоснования мероприятий по снижению экологических рисков в г. Худжанд. Результаты исследования представляют практический интерес для природоохранных и гидрометеорологических служб, органов местного управления, научных и образовательных организаций.

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

1. Разработанный и апробированный метод распределённого автоматизированного мониторинга качества атмосферного воздуха г. Худжанд на основе сенсоров Plantower

PMS5003 и датчиков BME280, а также результаты комплексной оценки пространственно-временной изменчивости концентраций PM2,5 с учётом природно-климатических и антропогенных факторов.

2. Установленные закономерности и количественные зависимости между концентрациями PM2,5 и основными метеорологическими параметрами, характеризующие сезонные процессы накопления и рассеивания аэрозольного загрязнения, а также результаты систематизации и сравнительной оценки стационарных, мобильных, площадных, бытовых и природных источников загрязнения воздуха г. Худжанд с учётом условий их рассеивания.

3. Адаптированный математический подход и схема программной реализации расчёта рассеивания PM2,5 от выбранного стационарного источника в условиях г. Худжанд для пространственной оценки загрязнения и разработки прогнозных сценариев, а также научно-практические рекомендации по совершенствованию мониторинга, прогнозирования и снижению загрязнения атмосферного воздуха на основе интеграции инструментальных наблюдений и математического моделирования.

Степень достоверности результатов. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается современными методами экологического мониторинга атмосферного воздуха, анализом многолетних экспериментальных данных за 2019–2023 гг., методами математической статистики, включая корреляционный и регрессионный анализ, обработкой временных рядов, официальными сведениями о выбросах и параметрах стационарных источников, а также моделированием атмосферного рассеивания. Обоснованность результатов подтверждается согласованностью выявленных закономерностей, сопоставлением расчётных и инструментальных данных и соответствием современным научным представлениям о формировании аэрозольного загрязнения атмосферы.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.9.6. Экология по следующим направлениям исследований:

- п. 2.3. Прикладная экология – разработка принципов и практических мер, направленных на охрану живой природы, как на видовом, так и экосистемном уровне; разработка принципов создания искусственных экосистем и управления их функционированием. Исследование влияния антропогенных факторов на экосистемы различных уровней с целью разработки экологически обоснованных норм воздействия строительной, хозяйственной деятельности человека и эксплуатации ЖКХ на живую природу;

- п. 3.2. Исследование загрязнения компонентов природной среды транспортными объектами и техническими средствами обеспечения перевозок, с целью разработки экологически обоснованных норм воздействия транспортной деятельности человека на природную среду;

- п. 4.6. Научное обоснование принципов и разработка методов прогнозирования, предупреждения и ликвидации последствий загрязнения окружающей среды.

Личный вклад соискателя в получении научных результатов заключается в выборе направления исследования, постановке цели и задач, разработке программы и участии во всех этапах работы. Соискателем организована и развёрнута сеть автоматизированного мониторинга атмосферного воздуха на основе датчиков Plantower PMS5003 и BME280, выполнены сбор, обработка и статистический анализ данных за 2019–2023 гг., исследованы природно-климатические и антропогенные факторы, систематизированы основные источники загрязнения г. Худжанд и адаптированы методы моделирования рассеивания загрязняющих веществ. Разработана схема программной реализации модели для выбранного стационарного источника и выполнено сопоставление расчётных результатов с инструментальными измерениями. Проведён анализ научной литературы, подготовлены публикации, сформулированы основные положения, выводы и практические рекомендации. Графики, таблицы, карты и визуализации результатов подготовлены соискателем на основе собственных исследований и официальных материалов.

Апробация и реализация результатов исследования. Основные положения и результаты диссертации представлялись и обсуждались на международных и республиканских научно-практических конференциях, форумах и экспертных мероприятиях, посвящённых экологическому мониторингу, качеству атмосферного воздуха, устойчивому развитию и экологической безопасности.

Результаты исследования представлены на IX Международной научно-практической конференции «Проблемы природопользования, устойчивого развития и техногенной безопасности регионов» (Днепр, 2021), Республиканской конференции «Современные инженерно-технические проблемы Таджикистана», посвящённой 30-летию Государственной независимости Республики Таджикистан (Душанбе, 2021), международном форуме TechCamp Bishkek «За чистый воздух в Центральной Азии» (Бишкек, 2022), Первой Центральноазиатской конференции по качеству воздуха AQCA 2022 (Бишкек, 2022), международных научно-практических конференциях «Использование природных ресурсов, экология и устойчивое развитие» (Бустон, 2022) и «Водная безопасность - основа устойчивого развития» (Душанбе, 2022), а также AQCA 2023 «Системные изменения для улучшения качества воздуха» (Астана, 2023). Отдельные вопросы обсуждались в рамках международной инициативы Community of Practice for Air Quality Systems (COMPASS) в 2025–2026 гг. и международного круглого стола «Deployment of Microsensors Around the World: From Local Solutions to Global Impact» (7 сентября 2026 года), проведённого в рамках конкурса AIRLAB Microsensors Challenge 2025.

Основные результаты исследования отражены в научных публикациях автора и послужили основой для дальнейших исследований в области мониторинга качества воздуха и экологической оценки городской среды.

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликованы 20 печатных работ, в том числе 7 статей в изданиях, включённых в перечень ВАК при Президенте Республики Таджикистан, а также 13 публикаций в материалах международных и республиканских научно-практических конференций.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, общих выводов, рекомендаций по практическому использованию результатов исследования, списка использованной литературы и списка опубликованных работ по теме диссертации. Общий объём работы составляет 180 страницы. Диссертация содержит 48 рисунков, 30 таблиц, список использованной литературы из 156 наименований и 20 опубликованных работ автора.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Первая глава посвящена литературному обзору факторов формирования и методов оценки качества атмосферного воздуха г.Худжанд. Рассмотрены антропогенная нагрузка, климатические условия, системы экологического мониторинга, а также воздействие загрязнения на здоровье населения, экосистемы и экономику. На основе научной литературы показано, что осаждение взвешенных частиц на листьях может затруднять газообмен и фотосинтез, а атмосферные выпадения - создавать дополнительную нагрузку на почвы и водные объекты.

По данным Программы социально-экономического развития г.Худжанд на 2026–2030 годы, в 2025 году функционировало 325 промышленных предприятий. За 2021–2025 гг. объём промышленного производства вырос с 1,5 до 2,1 млрд сом., пассажирские перевозки - в 1,5 раза, грузовые - в 2,3 раза, а капитальные вложения в строительство - в 4,5 раза [16]. Рассмотрены стационарные, мобильные, площадные, бытовые и природные источники загрязнения, включая возможный трансграничный перенос пыли. Отмечено влияние долинного рельефа, температурного и ветрового режимов, осадков на накопление и рассеивание примесей.

Анализ систем мониторинга выявил ограниченность пространственного охвата наблюдений за мелкодисперсными частицами в различных зонах города. Рассмотрены контактные (рис. 1), дистанционные (рис. 2) и автоматизированные методы наблюдения. Обоснована необходимость комплексного применения сенсорного мониторинга, метеорологических данных, сведений об источниках выбросов и математического моделирования для оценки и прогнозирования качества атмосферного воздуха г. Худжанд.

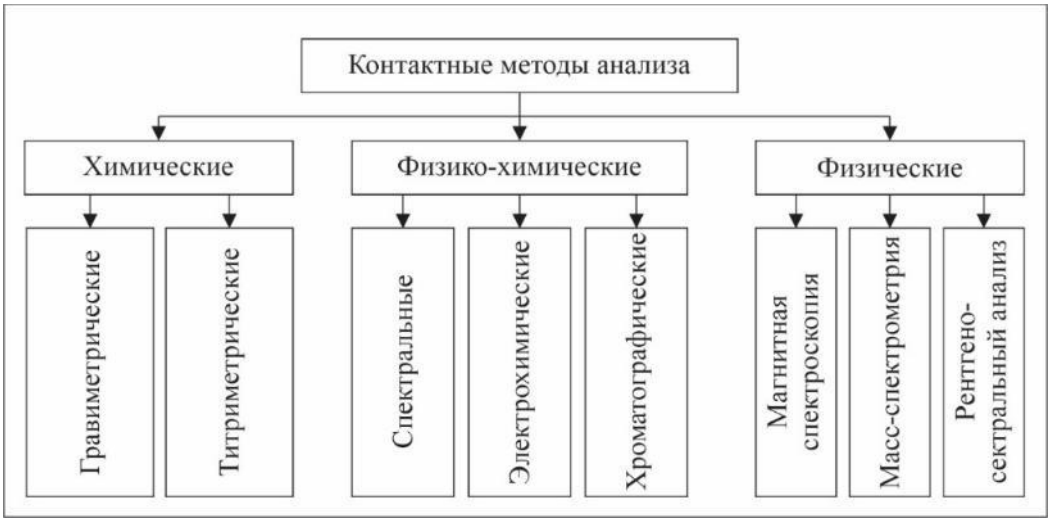


Рисунок 1. - Классификация контактных методов анализа

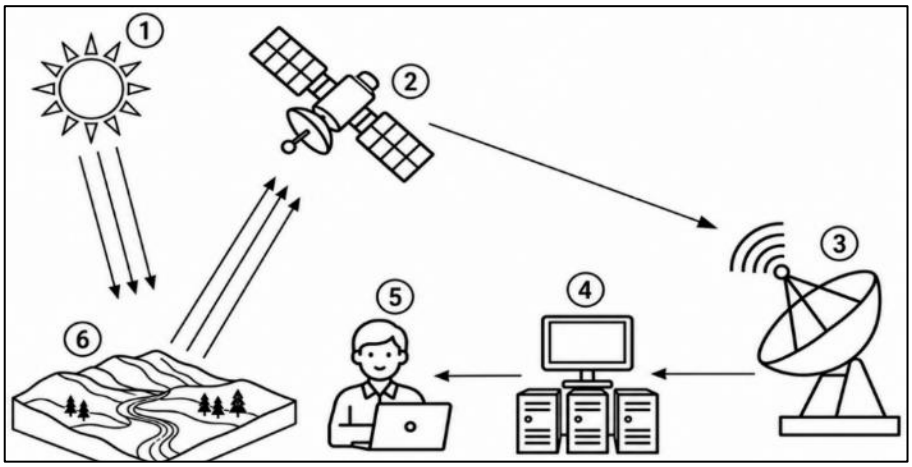


Рисунок 2. - Принципиальная схема спутникового дистанционного зондирования: 1. Источник электромагнитного излучения; 2. Высотный комплекс, спутник; 3. Наземный комплекс; 4. Система сбора, обработки и хранения данных; 5. Информация и потребитель; 6. Сцена, зона зондирования.

Во второй главе изложена методика исследования качества атмосферного воздуха г. Худжанд: определены объект, контролируемые показатели и информационная база, обоснован выбор оптических сенсоров Plantower PMS5003 и метеорологических датчиков BME280, рассмотрены организация наблюдений и методы статистической обработки. Информационную базу составили данные автоматизированного мониторинга, метеорологические материалы, отчётность по форме 2-ТП (воздух) за 2023–2025 гг., Программа развития города и характеристики стационарных источников выбросов, используемые при моделировании.

Для оценки воздействия аэрозольного загрязнения на здоровье человека используются показатели массовой концентрации частиц PM10 (аэродинамическим диаметром до 10 мкм) и PM2,5 (до 2,5 мкм). Частицы PM2,5 способны проникать в глубокие отделы дыхательной системы, достигая альвеол лёгких (рис. 3).

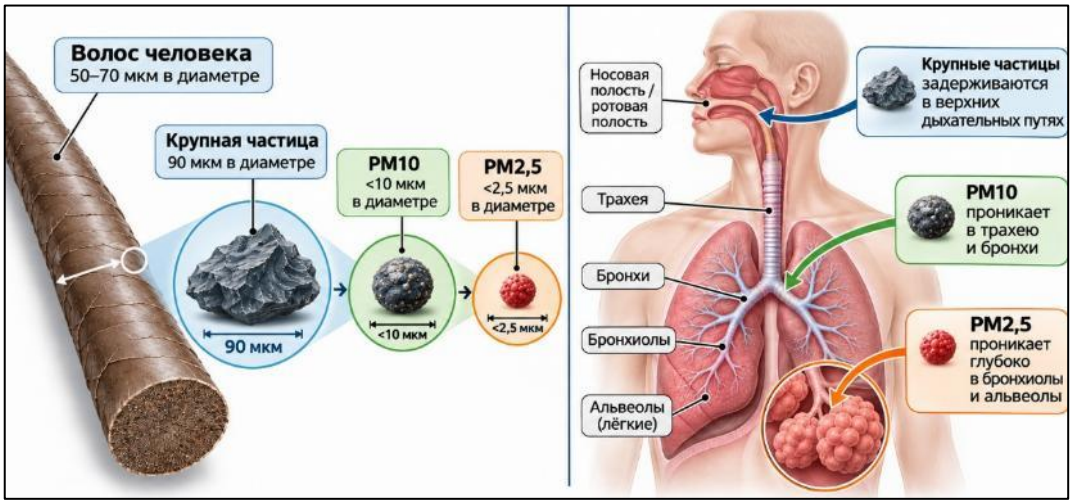


Рисунок 3. - Сравнение размеров аэрозольных частиц PM10 и PM2,5 и схема их проникновения в дыхательную систему человека

К основным антропогенным источникам взвешенных частиц в городе относятся автомобильный транспорт, промышленные предприятия, бытовое отопление и строительная деятельность, включая повторный подъём дорожной и почвенной пыли.

Ограниченный пространственный охват наблюдений за твёрдыми частицами (ТЧ) обусловливает необходимость дополнительных измерений фракций PM1,0, PM2,5 и PM10. Для определения их концентраций применяются гравиметрические методы и автоматизированные инструментальные измерения. В настоящем исследовании использован метод непрерывного автоматизированного мониторинга, позволяющий регистрировать изменения концентраций в режиме, близком к реальному времени.

Для исследования концентраций PM1,0, PM2,5 и PM10 использована автоматизированная система на основе оптических сенсоров Plantower PMS5003. Измерительный комплекс включает сенсорные модули, электронные компоненты обработки и передачи данных, а также защитные корпуса (рис. 4).



Рисунок 4. - Основные компоненты автоматизированной системы мониторинга качества атмосферного воздуха: сенсоры Plantower PMS5003, электронные модули и защитные корпуса

Принцип работы PMS5003 основан на лазерном светорассеянии: частицы, проходящие через измерительную камеру, рассеивают свет, регистрируемый фотоприёмником. Полученный сигнал обрабатывается электроникой сенсора и используется для расчётного определения массовых концентраций частиц (рис. 5).

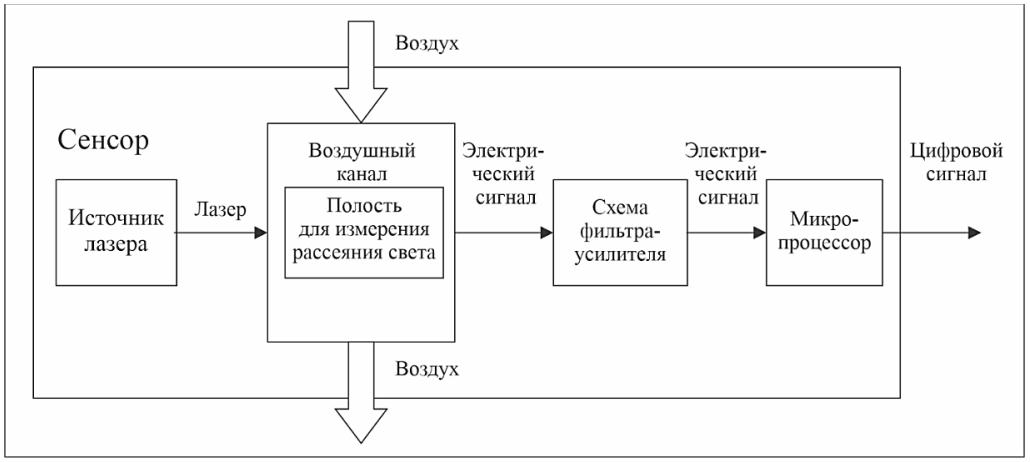


Рисунок 5. - Принципиальная схема работы сенсора Plantower PMS5003

Организация системы наблюдений: Правовую основу экологического мониторинга составляют Закон РТ «Об охране атмосферного воздуха» от 28 декабря 2012 года и Закон РТ «Об экологическом мониторинге» от 25 марта 2011 года № 707. При организации наблюдений учитывались методические положения ГОСТ 17.2.3.01–

86 и РД 52.04.186–89. Согласно ГОСТ 17.2.3.01–86, рекомендуемый минимальный охват стационарными постами зависит от численности населения: до 50 тыс. человек - один пост, 200–500 тыс. - 3–5 постов, более 500 тыс. - 5–10 постов.

В пределах г. Худжанд были определены четыре пункта установки сенсоров: 19-й и 31-й микрорайоны, район «Ватан» и район «Шелкокомбинат». Их размещение учитывало расположение основных источников выбросов, трёх промышленных зон и транспортных направлений Худжанд – Б.Гафуров, Худжанд–Чанак и Худжанд – Душанбе. Выборка обеспечивала наблюдения в различных зонах города (рис. 6).



Рисунок 6. Схема размещения пунктов мониторинга PMS5003 и промышленных зон на территории г. Худжанд

При выборе точек учитывались пространственный охват территории, условия размещения оборудования, доступность электропитания и мобильной связи GSM/GPRS для передачи данных. Сенсоры устанавливались на высоте от 1,5 до 10 м с учётом технических условий и обеспечения их сохранности [16-А, с. 86].

Международный опыт показывает, что недорогие оптические сенсоры могут дополнять традиционные системы мониторинга, расширяя пространственный охват наблюдений. В отдельных исследованиях при сравнении показаний таких сенсоров с эталонными приборами достигались коэффициенты детерминации $R^2 > 0{,}8$. Вместе с тем достоверность измерений зависит от метеорологических условий, характеристик аэрозоля и калибровки приборов. Применение подобных систем способствует изучению пространственно-временной изменчивости концентраций PM2,5 и совершенствованию экологического мониторинга.

Третья глава посвящена анализу состояния качества атмосферного воздуха г.Худжанд, природно-климатических условий, системы экологического мониторинга и основных источников загрязнения. Рассмотрены метеорологические и топографические факторы, стационарные, мобильные, площадные, бытовые и природные источники. Для оценки антропогенной нагрузки использованы статистические материалы, отчётность по форме 2-ТП (воздух), сведения о промышленности и транспорте, а также исследования регионального переноса частиц.

Формирование качества атмосферного воздуха Худжанда определяется сочетанием природных условий и антропогенных источников загрязнения. Город расположен в западной части Ферганской долины, на берегах Сырдарьи, между Туркестанским хребтом и массивом Моголтау. Долинный рельеф, температурный режим, атмосферные осадки и ветровая циркуляция влияют на перенос, накопление и рассеивание загрязняющих веществ.

Климат Худжанда характеризуется выраженной сезонностью температур и неравномерным распределением осадков. Наиболее высокие температуры наблюдаются летом, когда недостаток осадков повышает вероятность вторичного пылеобразования. Основные климатические характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1. - Климатические показатели г. Худжанд

Месяцы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Средний макс., °C	3,5	6,2	13,8	21,9	28,6	34,2	35,5	32,4	28,8	20,6	12,3	5,6	20,3
Средний мин., °C	3,2	1,8	4,2	10,7	15,6	19,6	21,2	18,8	13,6	8,1	3,4	0,5	9,1
Норма осадков, мм	15,1	15,4	24,9	26,8	20,1	8,6	3,9	1,2	3,2	14,9	15,7	17,3	167,1

По климатическим данным за ноябрь–март суммарное количество осадков составляет около 88,7 мм, тогда как за июнь–август - 13,8 мм. Для города характерны восточные, западные и юго-западные ветры. Усиление ветра при определённых условиях способствует рассеиванию примесей, тогда как слабый ветер и температурные инверсии могут создавать условия для накопления загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы.

Анализ государственной системы мониторинга выявил ограниченность пространственного охвата наблюдений и перечня контролируемых загрязняющих веществ. Как отмечено в ранее опубликованной работе автора: «До приобретения независимости Республики Таджикистан мониторинг атмосферного воздуха проводился в семи крупных городах страны на базе 21 наблюдательных пунктов по 20 видам загрязнителей» [5-А, с. 109]. Также приведены сведения о контролируемых и публикуемых показателях качества воздуха в отдельных городах республики (табл. 2).

Таблица 2. - Контролируемые загрязняющие вещества и публикуемые данные о загрязнении воздуха

Город	Контролируемые загрязняющие вещества	Публикуемые данные о контролируемых загрязняющих веществах
Душанбе	SO_2, CO, CHOH, O_3,NO, NO_2, пыль	SO_2, CO, CHOH, NO, NO_2, пыль
Худжанд	SO_2, CO, NO_2, O_3	SO_2, NO_2
Бохтар	SO_2, CO, NO, NO_2	SO_2, NO_2
Гулистон	SO_2, CO, NO_2, O_3	SO_2, NO_2
Турсунзаде	SO_2, CO, NO, NO_2	SO_2, NO_2

Представленные данные свидетельствуют об ограниченности доступной информации по отдельным фракциям частиц, включая PM2,5 и PM10, что обосновывает необходимость расширения автоматизированного мониторинга.

Сравнение статистических данных показывает значительную роль передвижных источников в суммарном объёме учтённых выбросов, тогда как промышленные предприятия и котельные имеют существенное значение для локального загрязнения.

По рассмотренным данным за 2018 год доля передвижных источников оценивалась примерно в 94%. Этот показатель характеризует массу учтённых выбросов в соответствующем статистическом массиве и не определяет непосредственно долю автотранспорта в концентрациях PM2,5.

По данным за 2019 год, суммарные выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников Худжанда составили 1146,2 т, в том числе твёрдых веществ - 450,2 т, оксида углерода - 387,4 т и диоксида серы - 158,0 т. В 2018 году общий объём учтённых выбросов составлял 972,0 т. Сопоставление выбросов стационарных источников города, Согдийской области и республики представлено на рис. 7.

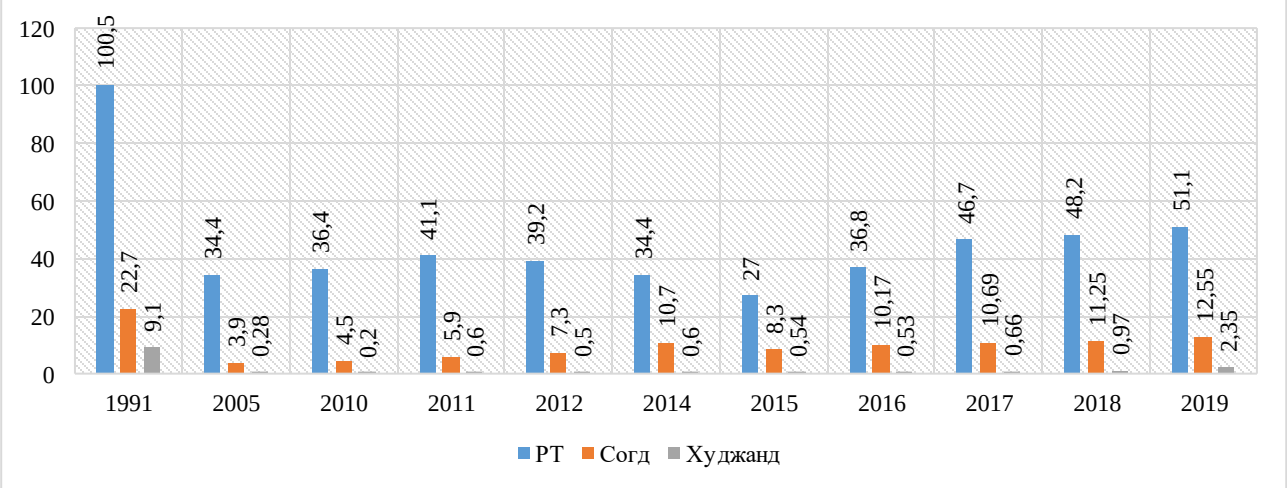


Рисунок 7. - Сопоставление выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников г. Худжанд, Согдийской области и РТ (тыс. тонн).

Как отмечено в отчёте по ООС РТ «На автотранспорт в Республике Таджикистан приходится 90% всех внутренних грузоперевозок. За последнее десятилетие количество автотранспорта в стране увеличилось более чем на 80%. Ежегодный средний прирост транспортных средств составлял от 20 до 30 тыс. автомобилей в год (2015 г. – 11 700, 2019 г. – 21 356, 2020 г. – 23 019). На 1 тыс. жителей приходится 43–44 автомобиля, что является самым низким показателем среди стран ЦА» [10, с. 19].

Приведённые сведения характеризуют развитие транспорта в период, рассматриваемый в источнике. Увеличение транспортной активности повышает потенциальную нагрузку на атмосферный воздух, связанную с выбросами продуктов сгорания топлива, износом дорожного покрытия, шин и тормозных механизмов. Существенное значение имеют техническое состояние автомобилей и качество топлива. Динамика транспортной нагрузки в Худжанде представлена в табл. 3.

Таблица 3. - Динамика численности автотранспорта и выбросов загрязняющих веществ от передвижных источников в г. Худжанд

Годы	**2006**	**2007**	**2008**	**2010**	**2011**	**2014**	**2016**	**2019**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**
Худжанд, всего тыс.шт.	11,9	13,4	14,3	16,8	17,2	18,6	19,2	20,9	21,5	21,8	22,1	22,4	25,6
Выброс от автотранспорта тыс.тонн.	9,4	10,6	11,6	13,3	13,5	14,5	15,1	15,2	11,6	11,3	12,2	12,9	13,8

По представленным данным, численность автотранспорта Худжанда увеличилась с 11,9 тыс. единиц в 2006 году до 22,4 тыс. в 2024 году. При этом объёмы выбросов изменялись неравномерно, поскольку зависят от структуры автопарка, качества топлива и интенсивности эксплуатации транспортных средств.

Дополнительным фактором антропогенного воздействия является использование топлива в промышленности, энергетике и бытовом секторе. Согласно Четвёртому национальному сообщению РТ, в 2016 году суммарные выбросы парниковых газов без учёта сектора землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства составили 15 572,98 Гг CO_2-экв., а с учётом данного сектора - 13 974,56 Гг CO_2-экв. В структуре выбросов значительную долю составляли сельское хозяйство (44,7%) и энергетический сектор (около 42%) [3, с. 54].

В холодный период существенное значение для качества атмосферного воздуха имеет бытовое отопление, включая использование угля и древесного топлива. В Согдийской области отопление преимущественно обеспечивается электроэнергией и другими видами топлива, тогда как доступность природного газа ограничена. Сжигание твёрдого топлива способствует поступлению в атмосферу взвешенных частиц и газообразных загрязняющих веществ.

Природный и региональный перенос аэрозолей также влияет на качество воздушного бассейна Худжанда. В отдельные периоды пылевые бури, ветровая эрозия почв и перенос частиц с сопредельных территорий способны усиливать загрязнение атмосферы. Вопросы влияния климатических изменений на формирование пыльных бурь рассмотрены в исследованиях автора [13-А].

Сравнительный анализ структуры атмосферных выбросов РТ за 1991 и 2018 годы показал изменение соотношения твёрдых и газообразных загрязняющих веществ. Доля твёрдых компонентов увеличилась приблизительно с 28,6 до 34,0%, несмотря на сокращение их абсолютной массы.

Таким образом, загрязнение воздуха Худжанда формируется под совместным воздействием транспортных, промышленных, бытовых и природных источников. Для оценки их влияния на концентрации PM2,5 необходимо учитывать характер выбросов, метеорологические условия и результаты инструментального мониторинга.

В четвёртой главе выполнены анализ, оценка и сценарное прогнозирование качества атмосферного воздуха г. Худжанд на основе данных автоматизированного мониторинга, статистической обработки и математического моделирования. Основное внимание уделено межгодовой, сезонной и суточной изменчивости концентраций PM2,5, их взаимосвязи с метеорологическими параметрами и пространственному распространению загрязняющих веществ.

Автоматизированные наблюдения включали регистрацию концентраций PM1,0, PM2,5 и PM10, температуры воздуха, относительной влажности и атмосферного давления с интервалом пять минут. При принятой в диссертации схеме учёта за 2019–2023 годы сформирован массив из 735 840 почасовых и 30 660 среднесуточных значений по совокупности контролируемых параметров. Регистрация данных продолжалась до марта 2024 года, тогда как основной анализ охватывает 2019–2023

годы. Использование автоматизированных сенсорных систем позволяет выявлять пространственно-временные особенности аэрозольного загрязнения и расширять информационную базу экологического мониторинга [3-А].

В качестве основного показателя углублённого анализа выбрана концентрация PM2,5 ввиду её экологической и санитарно-гигиенической значимости. Обработка данных включала определение среднегодовых, сезонных и суточных концентраций, повторяемости повышенных значений и корреляционно-регрессионный анализ с учётом температуры, влажности, атмосферного давления, осадков и ветрового режима.

По данным пункта «19-й микрорайон», среднегодовые концентрации PM2,5 составили 53,5 мкг/м³ в 2019 году, 51,6 мкг/м³ в 2020 году, 57,7 мкг/м³ в 2021 году, 51,5 мкг/м³ в 2022 году и 57,3 мкг/м³ в 2023 году. Все значения значительно превышают рекомендуемый ВОЗ среднегодовой уровень 5 мкг/м³.

Для оценки повторяемости повышенного загрязнения использован среднесуточный порог 35 мкг/м³. По данным пункта «19-й микрорайон», доля дней с концентрациями выше указанного уровня составила 49,9% в 2019 году и 50,0% в 2020 году. По совокупности суточных наблюдений четырёх пунктов сети соответствующие показатели составили 51,4% в 2021 году, 52,9% в 2022 году и 53,4% в 2023 году.

Выявлена выраженная сезонная изменчивость загрязнения ТЧ. По среднемесячным данным за 2019–2022 годы средняя концентрация PM2,5 в зимний период составила 100,9 мкг/м³, а в летний - около 25,0 мкг/м³, что соответствует различию приблизительно в 4,05 раза (рисунок 8). Наибольшее среднее зимнее значение отмечено в 2021 году - 109,0 мкг/м³. Полученная закономерность согласуется с увеличением отопительной нагрузки и изменением метеорологических условий, влияющих на накопление и рассеивание ТЧ.

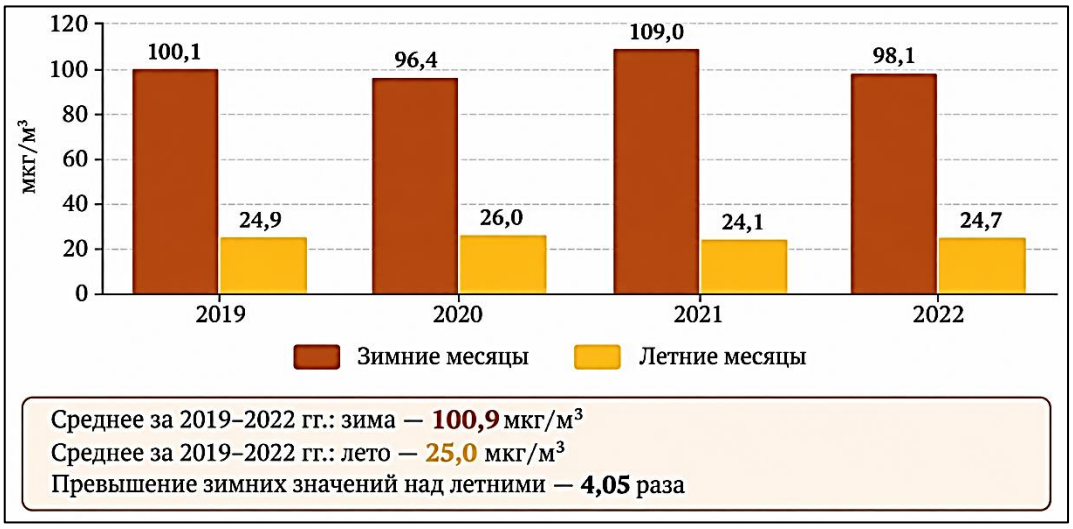


Рисунок 8. - Сравнительная динамика среднемесячных концентраций PM2,5 в зимний и летний периоды 2019–2022 годов в г. Худжанд

Для количественной оценки взаимосвязи концентраций PM2,5 с метеорологическими параметрами выполнен корреляционно-регрессионный анализ. По 12 среднемесячным значениям пункта «19-й микрорайон» за 2022 год установлена сильная отрицательная корреляция PM2,5 с температурой воздуха ($r = -0{,}903$; $R^2 = 0{,}815$). Линейная зависимость описывается уравнением $PM2{,}5 = 101{,}31 - 2{,}67T$, где T -

среднемесячная температура воздуха, °C (рис. 9). Полученная статистическая связь отражает совместную сезонную изменчивость температуры, отопительной нагрузки и загрязнения, но не доказывает непосредственной причинной зависимости.

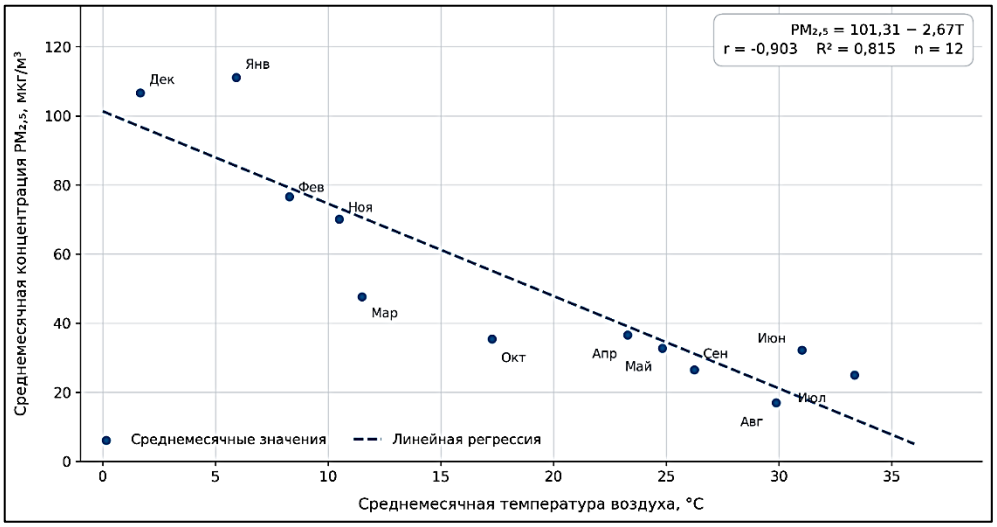


Рисунок 9. - Корреляционная зависимость среднемесячных концентраций PM2,5 от температуры воздуха на пункте мониторинга «19-й мкр» г. Худжанд за 2022 г.

Обобщённые результаты корреляционно-регрессионного анализа представлены в таблице 4.

Таблица 4. – Сводные результаты корреляционного и регрессионного анализа концентраций PM2,5 и метеорологических параметров

Показатель	Результат	Период анализа
PM2,5 и температура	r = −0,903; R^2 = 0,815	2022 г., 12 месяцев
PM2,5 и влажность	r = +0,866; R^2 = 0,751	2021 г., 12 месяцев
PM2,5 и влажность	r = +0,823; R^2 = 0,677	2022 г., 12 месяцев
PM2,5 и давление	r ≈ +0,513; R^2 = 0,2634	2021–2023 гг.
Температура и влажность	r = −0,942	2022 г., 12 месяцев
PM2,5, температура и влажность	R^2 = 0,822	Множественная регрессия, 2022 г.

Корреляционный анализ выявил положительную связь концентраций PM2,5 с относительной влажностью и умеренную положительную связь с атмосферным давлением. Между температурой и влажностью установлена сильная отрицательная корреляция (r = −0,942). Совместное включение температуры и влажности в регрессионную модель увеличило R^2 с 0,815 до 0,822. Невысокий прирост объясняется высокой взаимосвязью самих метеорологических параметров.

Для выявления суточных закономерностей проведён анализ почасовых данных за период с декабря 2022 года по ноябрь 2023 года с последующим усреднением показателей по часам суток и месяцам. Установлено повышение концентраций PM2,5 преимущественно с 6 до 10 часов утра, последующее снижение до 17 часов и повторное увеличение в вечерний период до 23 часов (рисунок 10). Наиболее высокие значения усреднённых суточных профилей наблюдались в январе - более 120 мкг/м³, декабре - более 90 мкг/м³, ноябре и феврале - выше 60 мкг/м³. Такая динамика может быть связана с сочетанием транспортной активности, отопительной нагрузки и условий атмосферного перемешивания.

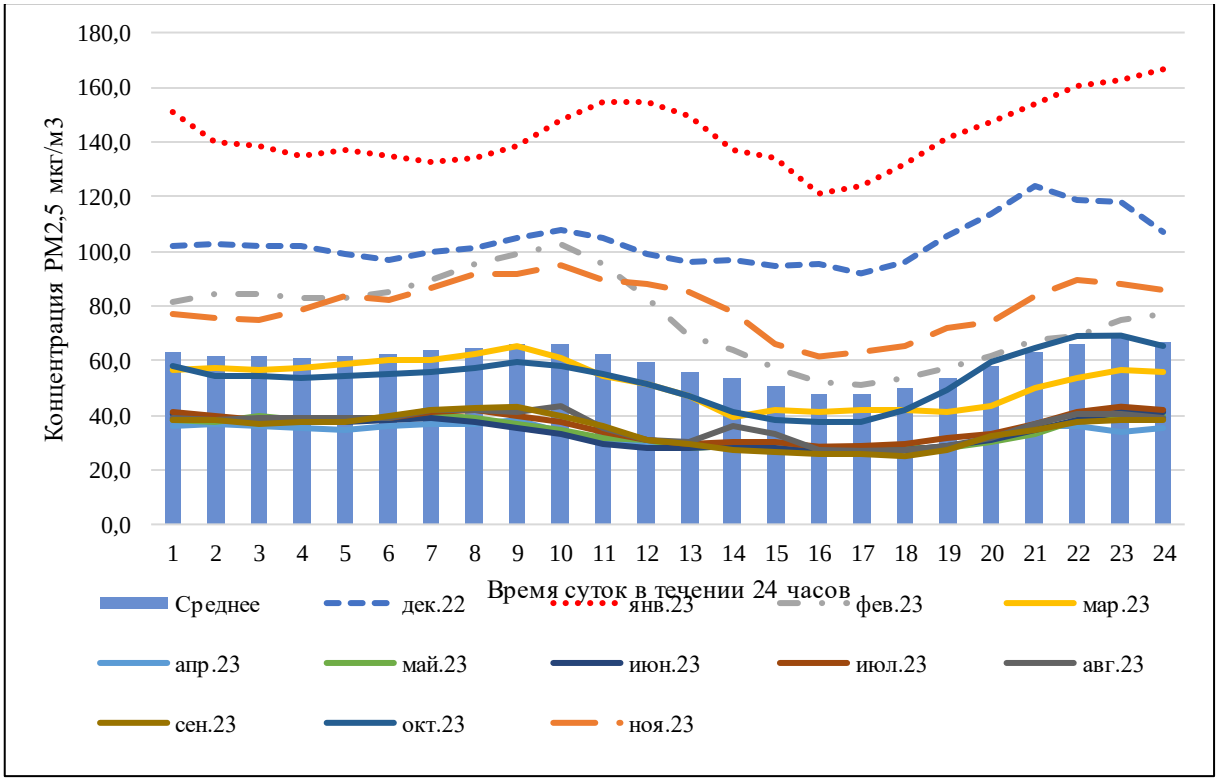


Рисунок 10. - Суточная изменчивость усреднённых почасовых концентраций PM2,5 по месяцам за декабрь 2022 – ноябрь 2023 года в г. Худжанд

Для дополнительной оценки температурных условий выполнено сопоставление динамики PM2,5 и температуры воздуха по данным пункта «Шелкокомбинат» за 2023 год (рис. 11). В отдельные периоды зимнего похолодания наблюдалось значительное увеличение концентраций ТЧ. В январе 2023 года при отрицательных температурах фиксировались эпизоды повышения PM2,5 приблизительно до 320 мкг/м³. Подобная изменчивость наблюдалась также в другие периоды холодного сезона. Эти результаты свидетельствуют о необходимости совместного учёта метеорологических факторов и сезонных источников выбросов, включая отопление и транспорт.

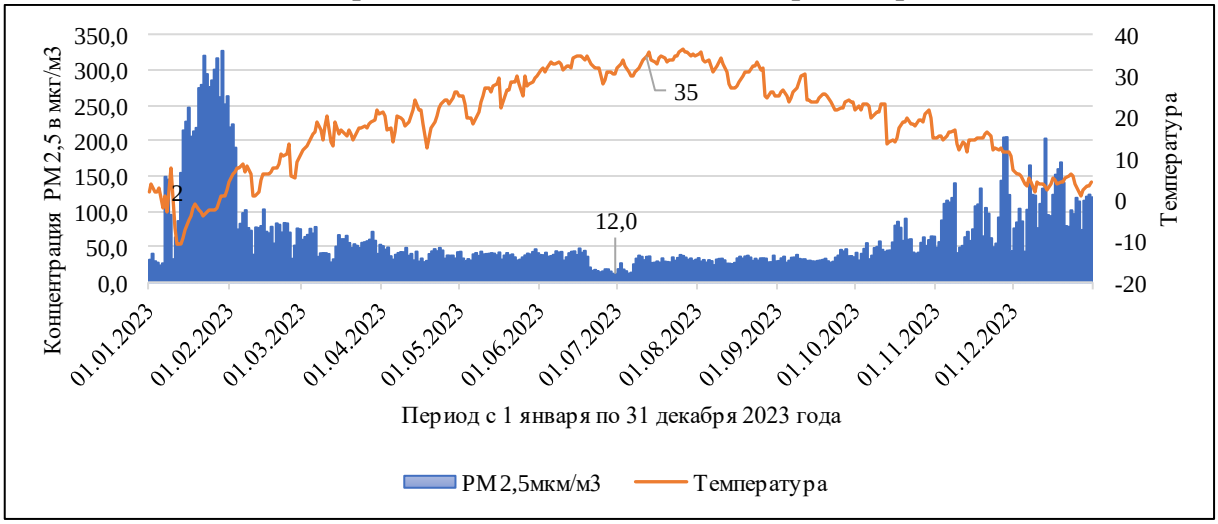


Рисунок 11. - Сопоставление температуры воздуха и концентраций PM2,5 на пункте «Шелкокомбинат» г. Худжанд за 2023 год

Сопоставление показателей влажности временной динамики с концентрациями PM2,5 на пункте «Шелкокомбинат» показало неоднозначный характер взаимосвязи

(рис. 12). В отдельные периоды повышение влажности сопровождалось снижением концентраций, в том числе при выпадении осадков. Вместе с тем корреляционный анализ среднемесячных данных за 2021–2022 годы выявил положительную статистическую связь влажности и PM2,5. Различия результатов объясняются неодинаковыми временными масштабами анализа и совместным изменением температуры, осадков, отопительной нагрузки и условий рассеивания.

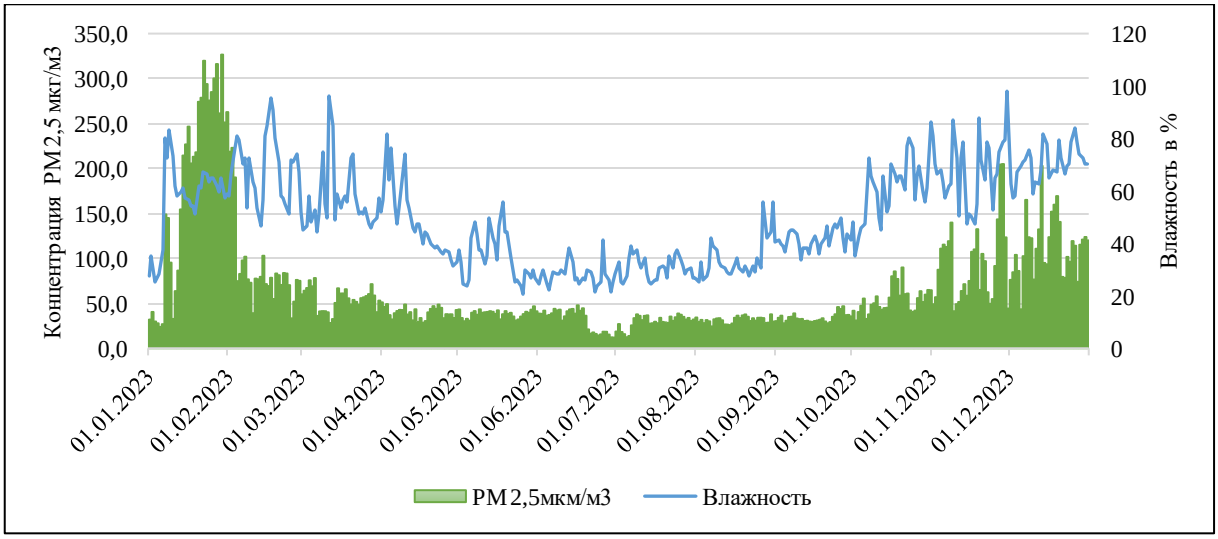


Рисунок 12. Сопоставление относительной влажности воздуха и концентраций PM2,5 на пункте «Шелкокомбинат» г. Худжанд

Для оценки возможного влияния атмосферных осадков проведено сопоставление среднесуточных концентраций PM2,5 и количества осадков за 2021 год (рисунок 13). В отдельные периоды выпадение осадков сопровождалось выраженным снижением загрязнения. Так, с 11 по 16 ноября 2021 года концентрация PM2,5 уменьшилась с 201,8 до 22,4 мкг/м³, или приблизительно в девять раз. Выявленная динамика согласуется с механизмом влажного осаждения аэрозольных частиц, однако не позволяет количественно определить самостоятельный вклад осадков без учёта ветрового режима и других факторов.

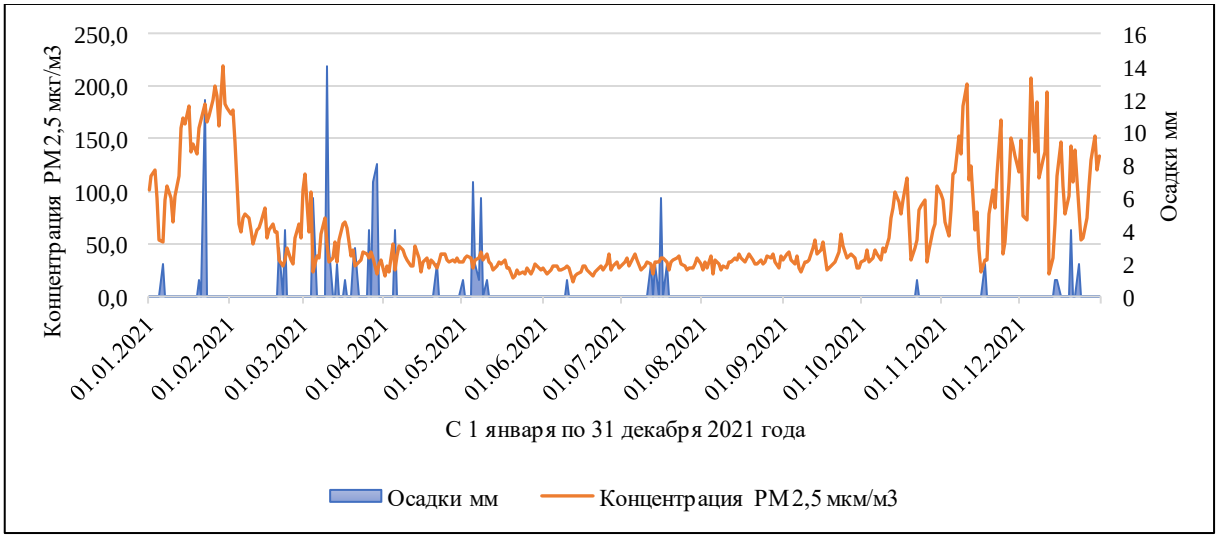
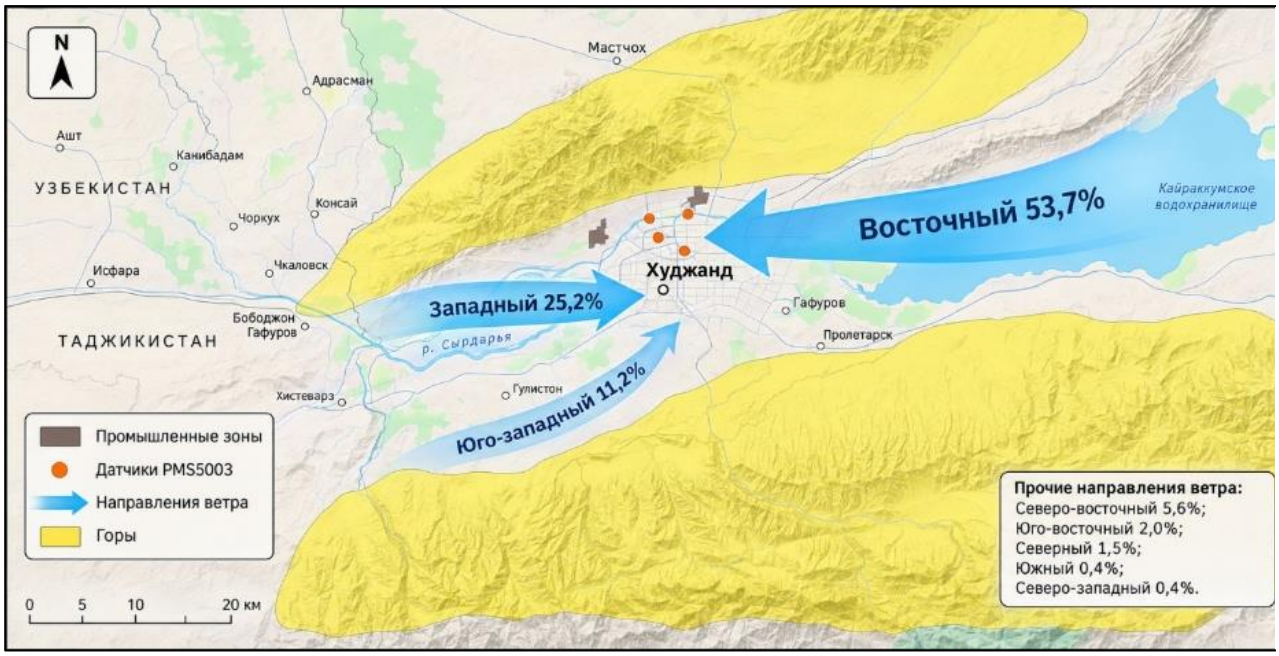


Рисунок 13. - Сопоставление количества атмосферных осадков и концентраций PM2,5 на пункте «Шелкокомбинат» г. Худжанд за 2021 г.

В работе также рассмотрено влияние скорости и направления ветра на процессы переноса и рассеивания загрязняющих веществ. Географическое положение Худжанда в западной части Ферганской долины, между Туркестанским хребтом и массивом Моголтау, формирует особенности местной циркуляции воздушных масс. По данным представленной розы ветров, преобладают восточные направления - 53,7%, западные - 25,2%, юго-западные - 11,2% и северо-восточные - 5,6% (рис. 14).



В – 53,7%, З – 25,2%, Ю - З – 11,2%, С - В – 5,6%,
Ю - В – 2%, С – 1,5%, Ю – 0,4%, С - З–0,4%

Рисунок 14. - Роза ветров г. Худжанд по использованным многолетним данным

Результаты анализа подтверждают необходимость комплексного учёта температурного режима, влажности, атмосферных осадков, направления и скорости ветра, а также сезонной отопительной нагрузки при оценке и прогнозировании концентраций PM2,5 [2-А].

Для предварительной оценки пространственного распространения загрязняющих веществ в работе адаптирован физико-математический подход на основе гауссовой модели рассеивания. Модель учитывает массовую интенсивность выброса Q, эффективную высоту источника H(м), скорость и направление ветра, класс устойчивости атмосферы и пространственные координаты расчётных точек. Такой подход позволяет рассчитывать распределение концентраций при заданных условиях переноса и рассеивания [12, 6-А].

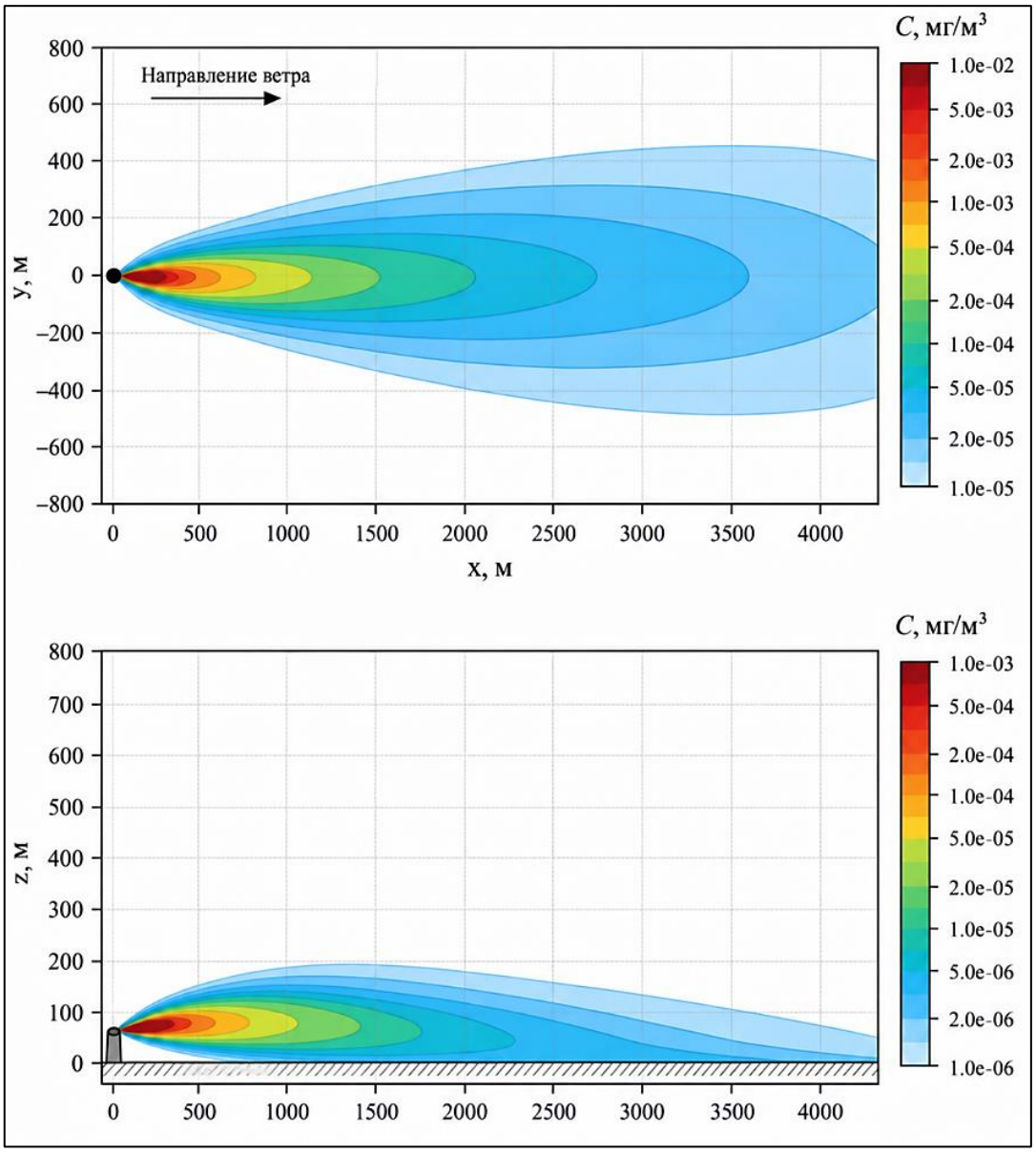


Рисунок 15. - Пространственное распределение расчётных концентраций загрязняющих веществ в виде изолиний

Результаты математического моделирования могут представляться в виде изолиний концентраций, отражающих пространственное распределение примесей по направлению ветра и в поперечной плоскости. Подобная визуализация позволяет определять зоны расчётного вклада и изменение концентраций с удалением от источника (рис. 15).

Последовательность расчёта включает задание исходных характеристик источника, определение метеорологических условий, расчёт параметров атмосферного рассеивания и получение концентраций в заданных точках пространства. На первом этапе устанавливаются координаты источника, его геометрические параметры, массовая интенсивность выброса и эффективная высота. Далее учитываются скорость и направление ветра, класс устойчивости атмосферы и параметры горизонтального и вертикального рассеивания σy и σz. На основе полученных данных формируется расчётное поле концентраций. Основные входные и выходные параметры модели представлены на рис. 16.

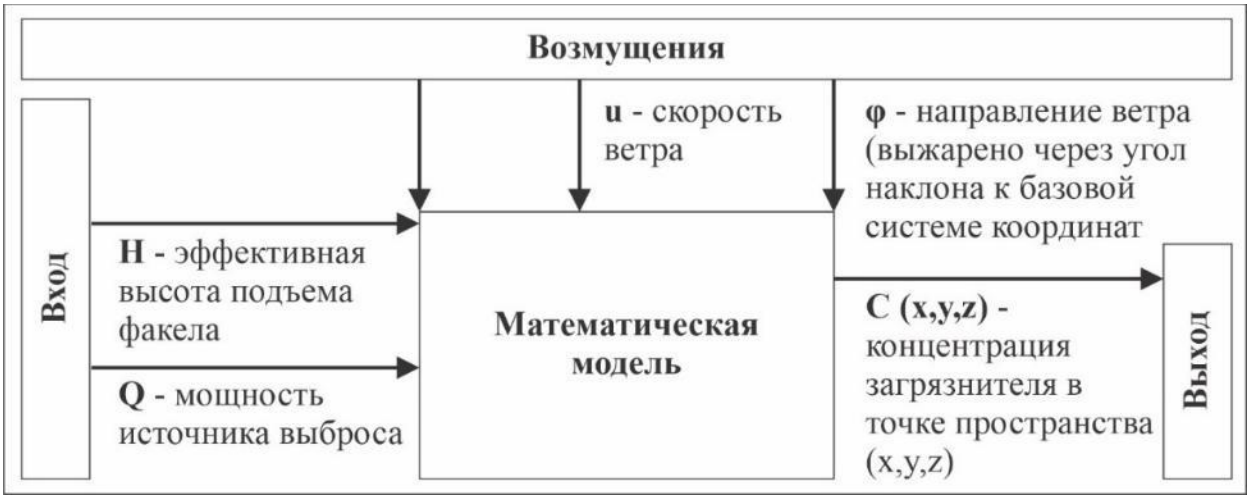


Рисунок 16. - Основные входные и выходные параметры гауссовой модели рассеивания загрязняющих веществ

В рассматриваемой стационарной модели начало координат располагается у основания источника, ось OX направлена по ветру, OY - перпендикулярно направлению переноса, OZ - вертикально вверх. Распределение концентрации загрязняющего вещества определяется гауссовой моделью рассеивания (формула 1):

$$C\,(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y\,(x)\sigma_z(x)}\; exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)}\right) \times \left[exp\;\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) + exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right)\right] \qquad (1)$$

где C(x,y,z) - расчётная концентрация загрязняющего вещества; Q - массовая интенсивность выброса, г/с; u - скорость ветра, м/с; σy и σz - параметры горизонтального и вертикального рассеивания, м; H - эффективная высота источника, м; x, y, z - координаты расчётной точки. При использовании Q в г/с концентрация первоначально определяется в г/м³ с последующим пересчётом в мкг/м³.

Для практического применения модели рассмотрен организованный источник ООО «Джавони», расположенный в северо-восточной промышленной зоне Худжанда. Использованы документированные характеристики источника № 0026: высота дымовой трубы 48 м, диаметр устья 0,830 м, скорость выхода газов 7 м/с и массовая интенсивность выброса компонента «сажа» после очистки Q = 3,924 г/с. Расчётная эффективная высота источника составляет 53,27 м.

Для сценарной оценки мелкодисперсной составляющей принят коэффициент K=0,40, характеризующий долю PM2,5 в составе твёрдой примеси. Соответственно, расчётная интенсивность выброса составляет 1,5696 г/с. Указанный коэффициент является модельным допущением и не рассматривается как экспериментально установленная доля PM2,5 в выбросе предприятия.

На рис. 17 представлены расчётные профили распространения твёрдой примеси и её условной мелкодисперсной составляющей. Максимальный приземный вклад формируется на расстоянии около 626 м от источника по направлению ветра. Расчётный максимум составляет около 75 мкг/м³, а её условной фракции PM2,5 - около 30 мкг/м³. Полученные результаты демонстрируют возможности модели для выявления зон потенциального загрязнения.

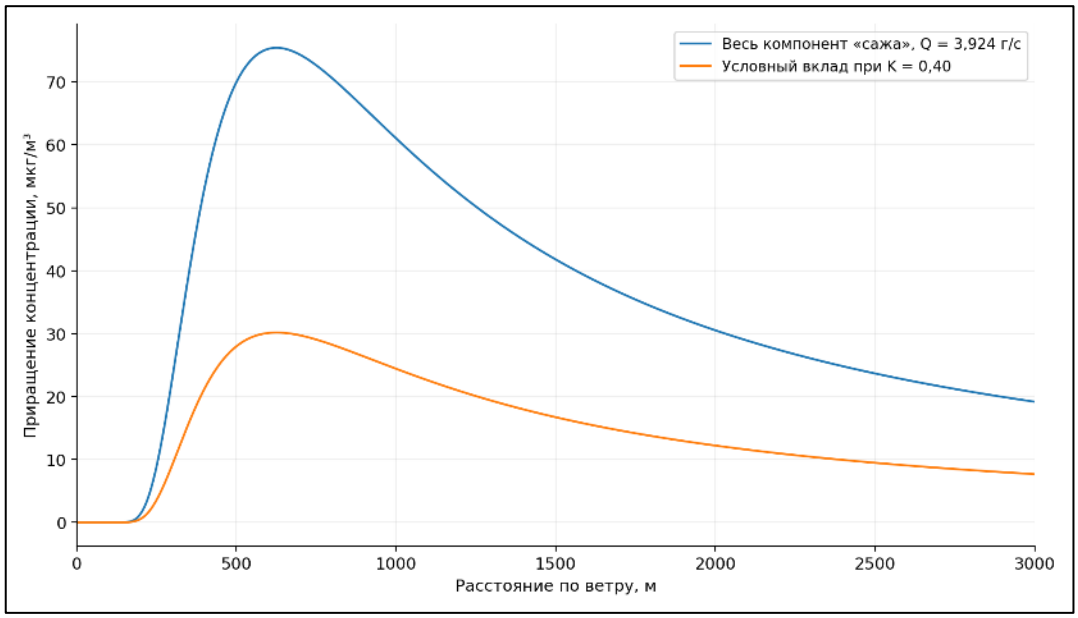


Рисунок 17 – Расчётные профили приземных концентраций твёрдой примеси и её условной фракции PM2,5 от источника ООО «Джавони»

В рамках представленного в диссертации предварительного сопоставления расчётных и контрольных концентраций PM2,5 на расстояниях 100, 500 и 1000 м относительные отклонения составили соответственно 14,44%, 15,99% и 14,14%, находясь в пределах принятого диапазона 12–18%. Вместе с тем достоверность оценки зависит от полноты характеристик источника, учёта фонового загрязнения, метеорологических условий и сопоставимости контрольных измерений. Поэтому результаты рассматриваются как предварительная оценка применимости модели, требующая дальнейшего уточнения и расширения экспериментальной проверки.

Таким образом, результаты четвёртой главы демонстрируют возможности совместного применения автоматизированного мониторинга, статистического анализа и математического моделирования для оценки пространственно-временной изменчивости PM2,5, выявления потенциальных зон повышенного загрязнения и разработки прогнозных сценариев применительно к условиям г. Худжанд.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что качество атмосферного воздуха г. Худжанд формируется под совместным воздействием природно-климатических, топографических и антропогенных факторов. Систематизированы пять основных групп источников загрязнения: стационарные, мобильные, площадные, бытовые и природные. Выявлено значение долинного рельефа, температурного и ветрового режимов, атмосферных осадков, городской застройки и регионального переноса аэрозолей для процессов накопления и рассеивания загрязняющих веществ [2-А, 5-А, 10-А, 11-А].

2. Обоснован комплексный подход к оценке качества воздуха, объединяющий автоматизированный мониторинг, метеорологические наблюдения, статистический анализ и математическое моделирование. Организована сеть из четырёх пунктов с сенсорами Plantower PMS5003 и датчиками BME280, обеспечивающими регистрацию шести параметров с интервалом пять минут. Расчётный объём массива за 2019–2023

годы составил 735 840 почасовых и 30 660 среднесуточных значений. Основным показателем углублённого анализа выбран PM2.5 [3-А, 6-А, 13-А, 14-А].

3. Выявлена выраженная межгодовая, сезонная и суточная изменчивость PM2,5. Среднегодовые концентрации на пункте «19-й микрорайон» за 2019–2023 годы составили соответственно 53,5; 51,6; 57,7; 51,5 и 57,3 мкг/м³, значительно превышая рекомендуемый ВОЗ уровень 5 мкг/м³. Средние зимние концентрации (100,9 мкг/м³) превышали летние (25,0 мкг/м³) приблизительно в 4,05 раза. Доля наблюдений выше 35 мкг/м³ составляла 49,9–53,4% в зависимости от года и охвата сети [11-А, 13-А, 14-А, 19-А].

4. Корреляционно-регрессионный анализ выявил сильную отрицательную связь PM2,5 с температурой воздуха ($r = -0{,}903$; $R^2 = 0{,}815$) и положительную связь с относительной влажностью ($r = +0{,}823$; $R^2 = 0{,}677$) по среднемесячным данным 2022 года. При совместном учёте этих параметров получено $R^2 = 0{,}822$. Установлено также значение осадков и ветрового режима для переноса и рассеивания аэрозолей, что обосновывает необходимость комплексного учёта метеорологических условий при оценке загрязнения [6-А, 7-А, 15-А].

5. Проведена сравнительная оценка основных источников загрязнения Худжанда с учётом статистических данных о выбросах, пространственного размещения и результатов мониторинга. Выявлена потенциальная нагрузка от промышленности, автотранспорта, строительства и бытового отопления, дополняемая природными пылевыми процессами. Установлена необходимость приоритетного контроля PM2,5 в холодный период и учёта совокупного воздействия источников при разработке природоохранных мероприятий [3-А, 6-А, 9-А, 15-А].

6. Адаптирована математическая модель рассеивания загрязняющих веществ с учётом характеристик источника и метеорологических условий. На примере ООО «Джавони» выполнено сценарное моделирование, определена зона максимального расчётного вклада на расстоянии около 626 м и исследована зависимость концентраций от скорости ветра. В представленном сопоставлении трёх контрольных точек отклонения составили 14,14–15,99%, находясь в принятом диапазоне 12–18%. Показана возможность применения моделирования совместно с мониторингом для предварительной экологической оценки и разработки прогнозных сценариев [6-А, 9-А, 20-А].

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Уполномоченным органам в области охраны окружающей среды, гидрометеорологии и местным органам власти рекомендуется совершенствовать мониторинг атмосферного воздуха путём интеграции государственных наблюдений, автоматизированных сенсорных сетей и математического моделирования. Приоритетное расширение пунктов измерения PM1,0, PM2,5 и PM10 целесообразно предусматривать в промышленных зонах, вдоль

транспортных коридоров, в жилых районах и вблизи социальных объектов.

Комитету охраны окружающей среды и Агентству по гидрометеорологии рекомендуется развивать процедуры калибровки недорогих сенсоров, сопоставления их показаний с референтными приборами и контроля качества данных. С учётом принятия Экологического кодекса Республики Таджикистан целесообразно совершенствовать методическое обеспечение мониторинга PM2,5 и PM10, цифровую обработку данных и открытый доступ к экологической информации.

При разработке городских природоохранных программ и планировании инфраструктуры Худжанда рекомендуется учитывать высокие концентрации PM2,5 в холодный период, отопительную и транспортную нагрузку, метеорологические условия и размещение источников выбросов. Для предварительной оценки загрязнения целесообразно совместно использовать данные ПДВ, отчётность 2-ТП (воздух), результаты сенсорного мониторинга и расчётного моделирования.

Природоохранным организациям и научно-исследовательским учреждениям рекомендуется учитывать потенциальное воздействие аэрозольного загрязнения на зелёные насаждения, городские почвы, рекреационные территории и прибрежные экосистемы Сырдарьи. Перспективными направлениями являются исследование атмосферных выпадений, осаждения частиц на растительности и применение методов биоиндикации в зонах повышенной антропогенной нагрузки.

Результаты исследования рекомендуется использовать в деятельности природоохранных, гидрометеорологических и санитарно-эпидемиологических служб, территориальном планировании и образовательном процессе вузов. Дальнейшие исследования целесообразно направить на расширение сети наблюдений, изучение химического состава и источников PM2,5, совершенствование математических моделей, применение геоинформационных технологий и методов машинного обучения для оценки и прогнозирования загрязнения атмосферного воздуха.

Список литературы

1. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 560 с.
2. Финаев А.Ф. Потенциал загрязнения атмосферы Таджикистана по сочетанию метеорологических факторов // Известия АН Республики Таджикистан. Отделение наук о Земле. – 1994. – № 1.
3. Четвертое национальное сообщение Республики Таджикистан по Рамочной конвенции ООН об изменении климата. – Душанбе, 2022. – 232 с.

4. Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Назаров Б.И., Мадвалиев У., Давлатшоев Т. Содержание элементов в пробах почв и пылевого аэрозоля в Таджикистане // Оптика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 28. – № 2. – С. 143–152.
5. Абдуллозода С.Ф., Маслов В.А., Абдуллоева С.Д. Среднесуточные вариации массовой концентрации частиц PM2,5 в атмосфере города Душанбе за период 2014–2024 гг. // Вестник филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. Серия естественных наук. – 2024. – Т. 1. – № 4 (43). – С. 34–41.
6. Назаров Б.И., Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А. Атмосферный аэрозоль Центральной Азии. – Душанбе : Дониш, 2017. – 416 с.
7. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2,5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. – Geneva: WHO, 2021. – URL: https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228 (дата обращения: 05.06.2023).
8. Бобоев Х.Б., Шоев С.С. Оценка уровня загрязненности атмосферного воздуха на примере г. Душанбе // Политехнический вестник. Серия «Техника и общество». – 2023. – № 4 (4). – С. 11–15.
9. Каримов С.М., Шоев С.С., Гулахмадов Х.Ш., Бобоев Х.Б. Определение приоритетных загрязняющих веществ, подлежащих контролю в приземном слое атмосферного воздуха на территории г. Душанбе // Вестник филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. Серия естественных наук. – 2023. – Т. 1. – № 2 (31). – С. 96–106.
10. Обзор системы мониторинга атмосферного воздуха в Республике Таджикистан: отчет. – Душанбе: ОО «Молодежная группа по защите окружающей среды», 2024. – 49 с.
11. He M., Kuerbanjiang N., Dhaniyala S. Performance characteristics of the low-cost Plantower PMS optical sensor // Aerosol Science and Technology. – 2020. – Vol. 54, № 2. – P. 232–241. – DOI: 10.1080/02786826.2019.1696015.
12. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнений атмосферы. – Ленинград : Гидрометеоиздат, 1985. – 272 с.
13. Национальная стратегия развития Республики Таджикистан на период до 2030 года. – Душанбе, 2016. – URL: https://www.medt.tj/documents/main/strategic_national_programm/strategic_national_prog_ru.pdf (дата обращения: 21.09.2026).
14. Постановление Правительства Республики Таджикистан от 1 марта 2023 года № 53 «О Государственной экологической программе Республики Таджикистан на 2023–2028 годы». – URL: https://mmih.adlia.tj/SEARCH/DocumentView?DocumentId=144605 (дата обращения: 21.09.2026).
15. Национальная стратегия адаптации к изменению климата Республики Таджикистан на период до 2030 года. – Душанбе, 2019.

16. Программа социально-экономического развития г. Худжанда на 2026–2030 годы. – Худжанд, 2025. – Утверждена решением Маджлиса народных депутатов г. Худжанда от 26 декабря 2025 г. № 74.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включённых в Перечень рецензируемых научных журналов, рекомендуемых ВАК при Президенте Республики Таджикистан:

[1-А]. **Мамадов И.А.** Влияние антропогенных факторов на опустынивание земель / Р.О. Азизов, И.А. Мамадов // Научно-практический журнал «Водные ресурсы, энергетика и экология» Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана. – Душанбе, 2022. – Т. 2. – С. 100–106.

[2-А]. **Мамадов И.А.** Влияние температурной инверсии на уровень загрязнения атмосферного воздуха / И.А. Мамадов // Научно-технический и производственный журнал «Горный вестник Узбекистана». – 2023. – № 1/92. – DOI: 10.54073/GV.2022.1.92.025. – УДК 621.035. – С. 112–115.

[3-А]. **Мамадов И.А.** Применение автоматизированных систем мониторинга качества воздуха / Р.О. Азизов, И.А. Мамадов // Научно-практический журнал «Водные ресурсы, энергетика и экология» Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана. – Душанбе, 2024. – № 4 (1). – С. 182–189.

[4-А]. **Мамадов И.А.** Особенности управления развитием зеленой экономики: теоретические аспекты / К.О. Темиров, И.А. Мамадов // Вестник Таджикского государственного университета права, бизнеса и политики. Серия общественных наук. – 2025. – № 2 (103). – УДК 330. – DOI: 10.24412/3005-8023-2025-2-85-96. – С. 85–96.

[5-А]. **Мамадов И.А.** Качество воздуха как макроэкономический риск: оценки потерь и стратегия снижения ущерба в Республике Таджикистан / И.А. Мамадов // Наука и инновация. Серия геологических и технических наук. Таджикский национальный университет. – 2026. – № 2. – УДК 504.5:628.5:711.4. – С. 105–112. – ISSN 2664-1534.

[6-А]. **Мамадов И.А.** Математическое моделирование процесса загрязнения атмосферного воздуха / Р.О. Азизов, И.А. Мамадов // Политехнический вестник. Серия «Техника и общество». – 2026. – № 1 (13). – DOI: 10.65599/TS1285. – УДК 504.3.054:519.87. – С. 24–30.

[7-А]. **Мамадов И.А.** Правовые механизмы реализации Орхусской конвенции в системе экологического управления государств Центральной Азии по итогам Женевских совещаний 2025 года / И.А. Мамадов, Р.О. Азизов, К.О. Темиров, Х.Ф. Алимов, М.Б. Якубов // Государственное управление. Научно-политический журнал Академии государственного управления при Президенте Республики Таджикистан. – 2026. – № 4 (79). – УДК 349.6:341.24:342.7(575). – С. 58–72. – ISSN 2664-0651. – ISSN 2709-8567.

Публикации в материалах конференций и других научных изданиях:

[8-А]. Мамадов И.А. Развитие промышленности в контексте «зеленой экономики» / И.А. Мамадов // Маводҳои Форуми саноатӣ таҳти унвони «Қадамҳои устувор баҳри

рушди саноати миллӣ», бахшида ба 15-умин солгарди таъсисёбии Донишкадаи кӯҳию металлургии Тоҷикистон, Бустон, 24 апреля 2021 г. – Бустон, 2021. – С. 209–211.

[9-А]. Мамадов И.А. Цифровизация как основа эколого-экономического развития / И.А. Мамадов // Проблемы становления цифровой металлургии и машиностроения в Республике Таджикистан : материалы Республиканской научно-практической конференции, посвященной Дню национального единства, Бустон, 24 июня 2021 г. – Бустон, 2021. – С. 93–96.

[10-А]. Мамадов И.А. Качество атмосферного воздуха как один из факторов изменения климата / Р.О. Азизов, И.А. Мамадов, Д.Д. Ходжибаев // Проблемы природопользования, устойчивого развития и техногенной безопасности регионов : материалы IX Международной научно-практической конференции, Институт проблем природопользования и экологии НАН Украины, Днепр, 6–7 октября 2021 г. – Днепр, 2021. – С. 14–18.

[11-А]. **Мамадов И.А.** Влияние качества атмосферного воздуха на изменения климата региона / Р.О. Азизов, И.А. Мамадов, Д.Д. Ходжибаев // Современные инженерно-технические проблемы Таджикистана : материалы научно-практической конференции, посвященной 30-летию Государственной независимости Республики Таджикистан. – Душанбе : Инженерная академия РТ, 2021. – С. 15–20.

[12-А]. Мамадов И.А. Важность определения экономической ценности экосистем водно-болотных угодий в контексте управления водными ресурсами и адаптации к изменению климата / Р.О. Азизов, А.К. Абдувалиев, И.А. Мамадов, Г.Н. Каримов, С.З. Шарафутдиннов // Использование природных ресурсов, экология и устойчивое развитие : материалы международной научно-практической конференции в рамках Международного десятилетия действий «Вода для устойчивого развития» 2018–2028 гг., Бустон, 24 сентября 2022 г. – Бустон, 2022. – С. 74–81.

[13-А]. Мамадов И.А. Изменения климата как один из факторов возникновения пыльных бурь / Р.О. Азизов, И.А. Мамадов, А.К. Абдувалиев // Материалы Международной научно-практической конференции «Водная безопасность – основа устойчивого развития». Водные ресурсы, энергетика и экология. Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАНТ. – Душанбе, 5–6 октября 2022 г. – № 2 (3). – С. 124–129. – ISSN 2789-0953.

[14-А]. **Mamadov I.** Pollution and risks in Pamiro-Tienshen burial grounds of uranium and obsolete pesticides / I. Hadjamberdiev, I. Domulajanov, I. Mamadov // RT&A. Reliability: Theory & Applications. – 2022. – Special Issue № 4 (70). – Vol. 17. – November 2022. – ISSN 1932-2321. – 4 p.

[15-А]. **Мамадов И.А.** Мониторинг качества подземных вод прилегающих территорий Дигмайского хвостохранилища / Д.Д. Ходжибаев, З.А. Разыков, И.А. Мамадов // Горный вестник Узбекистана. – 2024. – № 2 (97). – DOI: 10.54073/GV.2024.2.97.0. – С. 101–103. – ISSN 2181-7383.

[16-А]. Мамадов И.А. Влияние антропогенной деятельности на экосистему в контексте климатических изменений и устойчивого развития / Р.О. Азизов, И.А. Мамадов, Н. Васиредди // Последствия изменения климата и его влияние на производство и

переработку сельскохозяйственной продукции: от науки к практике : материалы Международной научно-практической конференции, посвященной объявлению 2025 года Международным годом ледников. – Худжанд, 2025. – С. 85–89.

[17-А]. Мамадов И.А. Роль международных и общественных институтов в продвижении национальной политики Республики Таджикистан по повышению экологической просвещенности населения в аспекте радиационной безопасности / З.А. Разыков, И.А. Мамадов, И.Х. Закиров // Инновационные технологии добычи и переработки полезных ископаемых-II : материалы Международной научно-практической конференции, посвященной объявлению 2022–2026 годов «Годами развития промышленности» и 2020–2040 годов – «Двадцатилетием изучения и развития естественных, точных наук и математики в сфере науки и образования», Бустон, 16 мая 2025 г. – Бустон, 2025. – С. 50–53.

[18-А]. Мамадов И.А. Экологическое образование и молодежные инициативы как инструмент сохранения биоразнообразия: опыт эко-клуба ГМИТ и YGPE / Д.Д. Ходжибаев, З.А. Разыков, М.Э. Назарова, И.А. Мамадов // Материалы международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы сохранения биоразнообразия Центральной Азии», Алматы, Казахстан, 6–8 ноября 2025 г. – Алматы : КазНУ им. аль-Фараби, 2025. – ISBN 978-601-311-462-0. – 6 с.

[19-А]. **Mamadov I.** Imagine Two Scenarios: The Urgent Need for Equitable, Accessible Air Quality Data Management / Kh. Alimov, G.B. Baterina, R. Biggs, C. Bontia, S. Carbone, J. DeWinter, S. Diez, S. Elkotbeid, D. Espita-Casanova, E. Friedman, E. Gayle Tamayo, Ch. Hagerbaumer, I. Mamadov, B. Martinez, G. Opondo, N. Pavlovic, M. Tejada // Environment: Science and Policy for Sustainable Development. – 2026. – Vol. 68. – № 1. – DOI: 10.1080/00139157.2025.2575745. – ISSN 0013-9157. – P. 8–13. – ISSN 1939-9154.

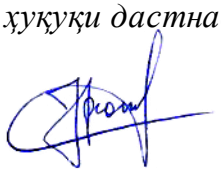
[20-А]. **Мамадов И.А.** Климат Центральной Азии: пыль, жара и цена бездействия / Чанг, жазирама ва бепарволик оқибати / И.А. Мамадов // Социально-политический, научно-культурный журнал «Ватан». – 2024. – № 4 (8). – С. 40–45. – ISSN 3030-3583.

ВАЗОРАТИ САНОАТ ВА ТЕХНОЛОГИЯҲОИ НАВИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН

Донишкадаи кӯҳию металлургии Тоҷикистон

ТДУ:502.3:504.3.054:551.5(575.3)

Бо ҳуқуқи дастнавис



МАМАДОВ ИКРОМЖОН АҲМАДАЛИЕВИЧ

АРЗЁБӢ ВА ПЕШГӮИИ ВАЗЪИ СИФАТИ ҲАВОИ АТМОСФЕРАИ ШАҲРИ ХУҶАНД

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т И

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

Душанбе – 2026

Кори илмӣ дар озмоишгоҳи кафедраи «Экология»-и факултети зеҳни сунъӣ ва технологияҳои нави Донишкадаи кӯҳию металлургии Тоҷикистон (ДКМТ) иҷро шудааст.

Роҳбари илмӣ: **Азизов Рустам Очилдиевич** - доктори илмҳои техникӣ, профессор, академики Академияи муҳандисии Ҷумҳурии Тоҷикистон, мудири шуъбаи Маркази рушди инноватсионии илм ва технологияҳои рақамии АМИТ

Муқарризони расмӣ: **Абдуллозода Сабур Фузайл** – доктори илмҳои физикаю математика, профессор, мудири лабораторияи физикаи атмосфераи Институти физикаю техникаи ба номи С.У. Умарови Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон.

Мирзохонзода Ситора Олтибой – номзади илмҳои техникӣ, дотсенти кафедраи метеорология ва климатологияи факултети физикаи Донишгоҳи миллии Тоҷикистон.

Муассисаи пешбар: Институти масъалаҳои об, гидроэнергетика ва экологияи Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон

Ҳимояи диссертатсия «29» декабри соли 2026, соати 16:30 дар ҷаласаи шурои диссертатсионии 6D.КОА-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 расмии Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ http://www.ttu.tj шинос шудан мумкин аст.

Автореферат санаи «____» _____ соли 2026 ирсол карда шуд.

Котиби илмии шӯрои диссертатсионӣ, номзади илмҳои техникӣ **Ҳ.Б. Бобоев**

МУҚАДДИМА

Мубрамии мавзӯи таҳқиқот. Ифлосшавии ҳавои атмосфера яке аз масъалаҳои муҳимтарини экологии ҳудудҳои шаҳрнишин боқӣ монда, ба саломатии аҳолӣ, экосистемаҳои маҳаллӣ ва рушди устувори шаҳрҳо таҳдид мекунад. Зарраҳои майдадисперсии PM2,5 махсусан хатарнок буда, метавонанд ба қисмҳои амиқи роҳҳои нафас ворид шаванд ва ҳангоми таъсири тӯлонӣ хатари бемориҳои дилу раг ва роҳҳои нафасро зиёд намоянд [7].

Таъсири ифлосшавии ҳавои атмосфера танҳо бо саломатии инсон маҳдуд намешавад. Зарраҳои муаллақи аз манбаъҳои саноатӣ, нақлиётӣ, маишӣ ва табиӣ ҳосилшуда тавассути ҷараёнҳои ҳаво интиқол ёфта, ба хок, растаниҳо ва объектҳои обӣ таҳшин мешаванд. Вобаста ба таркиб ва шиддати таҳшиншавӣ онҳо метавонанд ба растаниҳо, равандҳои хокӣ ва экосистемаҳои обӣ таъсири манфӣ расонанд. Барои шаҳри Хуҷанд, ки минтақаҳои саноатӣ, истиқоматӣ ва сабзазорро дар бар мегирад, мониторинги PM2,5 барои арзёбии сифати ҳаво ва сарбории эҳтимолии экологӣ ба муҳити зист аҳамият дорад.

Сатҳи ифлосшавии ҳавои атмосфера дар натиҷаи ҳамтаъсирии манбаъҳои антропогении партовҳо ва омилҳои табиӣ-иқлимӣ муайян мегардад. Ба равандҳои ҷамъшавӣ, интиқол ва паҳншавии моддаҳои ифлоскунанда ҳарорати ҳаво, намии нисбӣ, фишори атмосфера, суръат ва самти шамол, шиддати боришот, устувории атмосфера, хусусиятҳои биносозии шаҳр, сарбории нақлиётӣ ва фаъолияти саноатӣ таъсир мерасонанд.

Дар Тоҷикистон мониторинги зарраҳои майдадисперсӣ бинобар релефи кӯҳию водигӣ, иқлими континенталӣ ва зичии нокифояи шабакаи мавҷудаи мушоҳида аҳамияти махсус дорад. Дар Хуҷанд ба сифати ҳаво нақлиёт, саноат, рушди инфрасохтори шаҳрӣ ва тағйирёбии мавсимии шароити метеорологӣ таъсир мерасонанд. Аз ин рӯ, арзёбии маҷмӯӣ ба ҳисоб гирифтани консентратсияҳои воқеии моддаҳои ифлоскунанда, манбаъҳои партов, шароити ҷамъшавӣ ва паҳншавии онҳоро талаб мекунад.

Мубрамии таҳқиқот бо рушди иҷтимоию иқтисодии шаҳр афзоиш меёбад. Тибқи Барномаи рушди иҷтимоию иқтисодии ш. Хуҷанд барои солҳои 2026–2030, ҳаҷми истеҳсоли маҳсулоти саноатӣ аз 1,5 млрд сомонӣ дар соли 2021 то 2,1 млрд сомонӣ дар соли 2025 (40%) зиёд гардид. Дар ҳамин давра ҳамлу нақли мусофирон 1,5 маротиба ва ҳамлу нақли бор 2,3 маротиба афзуд. Ин ҳолат зарурати арзёбии миқдории сарборӣ эҳтимолии антропогениро дар асоси маълумоти мониторинг ва инвентаризатсияи партовҳо муайян мекунад [16].

Тағйирёбии шароити иқлимӣ низ аҳамияти иловагӣ дорад. Баландшавии ҳарорат, зиёдшавии даврaҳои гармӣ, тағйир ёфтани реҷаи боришот ва афзоиши хатари ҳодисаҳои чангу ғубор, ки дар Барномаи рушди шаҳр зикр шудаанд, метавонанд пайдоиши такрории чангро пурзӯр намуда, ба ҷамъшавӣ ва паҳншавии моддаҳои ифлоскунанда таъсир расонанд. Аз ин рӯ, таҳлили муштараки шароити метеорологӣ ва манбаъҳои табиию антропогенӣ зарур аст [16].

Дараҷаи коркарди илмии мавзуи таҳқиқот. Масъалаи ташаккули сифати ҳавои атмосфераи ҳудудҳои шаҳрӣ аз самтҳои мубрами таҳқиқот дар экология, физикаи атмосфера, метеорология, мониторинги экологӣ ва амсиласозии математикӣ ба ҳисоб меравад. Асосҳои назариявию методии мониторинги экологии муҳити зист дар осори Ю.А. Израэл [1] ташаккул ёфтаанд; ҳолати муосир ва маҳдудиятҳои низоми мониторинги ҳавои ҶТ дар таҳқиқоти таҳлилии соҳавӣ баррасӣ шудаанд [10].

Қонуниятҳои таъсири омилҳои метеорологӣ ба равандҳои ҷамъшавӣ, интиқол ва паҳншавии моддаҳои ифлоскунанда дар атмосфера дар кори А.Ф. Финаев [2] таҳқиқ гардидаанд; хусусиятҳои иқлимӣ ва тағйирёбии шароити қаламрави Тоҷикистон дар маводи миллии марбут ба тағйирёбии иқлим [3, 15] инъикос ёфтаанд.

Масъалаҳои ташаккули аэрозоли атмосферӣ, воридшавии чангу ғубор ва тақсимоти консентратсияи PM2,5 дар ҳудуди Ҷумҳурии Тоҷикистон дар корҳои С.Ф. Абдуллаев, С.Ф. Абдуллозода, В.А. Маслов, Б.И. Назаров ва ҳаммуаллифон [4–6] баррасӣ шудаанд. Таҳқиқи ифлосшавии антропогении атмосфераи шаҳр, инчунин таъсири манбаъҳои статсионарӣ ва сайёри партовҳо дар корҳои Х.Б. Бобоев, С.М. Каримов, С.С. Шоев, Х.Ш. Гулахмадов ва ҳаммуаллифон [8, 9] инъикос ёфтааст.

Ҷанбаҳои методии истифодаи сенсорҳои оптикии камхарҷ барои мониторинги экологӣ дар таҳқиқоти муосир [11] пешниҳод шудаанд. Асосҳои амсиласозии математикии паҳншавии моддаҳои ифлоскунанда дар асарҳои М.Е. Берлянд [12] баён гардидаанд. Тавсияҳои байналмилалӣ оид ба арзёбии ифлосшавии ҳаво бо зарраҳои майдадисперсӣ дар дастурамали Созмони ҷаҳонии тандурустӣ [7] оварда шудаанд.

Бо вуҷуди ҳаҷми назарраси таҳқиқот, барои ш. Хуҷанд таҳқиқоти маҷмӯии бисёрсола оид ба тағйирёбии фазоӣ-вақтии консентратсияи PM2,5, ки ба мушоҳидаҳои пайвастаи асбобӣ асос ёфта, таҳлили омилҳои метеорологию антропогенӣ, арзёбии манбаъҳои статсионарӣ, сайёр, масоҳатӣ ва табиии ифлосшавӣ ва амсиласозии паҳншавиро муттаҳид мекунанд, нокифоя пешниҳод шудаанд. Вобастагиҳои миқдории PM2,5 аз параметрҳои метеорологӣ, хусусиятҳои мавсимии ифлосшавӣ, нақши муқоисавии гурӯҳҳои асосии манбаъҳо ва имконияти ҳамгироии мониторинги автоматикунонидашуда бо ҳисоботи расмии партовҳо ва усулҳои таҳлилу амсиласозӣ нокифоя омӯхта шудаанд. Аз ин рӯ, зарурати асосноккунии илмии равиши маҷмӯии арзёбӣ ва пешгӯии сифати ҳавои атмосфераи Хуҷанд бо дарназардошти манбаъҳои ифлосшавӣ ва шароити паҳншавии онҳо боқӣ мемонад.

Дар айни замон имкониятҳои истифодаи маълумоти мониторинги бисёрсолаи PM2,5 барои арзёбии сарборияи эҳтимолии атмосферӣ ба ҳудудҳои таҳти таъсири антропогенӣ қарордошта, аз ҷумла минтақаҳои истиқоматӣ, сабзазорҳои шаҳрӣ ва объектҳои табиии ҳамшафат, ба қадри кофӣ кушода нашудаанд. Ин зарурати муайян намудани қонуниятҳои ташаккули ифлосшавии ҳавзаи ҳавоӣ ва шарҳи экологии натиҷаҳоро бо дарназардошти таъсири эҳтимолии моддаҳои ифлоскунанда ба ҷузъҳои муҳити зист муайян менамояд.

Алоқамандии таҳқиқот бо барномаҳо ва мавзуъҳои илмӣ. Кор мутобиқи самтҳои афзалиятноки сиёсати давлатии ҷумҳурӣ дар соҳаи амнияти экологӣ, ҳифзи ҳавои атмосфера ва рушди мониторинги экологӣ иҷро шудааст.

Мавзӯи таҳқиқот ба муқаррароти Стратегияи миллии рушди Ҷумҳурии Тоҷикистон то соли 2030, Барномаи давлатии экологии Ҷумҳурии Тоҷикистон барои солҳои 2023–2028, Стратегияи мутобиқшавӣ ба тағйирёбии иқлим ва дигар санадҳои меъёрии ҳуқуқӣ дар соҳаи ҳифзи муҳити зист мувофиқат мекунад [13–15].

Дар сатҳи шаҳр таҳқиқот бо афзалиятҳои Барномаи рушди ш. Хуҷанд барои солҳои 2026–2030 мувофиқ аст, ки рушди минбаъдаи саноат, инфрасохтори нақлиётӣ ва коммуналиро пешбинӣ намуда, ҳамзамон коҳиши ифлосшавии ҳаво, назорати партовҳо, идоракунии сарбории чангӣ ва баланд бардоштани устувории инфрасохтори шаҳр ба тағйирёбии иқлимро аз самтҳои мубрами рушд муайян мекунад [16].

Таҳқиқот ба ҳалли вазифаҳои илмӣ-амалӣ оид ба такмили усулҳои арзёбӣ ва пешгӯии сифати ҳавои ш. Хуҷанд, рушди мониторинги автоматикунонидашуда, таҳлили маълумоти экологӣ, низоммандсозии манбаъҳои асосии ифлосшавӣ ва арзёбии таъсири омилҳои табиӣ-иқлимӣ ва антропогенӣ ба ҷамъшавию паҳншавии моддаҳои ифлоскунанда равона шудааст.

Марҳилаҳои таҳқиқот дар ҳамкорӣ бо Маркази гидрометеорологии вилояти Суғди Кумитаи ҳифзи муҳити зисти назди Ҳукумати Ҷумҳурии Тоҷикистон ва Донишкадаи кӯҳию металлургии Тоҷикистон дар доираи мониторинги ҳавои атмосфера ва рушди усулҳои муосири мушоҳидаҳои экологӣ иҷро шудаанд.

ТАВСИФИ УМУМИИ ТАҲҚИҚОТ

Мақсади таҳқиқот. Асосноккунии илмии равиши маҷмӯӣ ба мониторинг, арзёбӣ ва пешгӯии сифати ҳавои атмосфераи шаҳри Хуҷанд дар асоси ченкуниҳои бисёрсолаи консентратсияи PM2,5, таҳлили омилҳои табиӣ-иқлимӣ ва антропогенӣ, коркарди оморӣ маълумот ва амсиласозии математикӣ.

Вазифаҳои таҳқиқот. Барои расидан ба мақсади гузошташуда вазифаҳои зерин ҳал карда шуданд:

1. Омӯхтани омилҳои табиӣ-иқлимӣ, топографӣ ва антропогенӣ, ки ташаккули муҳити ҳавоии шаҳри Хуҷандро муайян мекунанд.
2. Асоснок ва татбиқ намудани методикаи мониторинги автоматикунонидашудаи консентратсияи PM2,5 ва параметрҳои ҳамроҳи метеорологӣ дар асоси воситаҳои сенсории ченкунӣ.
3. Муайян намудани қонуниятҳои мавсимӣ, шабонарӯзӣ ва байнисолонаи тағйирёбии консентратсияи PM2,5 ва баҳодиҳии миқдории робитаи онҳо бо параметрҳои асосии метеорологӣ ва шароити ҷамъшавӣ ва паҳншавии омехтаҳо.
4. Низоммандсозӣ ва арзёбии муқоисавии манбаъҳои асосии статсионарӣ, сайёр, масоҳатӣ, маишӣ ва табиии ифлосшавии ҳавои атмосфераи ш. Хуҷанд дар асоси ҳисоботи расмӣ, мавод оид ба манбаъҳои партов ва натиҷаҳои мониторинг.
5. Мутобиқ ва барномавӣ амалӣ намудани равиши математикӣ ба амсиласозии паҳншавии PM2,5 аз манбаи интихобшудаи статсионарӣ барои шароити ш.Хуҷанд бо дарназардошти параметрҳои манбаъ ва шароити метеорологӣ ва муқоисаи натиҷаҳои ҳисобӣ бо маълумоти мушоҳидаҳои асбобӣ.
6. Таҳияи равиш ба пешгӯии сифати ҳавои атмосфера ва тавсияҳои илмӣ-амалӣ оид ба такмили мониторинг ва коҳиш додани ифлосшавии ҳавои атмосфераи ш. Хуҷанд.

Объекти таҳқиқот ҳавзаи ҳавоии шаҳри Хуҷанд дар шароити таъсири омилҳои табиӣ-иқлимӣ ва антропогенӣ мебошад

Мавзӯи (предмети) таҳқиқот тағйирёбии фазоӣ-вақтии консентратсияи заррaҳои майдадисперсии PM2,5, робитаи онҳо бо омилҳои табиӣ-иқлимӣ ва антропогенӣ, сохтори манбаъҳои ифлосшавӣ ва усулҳои мониторинги автоматикунонидашуда, арзёбӣ ва амсиласозии математикӣ барои пешгӯии сифати ҳавои атмосфераи шаҳри Хуҷанд мебошад.

Навгонии илмии таҳқиқот дар нуқтаҳои зерин ифода меёбанд:

1. Равиши маҷмӯии арзёбӣ ва пешгӯии сифати ҳавои атмосфераи ш. Хуҷанд асоснок карда шуд, ки маълумоти бисёрсолаи мониторинги автоматикунонидашудаи заррaҳои майдадисперсӣ, таҳлили омилҳои табиӣ-иқлимӣ ва антропогенӣ, маълумоти манбаъҳои ифлосшавӣ ва амсиласозии математикии паҳншавиро муттаҳид менамояд.

2. Вобастагиҳои миқдорӣ байни консентратсияи PM2,5 ва параметрҳои асосии метеорологии атмосфераи шаҳр, ки хусусиятҳои мавсимии ҷамъшавӣ ва паҳншавии ифлосшавии аэрозолиро муайян мекунанд, муқаррар шуданд.

3. Равиши арзёбии маҷмӯии тағйирёбии фазоӣ-вақтии сифати ҳаво дар асоси ҳамгироии маълумоти мониторинги автоматикунонидашуда, мушоҳидаҳои метеорологӣ ва таҳлили минтақаҳои функсионалӣ ва манбаъҳои ифлосшавии ш.Хуҷанд таҳия ва санҷида шуд.

4. Равиши математикӣ ба амсиласозии паҳншавии заррaҳои PM2,5 барои шароити табиӣ-иқлимии ш. Хуҷанд мутобиқ карда шуда, нақшаи амалисозии барномавии ҳисоби паҳншавии PM2,5 аз манбаи статсионарӣ бо дарназардошти параметрҳои воқеии он ва маълумоти метеорологӣ таҳия гардид. Муқоисаи маълумоти ҳисобӣ ва таҷрибавӣ мутобиқати қаноатбахши натиҷаҳоро ҳангоми хатои ҳисобии 12–18% нишон дод.

5. Манбаъҳои асосии статсионарӣ, сайёр, масоҳатӣ, маишӣ ва табиии ифлосшавии ҳавои атмосфераи ш. Хуҷанд низомманд карда шуда, равиши арзёбии муқоисавии онҳо бо дарназардошти маълумоти партовҳо, ҷойгиршавии фазоӣ, натиҷаҳои мониторинг ва шароити паҳншавии атмосферӣ пешниҳод гардид.

6. Нақшаи ҳамгирошудаи мониторинг, арзёбӣ ва пешгӯии сифати ҳавои ш. Хуҷанд пешниҳод гардид, ки ченкуниҳои сенсорӣ, мушоҳидаҳои метеорологӣ, маълумоти манбаъҳои партов, коркарди оморӣ ва амсиласозии математикиро муттаҳид менамояд.

Аҳамияти назариявӣ ва илмию амалии таҳқиқот. Аҳамияти назариявии таҳқиқот дар рушди тасаввурот оид ба қонуниятҳои ташаккул ва тағйирёбии ифлосшавии ҳавои ш. Хуҷанд бо дарназардошти таъсири муштараки омилҳои табиӣ-иқлимӣ ва антропогенӣ мебошад. Натиҷаҳо маълумоти илмиро дар бораи тағйирёбии мавсимӣ, шабонарӯзӣ ва байнисолонаи консентратсияи PM2,5, вобастагии он аз параметрҳои метеорологӣ ва хусусиятҳои ҷамъшавию паҳншавии моддаҳои ифлоскунанда, инчунин имкониятҳои ҳамгироии маълумоти мониторинг, манбаъҳои партовҳо ва амсиласозии ҳисобӣ васеъ менамоянд. Таҳқиқоти анҷомдода истифодаи маҷмӯии мониторинги сенсории автоматики, таҳлили оморӣ ва амсиласозии математикиро барои арзёбӣ ва пешгӯии сифати ҳавои шаҳрӣ асоснок мекунад.

Аҳамияти амалии таҳқиқот дар таъсис ва санҷиши шабакаи автоматикунонидашудаи мониторинги сифати ҳаво бо сенсорҳои оптикии Plantower PMS5003 ва датчикҳои метеорологии BME280 ифода меёбад, ки сабти пайвастаи консентратсияи PM1,0, PM2,5 ва PM10, ҳарорати ҳаво, намии нисбӣ ва фишори атмосфераро таъмин менамояд. Маҷмӯи маълумоти солҳои 2019–2023 барои таҳлили динамикаи ифлосшавии ҳавои атмосфера, арзёбии таъсири омилҳои метеорологӣ ва таъминоти иттилоотии фаъолияти ҳифзи муҳити зист истифода гардид. Ҳамгироии натиҷаҳои мониторинг бо маълумоти манбаъҳои партовҳо ва амсиласозии ҳисобӣ имкон медиҳад, ки минтақаҳои афзалиятноки назорат муайян карда шаванд, таъсири эҳтимолии манбаъҳои алоҳида арзёбӣ гардад ва сенарияҳои пешгӯӣ таҳия шаванд. Равиши пешниҳодшуда метавонад барои рушди низомҳои шаҳрии мониторинги экологӣ, таъминоти иттилоотии платформаҳои онлайн, харитасозии ифлосшавии ҳаво ва асоснок намудани тадбирҳои коҳиши хатарҳои экологӣ дар ш. Хуҷанд истифода шавад. Натиҷаҳои таҳқиқот барои хадамоти ҳифзи муҳити зист ва гидрометеорологӣ, мақомоти маҳаллии идоракунӣ, муассисаҳои илмӣ ва таълимӣ аҳамияти амалӣ доранд.

Нуктаҳои ба ҳимоя пешниҳодшаванда:

1. Усули таҳияшуда ва дар амал санҷидашудаи мониторинги тақсимшудаи автоматикунонидашудаи сифати ҳавои атмосферии ш. Хуҷанд дар асоси сенсорҳои оптикии Plantower PMS5003 ва датчикҳои метеорологии BME280, инчунин натиҷаҳои арзёбии маҷмӯии тағйирёбии фазоӣ-вақтии консентратсияҳои PM2,5 бо дарназардошти омилҳои табиӣ-иқлимӣ ва антропогенӣ.

2. Қонуниятҳо ва вобастагиҳои миқдории муайянгардида байни консентратсияҳои PM2,5 ва параметрҳои асосии метеорологии атмосфераи шаҳр, ки равандҳои ҷамъшавӣ ва паҳншавии моддаҳои ифлоскунандаро дар фаслҳои гуногуни сол тавсиф менамоянд, инчунин натиҷаҳои низоммандсозӣ ва арзёбии муқоисавии манбаъҳои асосии статсионарӣ, сайёр, масоҳатӣ, маишӣ ва табиии ифлосшавии ҳавои ш.Хуҷанд бо дарназардошти шароити паҳншавии моддаҳои ифлоскунанда аз ин манбаъҳо.

3. Равиши мутобиқшудаи математикӣ ва нақшаи амалисозии барномавии ҳисобкунии паҳншавии PM2,5 аз манбаи интихобшудаи статсионарӣ дар шароити ш. Хуҷанд, ки барои арзёбии фазоии ифлосшавӣ ва таҳияи сенарияҳои пешгӯӣ истифода мешаванд, инчунин тавсияҳои илмӣ-амалӣ оид ба такмили мониторинг, пешгӯӣ ва коҳиш додани ифлосшавии ҳавои атмосферӣ дар асоси ҳамгироии маълумоти мушоҳидаҳои асбобӣ ва амсиласозии математикӣ.

Дараҷаи эътимоднокии натиҷаҳо. Эътимоднокии муқаррароти илмӣ, хулосаҳо ва тавсияҳо тавассути усулҳои муосири мониторинги экологии ҳавои атмосфера, таҳлили маълумоти бисёрсолаи таҷрибавӣ барои солҳои 2019–2023, усулҳои омори математикӣ, аз ҷумла таҳлили корреляторсионию регрессионӣ, коркарди қаторҳои вақтӣ, маълумоти расмӣ оид ба партовҳо ва параметрҳои манбаъҳои собит, инчунин амсиласозии паҳншавии атмосферӣ таъмин мегардад. Асоснокии натиҷаҳо бо мувофиқати қонуниятҳои ошкоршуда, муқоисаи маълумоти ҳисобӣ ва асбобӣ ва мутобиқати онҳо ба тасаввуроти илмии муосир оид ба ташаккули ифлосшавии аэрозолии атмосфера тасдиқ мешавад.

Мутобиқати диссертатсия ба шиносномаи ихтисоси илмӣ. Кори диссертатсионӣ ба шиносномаи ихтисоси 2.9.6. Экология мутобиқи самтҳои зерини таҳқиқот мувофиқат мекунад:

– б. 2.3. Экологияи амалӣ – таҳияи принсипҳо ва тадбирҳои амалӣ, ки ба ҳифзи табиати зинда ҳам дар сатҳи намудӣ ва ҳам дар сатҳи экосистемавӣ равона шудаанд; таҳияи принсипҳои ташкили экосистемаҳои сунъӣ ва идоракунии фаъолияти онҳо. Таҳқиқи таъсири омилҳои антропогенӣ ба экосистемаҳои сатҳҳои гуногун бо мақсади таҳияи меъёрҳои аз ҷиҳати экологӣ асоснокшудаи таъсири сохтмон, фаъолияти хоҷагидории инсон ва истифодаи хоҷагии манзилию коммуналӣ ба табиати зинда;

– б. 3.2. Таҳқиқи ифлосшавии ҷузъҳои муҳити табиӣ аз ҷониби объектҳои нақлиётӣ ва воситаҳои техникии таъмини ҳамлу нақл бо мақсади таҳияи меъёрҳои аз ҷиҳати экологӣ асоснокшудаи таъсири фаъолияти нақлиётии инсон ба муҳити табиӣ;

– б. 4.6. Асосноккунии илмии принсипҳо ва таҳияи усулҳои пешгӯӣ, пешгирӣ ва бартараф намудани оқибатҳои ифлосшавии муҳити атроф.

Саҳми шахсии довталаби дараҷаи илмӣ дар таҳқиқот

Саҳми шахсии муаллиф аз интихоби самти таҳқиқот, муайян намудани мақсад ва вазифаҳо, таҳияи барномаи кор ва иштирок дар ҳамаи марҳилаҳои он иборат аст. Довталаб шабакаи автоматикунонидашудаи мониторинги ҳавои атмосфераро дар асоси датчикҳои Plantower PMS5003 ва BME280 ташкил намуда, ҷамъоварӣ, коркард ва таҳлили омории маълумоти солҳои 2019–2023-ро анҷом додааст. Омилҳои табиӣ-иқлимӣ ва антропогенӣ таҳқиқ, манбаъҳои асосии ифлосшавии ш. Хуҷанд низомманд ва усулҳои амсиласозии паҳншавии моддаҳои ифлоскунанда мутобиқ карда шуданд. Нақшаи амалисозии барномавии тамсила барои манбаи интихобшудаи статсионарӣ таҳия ва натиҷаҳои ҳисобӣ бо ченкуниҳои асбобӣ муқоиса гардиданд. Таҳлили адабиёти илмӣ анҷом дода, мақолаҳо, муқаррароти асосӣ, хулосаҳо ва тавсияҳои амалӣ омода шуданд. Графикҳо, ҷадвалҳо, харитаҳо ва тасвирҳои натиҷаҳо аз ҷониби довталаб дар асоси таҳқиқоти худ ва маводи расмӣ таҳия гардиданд.

Тасвиб ва амалисозии натиҷаҳои таҳқиқот. Муқаррароти асосӣ ва натиҷаҳои диссертатсия дар конференсияҳои байналмилалӣ ва ҷумҳуриявии илмию амалӣ, форумҳо ва чорабиниҳои коршиносӣ оид ба мониторинги экологӣ, сифати ҳавои атмосфера, рушди устувор ва амнияти экологӣ пешниҳод ва баррасӣ гардиданд.

Натиҷаҳои таҳқиқот дар IX конференсияи байналмилалии илмию амалии «Проблемы природопользования, устойчивого развития и техногенной безопасности регионов» (Днепр, 2021), конференсияи ҷумҳуриявии илмию амалии «Современные инженерно-технические проблемы Таджикистана» ба муносибати 30-солагии Истиқлоли давлатии Тоҷикистон (Душанбе, 2021), форуми байналмилалии TechCamp Bishkek «За чистый воздух в Центральной Азии» (Бишкек, 2022), конференсияи якуми осиёимиёнагии сифати ҳаво AQCA 2022 (Бишкек, 2022), конференсияи байналмилалии илмию амалии «Использование природных ресурсов, экология и устойчивое развитие» (Бӯстон, 2022), конференсияи байналмилалии илмию амалии «Водная безопасность - основа устойчивого развития» (Душанбе, 2022) ва конференсияи AQCA 2023 «Системные изменения для улучшения качества воздуха» (Остона, 2023) пешниҳод

гардиданд. Масъалаҳои алоҳидаи таҳқиқот дар доираи ташаббуси байналмилалии Community of Practice for Air Quality Systems (COMPASS) дар солҳои 2025–2026, инчунин мизи мудаввари байналмилалии «Deployment of Microsensors Around the World: From Local Solutions to Global Impact», ки 7 сентябри соли 2026 дар доираи чорабинии ҷамъбастии озмуни AIRLAB Microsensors Challenge 2025 (Париж, иштироки фосилавӣ) баргузор шуд, баррасӣ гардиданд.

Натиҷаҳои асосии таҳқиқот дар мақолаҳои илмии муаллиф инъикос гардида, барои таҳқиқоти минбаъда дар соҳаи мониторинги сифати ҳаво ва арзёбии экологии муҳити шаҳр замина гузоштанд.

Интишорот аз рӯйи мавзуи диссертатсия. Аз рӯйи мавзӯи диссертатсия 20 кори чопӣ, аз ҷумла 7 мақола дар нашрияҳои ба Феҳристи Комиссияи олии аттестатсионии назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон дохилшуда ва 13 мақола дар маводи конференсияҳои илмию амалӣ ба нашр расидаанд.

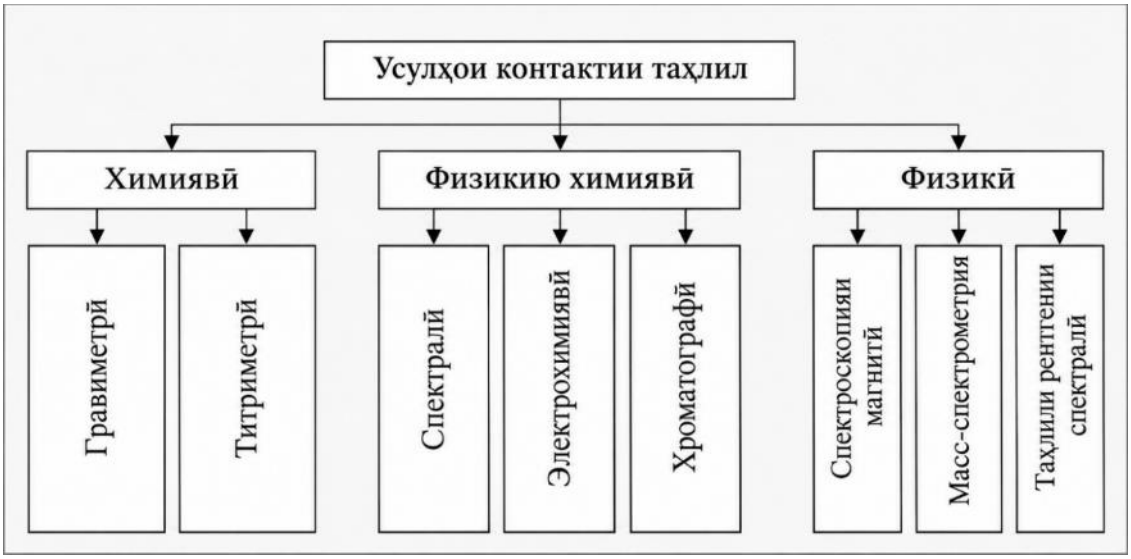
Сохтор ва ҳаҷми диссертатсия. Диссертатсия аз муқаддима, чор боб, хулосаҳои умумӣ, тавсияҳо оид ба истифодаи амалии натиҷаҳои таҳқиқот, рӯйхати адабиёти истифодашуда ва рӯйхати корҳои чопшуда аз рӯйи мавзӯи диссертатсия иборат аст. Ҳаҷми умумии кор 180 саҳифаро ташкил медиҳад. Диссертатсия 48 расм, 30 ҷадвал, рӯйхати адабиёт аз 156 номгӯй ва 20 кори чопшудаи муаллифро дар бар мегирад.

МАЗМУНИ АСОСИИ ДИССЕРТАТСИЯ

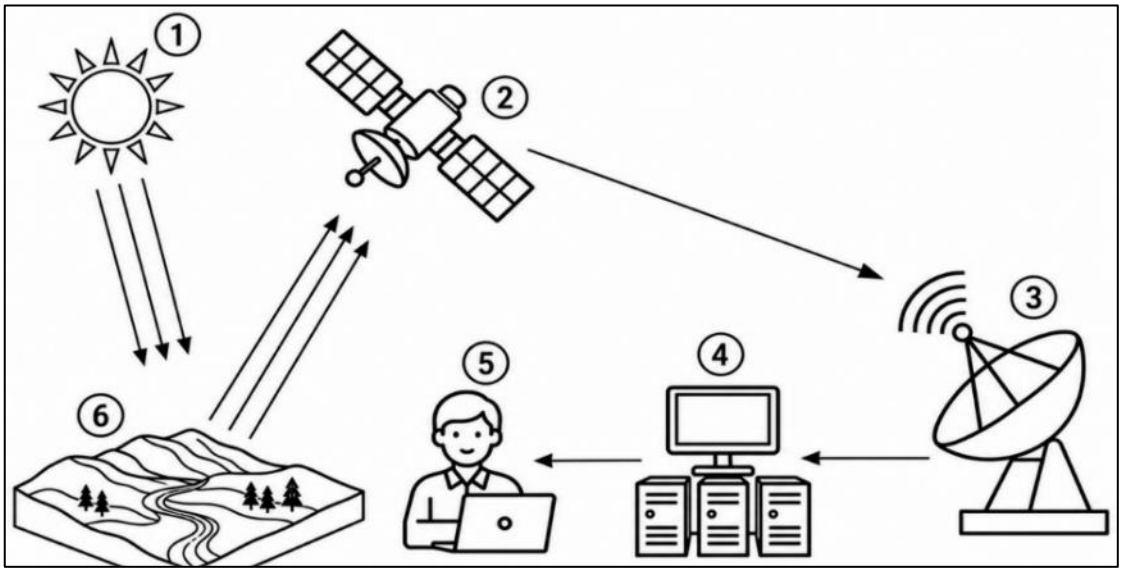
Боби якум ба шарҳи адабиёти илмӣ оид ба омилҳои ташаккул ва усулҳои арзёбии сифати ҳавои атмосфераи ш. Хуҷанд бахшида шудааст. Сарбории антропогенӣ, шароити иқлимӣ, низомҳои мониторинги экологӣ, инчунин таъсири ифлосшавӣ ба саломатии аҳолӣ, экосистемаҳо ва иқтисодиёт баррасӣ шудаанд. Дар асоси адабиёти илмӣ нишон дода шудааст, ки таҳшиншавии зарраҳои муаллақ дар рӯйи баргҳо метавонад мубодилаи газҳо ва фотосинтезро душвор гардонад, боришҳои атмосферии моддаҳои ифлоскунанда бошанд, ба хок ва объектҳои обӣ сарбории иловагӣ эҷод намоянд.

Тибқи маълумоти Барномаи рушди иҷтимоию иқтисодии ш. Хуҷанд барои солҳои 2026–2030, соли 2025 дар шаҳр 325 корхонаи саноатӣ фаъолият мекард. Дар солҳои 2021–2025 ҳаҷми истеҳсоли саноатӣ аз 1,5 то 2,1 млрд сомонӣ афзуда, ҳамлу нақли мусофирон 1,5 маротиба, боркашонӣ 2,3 маротиба ва сармоягузории асосӣ ба сохтмон 4,5 маротиба зиёд шудааст [16]. Манбаъҳои собит, сайёр, масоҳатӣ, маишӣ ва табиии ифлосшавӣ, аз ҷумла интиқоли эҳтимолии фаромарзии чанг баррасӣ гардидаанд. Таъсири релефи водигӣ, низомҳои ҳарорату шамол ва боришот ба ҷамъшавӣ ва паҳншавии омехтаҳои ифлоскунанда қайд шудааст.

Таҳлили низомҳои мониторинг маҳдуд будани фарогирии фазоии мушоҳидаҳои зарраҳои майдадисперсиро дар минтақаҳои гуногуни шаҳр нишон дод. Усулҳои тамосӣ (расми 1), фосилавӣ (расми 2) ва автоматикунонидашудаи мушоҳида баррасӣ шуданд. Зарурати истифодаи маҷмӯии мониторинги сенсорӣ, маълумоти метеорологӣ, иттилоот дар бораи манбаъҳои партовҳо ва амсиласозии математикӣ барои арзёбӣ ва пешгӯии сифати ҳавои атмосфераи ш. Хуҷанд асоснок гардид.



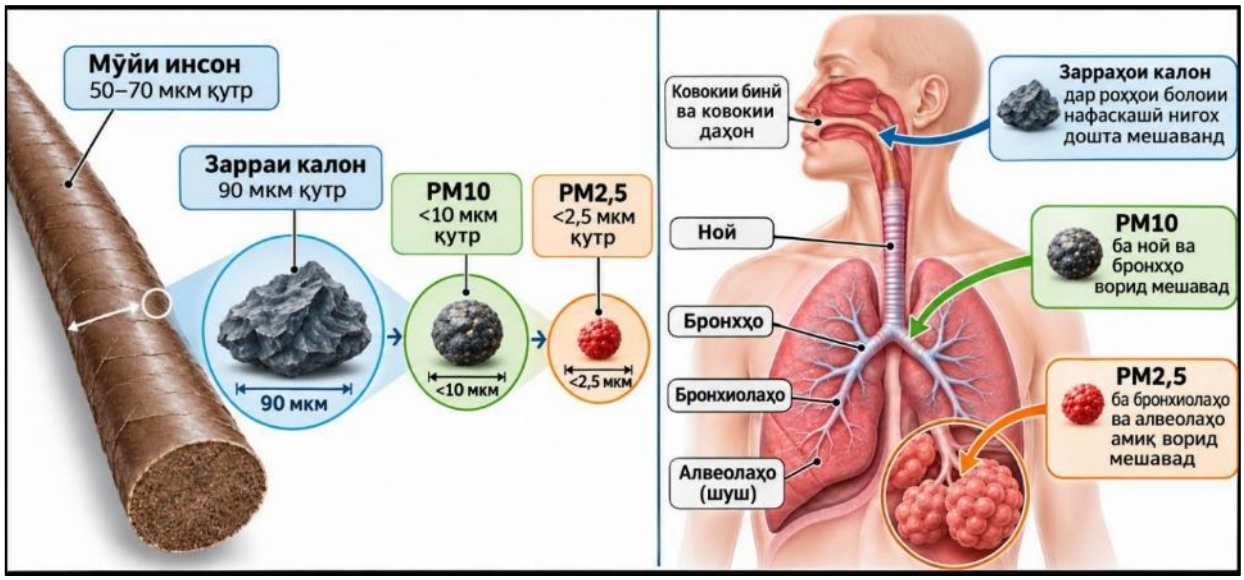
Расми 1. - Сохтори усулҳои тамосии мушоҳида



Расми 2. - Нақшаи принсипиалии зондкунии фосилавии моҳворавӣ: 1 – манбаи афканишоти электромагнитӣ; 2 – маҷмааи баландпарвоз, моҳвора; 3 – маҷмааи рӯизаминӣ; 4 – низоми ҷамъоварӣ, коркард ва нигоҳдории маълумот; 5 – иттилоот ва истифодабаранда; 6 – сатҳ ва минтақаи зондкунӣ.

Дар боби дуюм методикаи таҳқиқи сифати ҳавои атмосфераи ш. Хуҷанд баён шудааст: объект, нишондиҳандаҳои назоратшаванда ва заминаи иттилоотӣ муайян гардида, интихоби сенсорҳои оптикии Plantower PMS5003 ва датчикҳои метеорологии BME280 асоснок шудааст, ташкили мушоҳидаҳо ва усулҳои коркарди оморӣ баррасӣ гардидаанд. Заминаи иттилоотиро маълумоти мониторинги автоматикунонидашуда, маводи метеорологӣ, ҳисобот аз рӯйи шакли 2-ТП (ҳаво) барои солҳои 2023–2025, Барномаи рушди шаҳр ва хусусиятҳои манбаъҳои собити партовҳо, ки ҳангоми амсиласозӣ истифода шудаанд, ташкил медиҳанд.

Барои арзёбии таъсири ифлосшавии аэрозолӣ ба саломатии инсон нишондиҳандаҳои консентратсияи массавии зарраҳои PM10 (бо диаметри аэродинамикӣ то 10 мкм) ва PM2,5 (то 2,5 мкм) истифода мешаванд. Зарраҳои PM2,5 метавонанд ба қисматҳои амиқи низоми нафаскашӣ, аз ҷумла алвеолаҳои шуш ворид шаванд (расми 3).



Расми 3. - Муқоисаи андозаҳои зарраҳои аэрозолии PM10 ва PM2,5 ва нақшаи воридшавии онҳо ба низоми нафаскашии инсон.

Ба манбаъҳои асосии антропогении зарраҳои муаллақ дар шаҳр нақлиёти автомобилӣ, корхонаҳои саноатӣ, гармидиҳии маишӣ ва фаъолияти сохтмонӣ, аз ҷумла дубора ба ҳаво бархостани чанги роҳу хок дохил мешаванд.

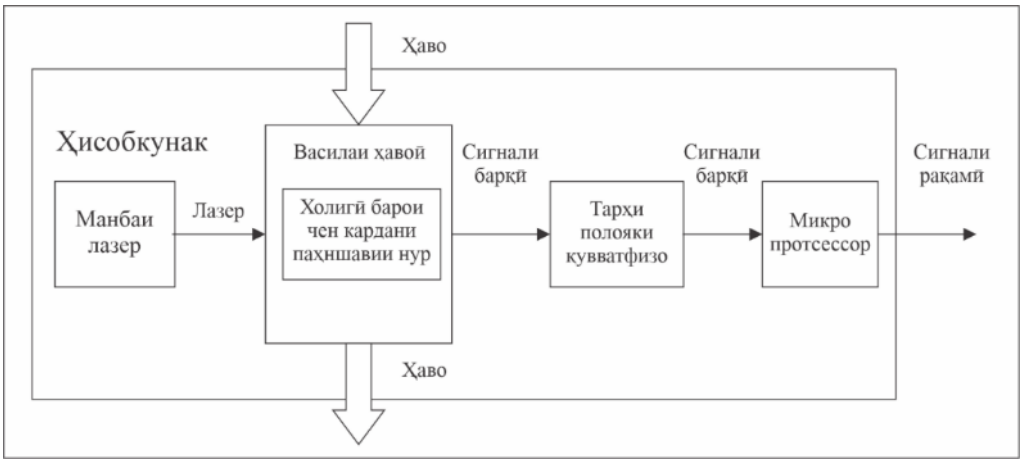
Фарогирии маҳдуди фазоии мушоҳидаҳои зарраҳои сахт (ЗС) зарурати ченкуниҳои иловагии фраксияҳои PM1,0, PM2,5 ва PM10-ро ба миён меорад. Барои муайян кардани консентратсияи онҳо усулҳои гравиметрӣ ва ченкуниҳои асбобии автоматикунонидашуда истифода мешаванд. Дар таҳқиқоти мазкур усули мониторинги пайвастаи автоматикунонидашуда истифода шудааст, ки сабти тағйирёбии консентратсияҳоро дар реҷаи ба вақти воқеӣ наздик таъмин менамояд.

Барои таҳқиқи консентратсияҳои PM1,0, PM2,5 ва PM10 низоми автоматикунонидашуда дар асоси сенсорҳои оптикии Plantower PMS5003 истифода гардид. Маҷмааи ченкунӣ модулҳои сенсорӣ, ҷузъҳои электронии коркард ва интиқоли маълумот, инчунин корпусҳои муҳофизатиро дар бар мегирад (расми 4).



Расми 4. - Ҷузъҳои асосии низоми автоматикунонидашудаи мониторинги сифати ҳавои атмосфера: сенсорҳои Plantower PMS5003, модулҳои электронӣ ва корпусҳои муҳофизатӣ

Принсипи кори PMS5003 ба паҳншавии нури лазерӣ асос ёфтааст: заррaҳое, ки аз камераи ченкунӣ мегузаранд, нурро паҳн мекунанд ва ин нур аз ҷониби қабулкунаки рӯшноӣ сабт мегардад. Сигнали ҳосилшударо электроникаи сенсор коркард намуда, барои муайян кардани консентратсияи массавии заррaҳо бо усули ҳисобӣ истифода мебарад (расми 5).



Расми 5. - Нақшаи принсипиалии кори сенсори Plantower PMS5003

Ташкили низоми мушоҳидаҳо: Асоси ҳуқуқии мониторинги экологиро Қонуни ҶТ «Дар бораи ҳифзи ҳавои атмосфера» аз 28 декабри соли 2012 ва Қонуни ҶТ «Дар бораи мониторинги экологӣ» аз 25 марти соли 2011, № 707 ташкил медиҳанд. Ҳангоми ташкили мушоҳидаҳо муқаррароти методии ГОСТ 17.2.3.01–86 ва РД 52.04.186–89 ба назар гирифта шудаанд. Мутобиқи ГОСТ 17.2.3.01–86 фарогирии ҳадди ақалли тавсияшаванда бо дидбонгоҳҳои собит аз шумораи аҳолӣ вобаста аст: то 50 ҳаз.нафар – як дидбонгоҳ, аз 200 то 500 ҳаз.нафар – 3–5 дидбонгоҳ, зиёда аз 500 ҳаз.нафар – 5–10 дидбонгоҳ. Дар ҳудуди ш. Хуҷанд чор нуқтаи насби сенсорҳо муайян карда шуданд: маҳаллаҳои 19-ум ва 31-ум, маҳаллаи «Ватан» ва минтақаи «Комбинати абрешим». Ҳангоми интихоби онҳо ҷойгиршавии манбаъҳои асосии партовҳо, се минтақаи саноатӣ ва самтҳои нақлиётии Хуҷанд–Б. Ғафуров, Хуҷанд–Чаноқ ва Хуҷанд–Душанбе ба назар гирифта шуд. Ин интихоб имкон дод, ки дар минтақаҳои гуногуни шаҳр мушоҳидаҳо гузаронда шаванд (расми 6).



Расми 6. Нақшаи ҷойгиршавии нуқтаҳои мониторинги PMS5003 ва минтақаҳои саноатӣ дар ҳудуди ш. Хуҷанд

Ҳангоми интихоби нуқтаҳо фарогирии фазоии ҳудуд, шароити ҷойгиркунии таҷҳизот, дастрасии неруи барқ ва алоқаи мобилии GSM/GPRS барои интиқоли маълумот ба назар гирифта шуданд. Сенсорҳо дар баландии аз 1,5 то 10 м бо дарназардошти шароити техникӣ ва ҳифзи таҷҳизот насб гардиданд [16-М, с. 86].

Таҷрибаи байналмилалӣ нишон медиҳад, ки сенсорҳои оптикии камхарҷ метавонанд низомҳои анъанавии мониторингро пурра намуда, фарогирии фазоии мушоҳидаҳоро васеъ созанд. Дар баъзе таҳқиқот ҳангоми муқоисаи нишондодҳои чунин сенсорҳо бо асбобҳои эталонӣ зариби детерминатсияи $R^2 > 0,8$ ба даст омадааст. Ҳамзамон эътимоднокии ченкуниҳо аз шароити метеорологӣ, хусусиятҳои аэрозол ва калибркунии асбобҳо вобаста аст. Истифодаи чунин низомҳо ба омӯзиши тағйирёбии фазоию вақтии консентратсияи PM2,5 ва такмили мониторинг мусоидат мекунад.

Боби сеюм ба таҳлили вазъи сифати ҳавои атмосфераи ш. Хуҷанд, шароити табиию иқлимӣ, низоми мониторинги экологӣ ва манбаъҳои асосии ифлосшавӣ бахшида шудааст. Омилҳои метеорологӣ ва топографӣ, манбаъҳои собит, сайёр, масоҳатӣ, маишӣ ва табиӣ баррасӣ шуданд. Барои арзёбии сарбории антропогенӣ маводи оморӣ, ҳисобот аз рӯйи шакли 2-ТП (ҳаво), маълумот оид ба саноату нақлиёт ва таҳқиқоти интиқоли минтақавии зарраҳо истифода шудаанд.

Сифати ҳавои Хуҷанд дар натиҷаи таъсири якҷояи шароити табиӣ ва манбаъҳои антропогении ифлосшавӣ ташаккул меёбад. Шаҳр дар қисми ғарбии водии Фарғона, дар соҳилҳои дарёи Сирдарё, байни қаторкӯҳи Туркистон ва кӯҳҳои Муғултау ҷойгир аст. Релефи водигӣ, реҷаи ҳарорат, боришоти атмосферӣ ва гардиши шамол ба интиқол, ҷамъшавӣ ва паҳншавии моддаҳои ифлоскунанда таъсир мерасонанд.

Иқлими Хуҷанд бо мавсимияти возеҳи ҳарорат ва тақсимоти нобаробари боришот тавсиф мешавад. Ҳарорати аз ҳама баланд дар тобистон мушоҳида мегардад; дар ин давра камии боришот эҳтимоли дубора ба ҳаво бархостани чангро зиёд мекунад. Хусусиятҳои асосии иқлимӣ дар ҷадвали 1 оварда шудаанд.

Ҷадвали 1. - Нишондиҳандаҳои иқлимии ш. Хуҷанд

Моҳ	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Сол
Ҳадди аксари миёна°С	3,5	6,2	13,8	21,9	28,6	34,2	35,5	32,4	28,8	20,6	12,3	5,6	20,3
Ҳадди ақали миёна°С	3,2	1,8	4,2	10,7	15,6	19,6	21,2	18,8	13,6	8,1	3,4	0,5	9,1
Меъёри боришот, мм	15,1	15,4	24,9	26,8	20,1	8,6	3,9	1,2	3,2	14,9	15,7	17,3	167,1

Тибқи маълумоти иқлимӣ, миқдори умумии боришот дар моҳҳои ноябр–март тақрибан 88,7 мм ва дар моҳҳои июн–август 13,8 мм-ро ташкил медиҳад. Барои шаҳр шамолҳои шарқӣ, ғарбӣ ва ҷанубу ғарбӣ хосанд. Шиддат гирифтани шамол дар шароити муайян ба паҳншавии омехтаҳо мусоидат мекунад, дар ҳоле ки шамоли суст ва инверсияи ҳароратӣ метавонанд барои ҷамъшавии моддаҳои ифлоскунанда дар қабати наздизаминии атмосфера шароит фароҳам оранд.

Таҳлили низоми давлатии мониторинг маҳдуд будани фарогирии фазоии мушоҳидаҳо ва номгӯйи моддаҳои ифлоскунандаи назоратшавандаро нишон дод. Тавре дар кори қаблан нашршудаи муаллиф қайд шудааст: «То ба даст овардани Истиқлоли давлатии Ҷумҳурии Тоҷикистон мониторинги ҳавои атмосфера дар ҳафт шаҳри бузурги кишвар дар асоси 21 нуқтаи мушоҳидавӣ аз рӯйи 20 намуди моддаҳои

ифлоскунанда гузаронда мешуд» [5-М, с. 109]. Ҳамчунин маълумот оид ба нишондиҳандаҳои назоратшаванда ва нашршавандаи сифати ҳаво дар шаҳрҳои алоҳидаи ҷумҳурӣ оварда шудааст (ҷадвали 2).

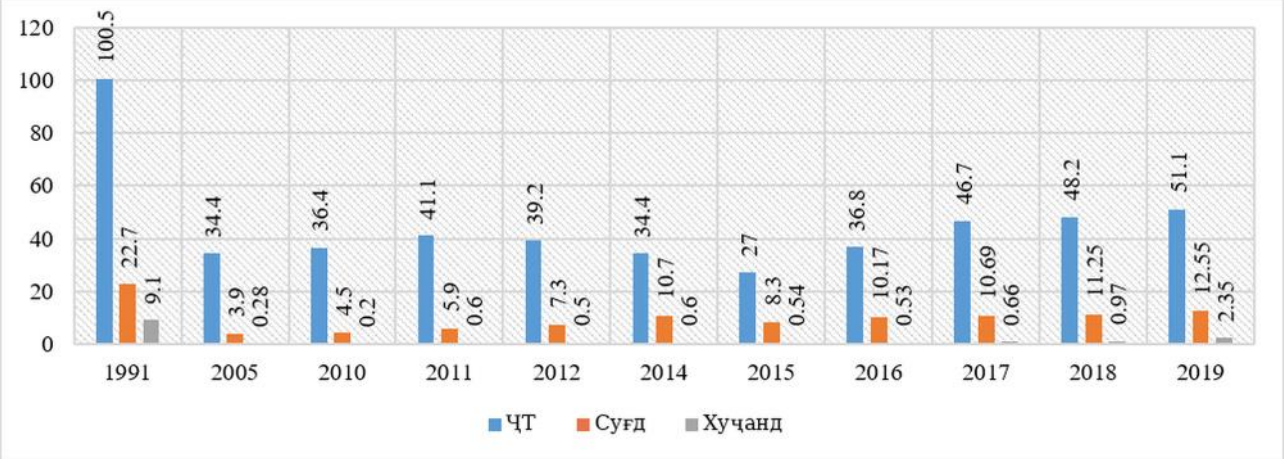
Ҷадвали 2. – Моддаҳои ифлоскунандаи назоратшаванда ва маълумоти нашршаванда оид ба ифлосшавии ҳаво

Шаҳр	Моддаҳои ифлоскунандаи назоратшаванда	Маълумоти нашршуда оид ба моддаҳои ифлоскунандаи назоратшаванда
Душанбе	SO2, CO, CHOH, O_3, NO, NO2, чанг	SO2, CO, CHOH, NO, NO2, чанг
Хуҷанд	SO_2, CO, NO_2, O_3	SO_2, NO_2
Бохтар	SO_2, CO, NO, NO_2	SO_2, NO_2
Гулистон	SO_2, CO, NO_2, O_3	SO_2, NO_2
Турсунзода	SO_2, CO, NO, NO_2	SO_2, NO_2

Маълумоти пешниҳодшуда маҳдуд будани иттилооти дастрасро оид ба фраксияҳои алоҳидаи заррaҳо, аз ҷумла PM2,5 ва PM10, нишон медиҳад ва зарурати васеъ намудани мониторинги автоматикунонидашударо асоснок мекунад.

Муқоисаи маълумоти оморӣ нақши назарраси манбаъҳои сайёрро дар ҳаҷми умумии партовҳои ба ҳисоб гирифташуда нишон медиҳад, дар ҳоле ки корхонаҳои саноатӣ ва дегхонаҳо барои ифлосшавии маҳаллӣ аҳамияти муҳим доранд. Тибқи маълумоти баррасишуда барои соли 2018, ҳиссаи манбаъҳои сайёр тақрибан 94% арзёбӣ шудааст. Ин нишондиҳанда массаи партовҳои ба ҳисоб гирифташударо дар маҷмӯи оморӣ дахлдор тавсиф мекунад ва ҳиссаи бевоситаи нақлиёти автомобилӣ дар консентратсияи PM2,5-ро муайян намекунад.

Тибқи маълумоти соли 2019, ҳаҷми умумии партовҳои моддаҳои ифлоскунанда аз манбаъҳои собити ш. Хуҷанд 1146,2 т, аз ҷумла моддаҳои сахт 450,2 т, оксиди карбон 387,4 т ва диоксиди сулфур 158,0 т-ро ташкил дод. Соли 2018 ҳаҷми умумии партовҳои ба ҳисоб гирифташуда 972,0 т буд. Муқоисаи партовҳои манбаъҳои собити шаҳр, вилояти Суғд ва ҷумҳурӣ дар расми 7 нишон дода шудааст.



Расми 7. – Муқоисаи партовҳои моддаҳои ифлоскунанда аз манбаъҳои собити ш.Хуҷанд, вилояти Суғд ва Ҷумҳурии Тоҷикистон (ҳазор тонна)

Тавре дар ҳисобот оид ба ҳолати муҳити зисти Ҷумҳурии Тоҷикистон зикр шудааст: «Ба нақлиёти автомобилӣ дар Ҷумҳурии Тоҷикистон 90%-и тамоми боркашонии дохилӣ рост меояд. Дар даҳсолаи охир шумораи нақлиёти автомобилӣ дар кишвар зиёда аз 80% афзудааст. Афзоиши миёнаи солонаи воситаҳои нақлиёт аз 20 то

30 ҳазор автомобилро ташкил медод (соли 2015 – 11 700, соли 2019 – 21 356, соли 2020 – 23 019). Ба ҳар 1000 нафар аҳолӣ 43–44 автомобил рост меояд, ки нишондиҳандаи аз ҳама паст дар байни кишварҳои Осиёи Марказӣ мебошад» [10, с. 19].

Ин маълумот рушди нақлиётро дар давраи дар манбаъ баррасишуда тавсиф мекунад. Афзоиши фаъолияти нақлиётӣ сарбории эҳтимолиро ба ҳавои атмосфера, ки бо партовҳои сӯхтани сӯзишворӣ, фарсудашавии сатҳи роҳ, шинаҳо ва механизмҳои тормоз вобаста аст, зиёд менамояд. Ҳолати техникии автомобилҳо ва сифати сӯзишворӣ низ аҳамияти муҳим доранд. Динамикаи сарбории нақлиётӣ дар Хуҷанд дар ҷадвали 3 оварда шудааст.

Ҷадвали 3. – Динамикаи шумораи воситаҳои нақлиёт ва партовҳои моддаҳои ифлоскунанда аз манбаъҳои сайёр дар ш. Хуҷанд

Солҳо	2006	2007	2008	2010	2011	2014	2016	2019	2021	2022	2023	2024	2025
Хуҷанд, ҳамагӣ, ҳазор адад	11,9	13,4	14,3	16,8	17,2	18,6	19,2	20,9	21,5	21,8	22,1	22,4	25,6
Партовҳо аз нақлиёт ҳаз.тонн	9,4	10,6	11,6	13,3	13,5	14,5	15,1	15,2	11,6	11,3	12,2	12,9	13,8

Мувофиқи маълумоти овардашуда, шумораи воситаҳои нақлиёт дар Хуҷанд аз 11,9 ҳазор адад дар соли 2006 то 22,4 ҳазор адад дар соли 2024 афзудааст. Ҳамзамон ҳаҷми партовҳо яксон тағйир наёфтааст, зеро он аз сохтори паркҳои нақлиётӣ, сифати сӯзишворӣ ва шиддатнокии истифодаи воситаҳои нақлиёт вобаста мебошад.

Омили иловагии таъсири антропогенӣ истифодаи сӯзишворӣ дар саноат, энергетика ва бахши маишӣ мебошад. Мувофиқи Маърӯзаи чоруми миллии Ҷумҳурии Тоҷикистон, соли 2016 ҳаҷми умумии партовҳои газҳои гулхонаӣ бе дарназардошти бахши истифодабарии замин, тағйироти истифодабарии замин ва хоҷагии ҷангал 15 572,98 Гг CO_2-экв., бо дарназардошти ин бахш 13 974,56 Гг CO_2-экв.-ро ташкил додааст. Дар сохтори партовҳо ҳиссаи назаррас ба кишоварзӣ (44,7%) ва бахши энергетика (тақрибан 42%) рост меояд [3, с. 54].

Дар фасли сармо гармидиҳии маишӣ, аз ҷумла истифодаи ангишт ва ҳезум, ба сифати ҳавои атмосфера таъсири назаррас мерасонад. Дар вилояти Суғд гармидиҳӣ асосан тавассути неруи барқ ва дигар намудҳои сӯзишворӣ таъмин мешавад, дар ҳоле ки дастрасӣ ба гази табиӣ маҳдуд аст. Сӯзондани сӯзишвории сахт боиси ба атмосфера ворид шудани зарраҳои муаллақ ва моддаҳои ифлоскунандаи газшакл мегардад.

Интиқоли табиӣ ва минтақавии аэрозолҳо низ ба сифати ҳавои ҳавзаи Хуҷанд таъсир мерасонад. Дар даврaҳои алоҳида тӯфонҳои чангӣ, эрозияи шамолии хок ва интиқоли заррaҳо аз ҳудудҳои ҳамсоя метавонанд ифлосшавии атмосфераро зиёд кунанд. Масъалаҳои таъсири тағйирёбии иқлим ба ташаккули тӯфонҳои чангӣ дар таҳқиқоти муаллиф баррасӣ шудаанд [13-М].

Таҳлили муқоисавии сохтори партовҳои атмосферии Ҷумҳурии Тоҷикистон барои солҳои 1991 ва 2018 тағйирёбии таносуби моддаҳои ифлоскунандаи сахт ва газшаклро нишон дод. Ҳиссаи ҷузъҳои сахт, сарфи назар аз кам шудани массаи мутлақи онҳо, тақрибан аз 28,6 то 34,0% афзудааст.

Ҳамин тариқ, ифлосшавии ҳавои Хуҷанд дар натиҷаи таъсири якҷояи манбаъҳои нақлиётӣ, саноатӣ, маишӣ ва табиӣ ташаккул меёбад. Барои арзёбии таъсири онҳо ба консентратсияи PM2,5 бояд хусусияти партовҳо, шароити метеорологӣ ва натиҷаҳои мониторинги асбобӣ ба назар гирифта шаванд..

Дар боби чорум дар асоси маълумоти мониторинги автоматикунонидашуда, коркарди оморӣ ва амсиласозии математикӣ таҳлил, арзёбӣ ва пешгӯии сенариявии сифати ҳавои атмосфераи ш.Хуҷанд анҷом дода шудаанд. Таваҷҷуҳи асосӣ ба тағйирёбии байнисолона, мавсимӣ ва шабонарӯзии консентратсияи PM2,5, робитаи он бо параметрҳои метеорологӣ ва паҳншавии фазоии моддаҳои ифлоскунанда равона шудааст.

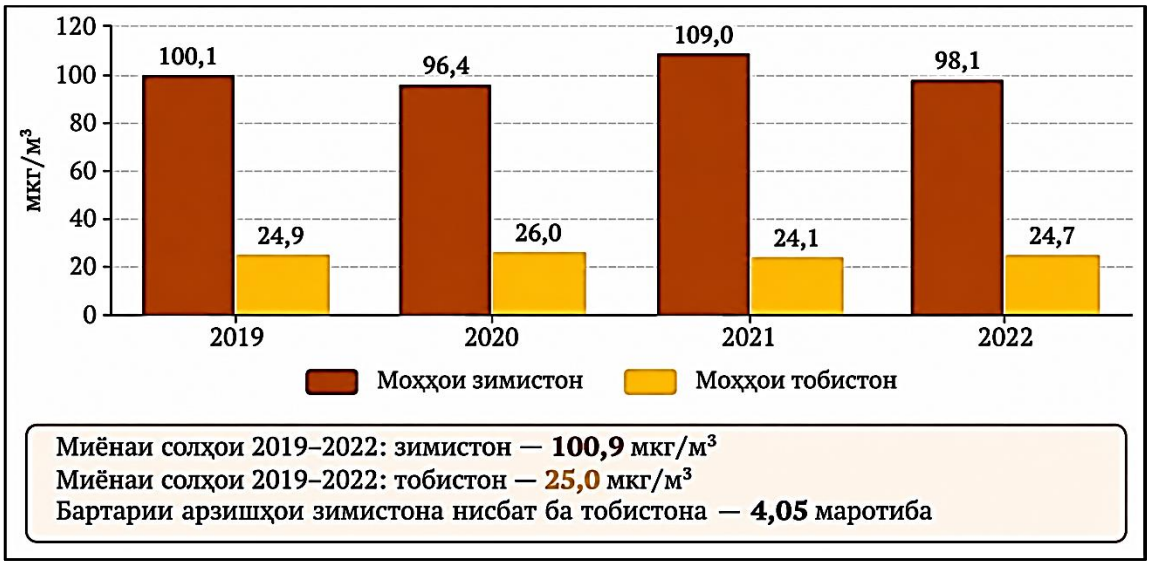
Мушоҳидаҳои автоматикунонидашуда сабти консентратсияҳои PM1,0, PM2,5 ва PM10, ҳарорати ҳаво, намии нисбӣ ва фишори атмосфераро бо фосилаи панҷ дақиқа дар бар мегирифтанд. Мувофиқи тартиби баҳисобгирии дар диссертатсия қабулшуда, барои солҳои 2019–2023 маҷмӯи 735 840 қимати миёнаи соатӣ ва 30 660 қимати миёнаи шабонарӯзӣ аз рӯйи тамоми параметрҳои назоратшаванда ташаккул ёфт. Сабти маълумот то моҳи марти соли 2024 идома ёфт, аммо таҳлили асосӣ солҳои 2019–2023-ро фаро мегирад. Истифодаи низомҳои сенсории автоматикунонидашуда барои ошкор намудани хусусиятҳои фазоию вақтии ифлосшавии аэрозолӣ ва васеъ намудани заминаи иттилоотии мониторинги экологӣ имкон медиҳад [3-М].

Консентратсияи PM2,5 бо сабаби аҳамияти экологӣ ва санитарии он ҳамчун нишондиҳандаи асосии таҳлили амиқ интихоб шудааст. Коркарди маълумот муайян кардани консентратсияҳои миёнаи солона, мавсимӣ ва шабонарӯзӣ, такроршавии қиматҳои баланд ва таҳлили коррелятсионию регрессионӣ бо дарназардошти ҳарорат, намӣ, фишори атмосфера, боришот ва реҷаи шамол дар бар гирифт.

Тибқи маълумоти нуқтаи «Маҳаллаи 19-ум», консентратсияи миёнаи солонаи PM2,5 соли 2019 – 53,5 мкг/м³, соли 2020 – 51,6 мкг/м³, соли 2021 – 57,7 мкг/м³, соли 2022 – 51,5 мкг/м³ ва соли 2023 – 57,3 мкг/м³-ро ташкил дод. Ҳамаи ин қиматҳо аз сатҳи миёнаи солонаи тавсиянамудаи Созмони ҷаҳонии тандурустӣ – 5 мкг/м³ – ба таври назаррас зиёд мебошанд.

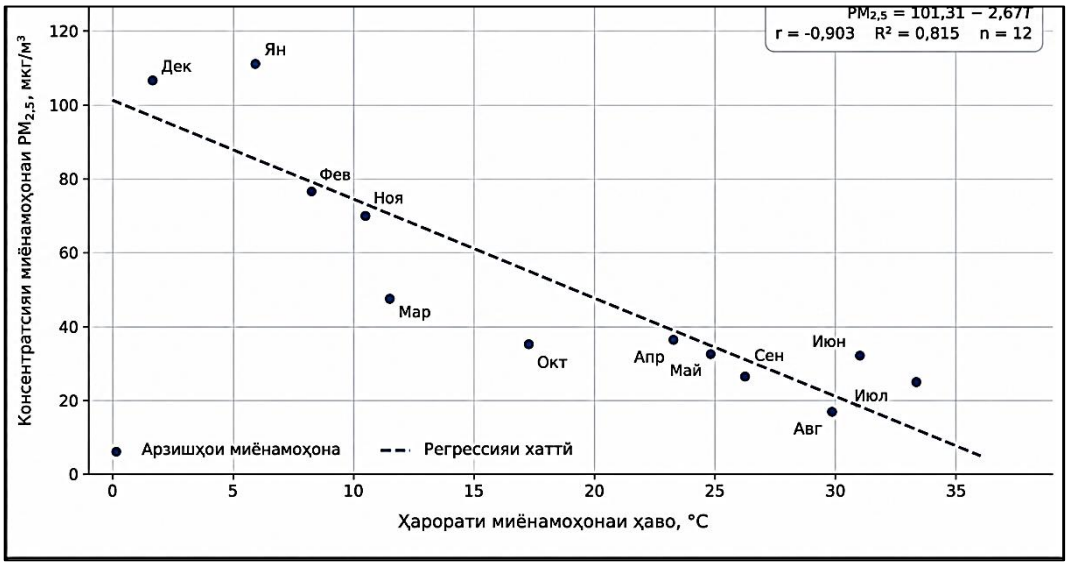
Барои арзёбии такроршавии ифлосшавии баланд меъёри ҳаддии миёнаи шабонарӯзӣ – 35 мкг/м³ – истифода шуд. Тибқи маълумоти нуқтаи «Маҳаллаи 19-ум», ҳиссаи рӯзҳои дорои консентратсияи аз ин сатҳ баланд дар соли 2019 – 49,9% ва дар соли 2020 – 50,0%-ро ташкил дод. Аз рӯйи маҷмӯи мушоҳидаҳои шабонарӯзии чор нуқтаи шабака ин нишондиҳандаҳо дар соли 2021 – 51,4%, соли 2022 – 52,9% ва соли 2023 – 53,4% буданд.

Тағйирёбии возеҳи мавсимии ифлосшавӣ бо зарраҳои сахт муайян гардид. Мувофиқи маълумоти миёнаи моҳона барои солҳои 2019–2022 консентратсияи миёнаи PM2,5 дар фасли зимистон 100,9 мкг/м³ ва дар тобистон тақрибан 25,0 мкг/м³ буд, ки фарқияти тақрибан 4,05-маротибаро нишон медиҳад (расми 8). Баландтарин қимати миёнаи зимистона соли 2021 – 109,0 мкг/м³ – ба қайд гирифта шуд. Қонунияти ошкоршуда бо афзоиши сарбории гармидиҳӣ ва тағйирёбии шароити метеорологие, ки ба ҷамъшавӣ ва паҳншавии зарраҳои сахт таъсир мерасонанд, мувофиқат мекунад.



Расми 8. – Динамикаи муқоисавии консентратсияҳои миёнаи моҳонаи PM2,5 дар давраҳои зимистон ва тобистони солҳои 2019–2022 дар ш. Хуҷанд

Барои арзёбии миқдории робитаи консентратсияи PM2,5 бо параметрҳои метеорологӣ таҳлили коррелятсионию регрессионӣ анҷом дода шуд. Аз рӯйи 12 қимати миёнаи моҳонаи нуқтаи «Маҳаллаи 19-ум» дар соли 2022 коррелятсияи қавии манфии PM2,5 бо ҳарорати ҳаво муайян гардид ($r = -0{,}903$; $R^2 = 0{,}815$). Вобастагии хаттӣ бо муодилаи $PM2{,}5 = 101{,}31 - 2{,}67T$ тавсиф мешавад, ки дар он T – ҳарорати миёнаи моҳонаи ҳаво, °C мебошад (расми 9). Ин робитаи оморӣ тағйирёбии муштараки мавсимии ҳарорат, сарбории гармидиҳӣ ва ифлосшавиро инъикос мекунад, аммо вобастагии бевоситаи сабабию натиҷавиро исбот намекунад.



Расми 9. – Вобастагии коррелятсионии консентратсияи миёнаи моҳонаи PM2,5 аз ҳарорати ҳаво дар нуқтаи мониторинги «Маҳаллаи 19-ум»-и ш. Хуҷанд барои соли 2022

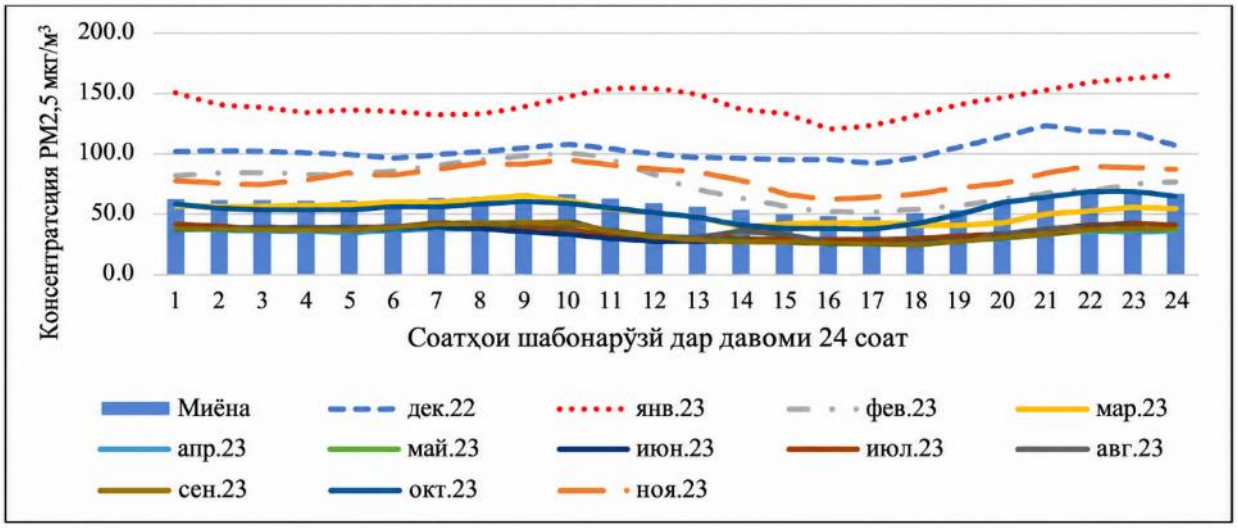
Натиҷаҳои ҷамъбастии таҳлили коррелятсионию регрессионӣ дар ҷадвали 4 пешниҳод шудаанд.

Ҷадвали 4. – Натиҷаҳои ҷамъбастии таҳлили коррелятсионӣ ва регрессионии консентратсияи PM2,5 ва параметрҳои метеорологӣ

Нишондиҳанда	Натиҷа	Давраи таҳлил
PM2,5 ва ҳарорат	r = −0,903; R^2 = 0,815	соли 2022, 12 моҳ
PM2,5 ва намӣ	r = +0,866; R^2 = 0,751	соли 2021, 12 моҳ
PM2,5 ва намӣ	r = +0,823; R^2 = 0,677	соли 2022, 12 моҳ
PM2,5 ва фишор	r ≈ +0,513; R^2 = 0,2634	солҳои 2021–2023
Ҳарорат ва намӣ	r = −0,942	соли 2022, 12 моҳ
PM2,5, ҳарорат ва намӣ	R^2 = 0,822	Регрессияи бисёромила, с. 2022

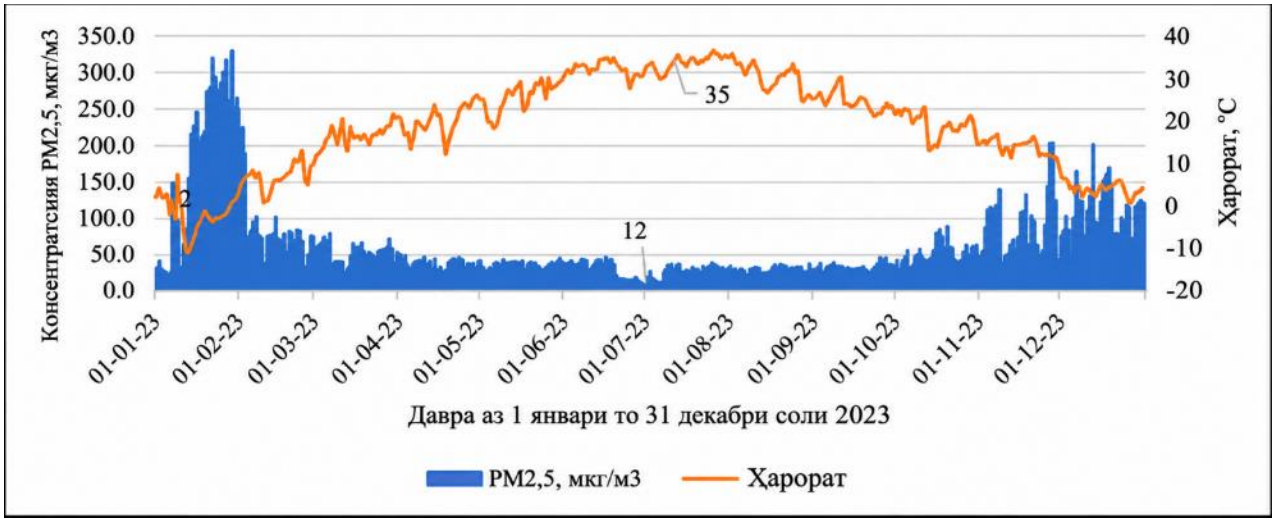
Таҳлили коррелятсионӣ робитаи мусбати консентратсияи PM2,5-ро бо намии нисбӣ ва робитаи мусбати муътадилро бо фишори атмосфера нишон дод. Байни ҳарорат ва намӣ коррелятсияи қавии манфӣ муайян шуд (r = −0,942). Ҳамзамон ворид намудани ҳарорат ва намӣ ба тамсилаи регрессионӣ R^2-ро аз 0,815 то 0,822 зиёд намуд.

Барои муайян намудани қонуниятҳои шабонарӯзӣ маълумоти соатии давраи декабри соли 2022 – ноябри соли 2023 таҳлил шуда, баъдан нишондиҳандаҳо аз рӯйи соатҳои шабонарӯз ва моҳҳо миёнагирӣ гардиданд. Баландшавии консентратсияи PM2,5 асосан аз соати 6 то 10-и субҳ, пастшавии минбаъда то соати 17 ва афзоиши такрорӣ дар шом то соати 23 муайян шуд (расми 10). Баландтарин қиматҳои профилҳои миёнаи шабонарӯзӣ дар моҳи январ – беш аз 120 мкг/м³, декабр – беш аз 90 мкг/м³ ва ноябру феврал – беш аз 60 мкг/м³ мушоҳида гардиданд. Чунин динамика метавонад ба таъсири якҷояи фаъолияти нақлиётӣ, сарбории гармидиҳӣ ва шароити омехташавии ҳавои атмосфера вобаста бошад.



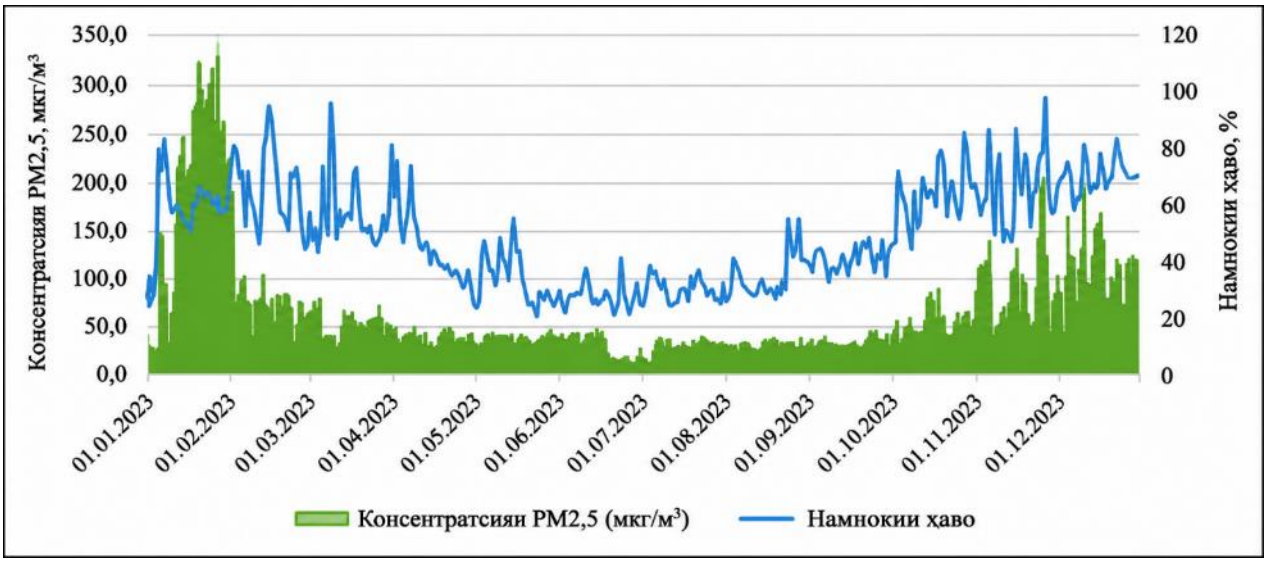
Расми 10. – Тағйирёбии шабонарӯзии консентратсияи миёнаи соатии PM2,5 аз рӯйи моҳҳо дар давраи декабри соли 2022 – ноябри соли 2023 дар ш. Хуҷанд

Барои арзёбии иловагии шароити ҳароратӣ динамикаи PM2,5 ва ҳарорати ҳаво аз рӯйи маълумоти нуқтаи «Комбинати абрешим» барои соли 2023 муқоиса карда шуд (расми 11). Дар баъзе давраҳои сардшавии зимистон афзоиши назарраси консентратсияи зарраҳои сахт мушоҳида гардид. Моҳи январи соли 2023 дар ҳароратҳои манфӣ ҳолатҳои то тақрибан 320 мкг/м³ баланд шудани PM2,5 ба қайд гирифта шуданд. Тағйирёбии монанд дар дигар давраҳои фасли сармо низ мушоҳида гардид. Ин натиҷаҳо зарурати ба ҳисоб гирифтани муштараки омилҳои метеорологӣ ва манбаъҳои мавсимии партовҳо, аз ҷумла гармидиҳӣ ва нақлиётро нишон медиҳанд.



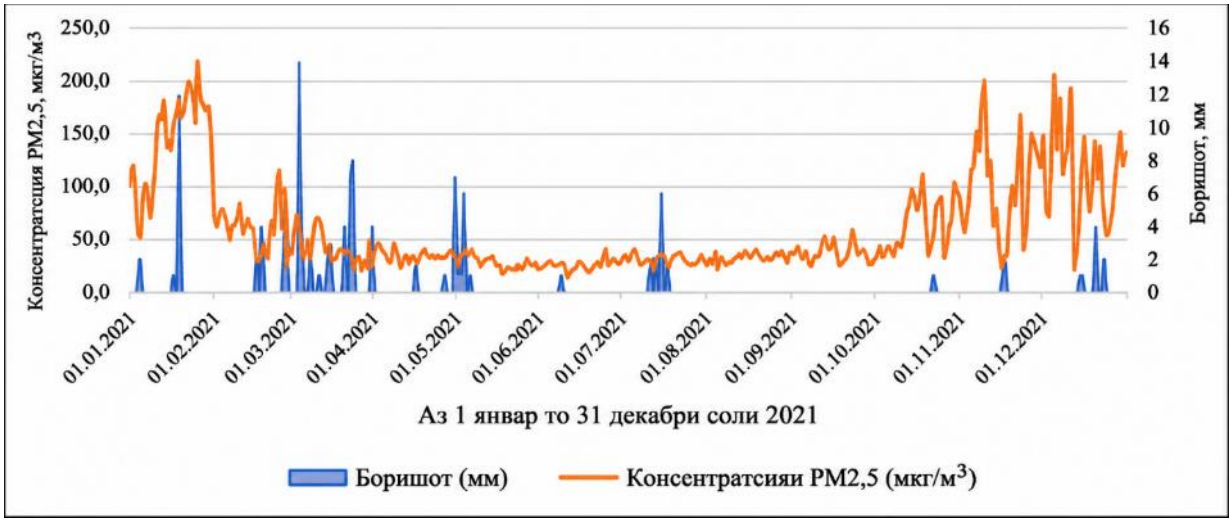
Расми 11. – Муқоисаи ҳарорати ҳаво ва консентратсияи PM2,5 дар нуқтаи «Комбинати абрешим»-и ш. Хуҷанд барои соли 2023

Муқоисаи динамикаи вақтии намии нисбӣ ва консентратсияи PM2,5 дар нуқтаи «Комбинати абрешим» хусусияти якмаъно надоштани робитаро нишон дод (расми 12). Дар баъзе давраҳо баландшавии намӣ, аз ҷумла ҳангоми боришот, бо пастшавии консентратсия ҳамроҳ буд. Ҳамзамон таҳлили коррелятсионии маълумоти миёнаи моҳонаи солҳои 2021–2022 робитаи мусбати омории намӣ ва PM2,5-ро нишон дод. Тафовути натиҷаҳо бо миқёсҳои гуногуни вақтии таҳлил ва тағйирёбии муштараки ҳарорат, боришот, сарбории гармидиҳӣ ва шароити паҳншавӣ шарҳ дода мешавад.



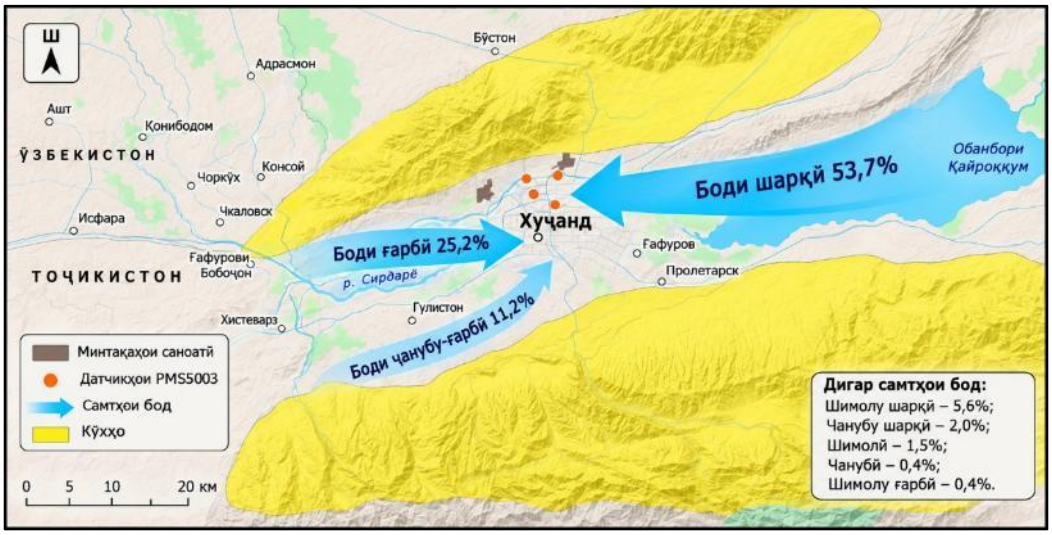
Расми 12. – Муқоисаи намии нисбии ҳаво ва консентратсияи PM2,5 дар нуқтаи «Комбинати абрешим»-и ш. Хуҷанд

Барои арзёбии таъсири эҳтимолии боришоти атмосферӣ консентратсияи миёнаи шабонарӯзии PM2,5 ва миқдори боришот барои соли 2021 муқоиса гардиданд (расми 13). Дар баъзе давраҳо боришот бо пастшавии назарраси ифлосшавӣ ҳамроҳ буд. Масалан, аз 11 то 16 ноябри соли 2021 консентратсияи PM2,5 аз 201,8 то 22,4 мкг/м³, яъне тақрибан нӯҳ маротиба кам шуд. Ин динамика ба механизми таҳшиншавии тари зарраҳои аэрозолӣ мувофиқат мекунад, аммо бе дарназардошти реҷаи шамол ва дигар омилҳо имкон намедиҳад, ки саҳми мустақили боришот аз ҷиҳати миқдорӣ муайян карда шавад.



Расми 13. – Муқоисаи миқдори боришоти атмосферӣ ва консентратсияи PM2,5 дар нуқтаи «Комбинати абрешим»-и ш. Хуҷанд барои соли 2021

Дар таҳқиқот таъсири суръат ва самти шамол ба равандҳои интиқол ва паҳншавии моддаҳои ифлоскунанда низ баррасӣ гардид. Ҷойгиршавии ҷуғрофии Хуҷанд дар қисми ғарбии водии Фарғона, байни қаторкӯҳи Туркистон ва кӯҳҳои Муғултау, хусусиятҳои гардиши маҳаллии массаҳои ҳаворо муайян мекунад. Мувофиқи диаграммаи самтҳои шамол, самтҳои шарқӣ – 53,7%, ғарбӣ – 25,2%, ҷанубу ғарбӣ – 11,2% ва шимолу шарқӣ – 5,6% бартарӣ доранд (расми 14).



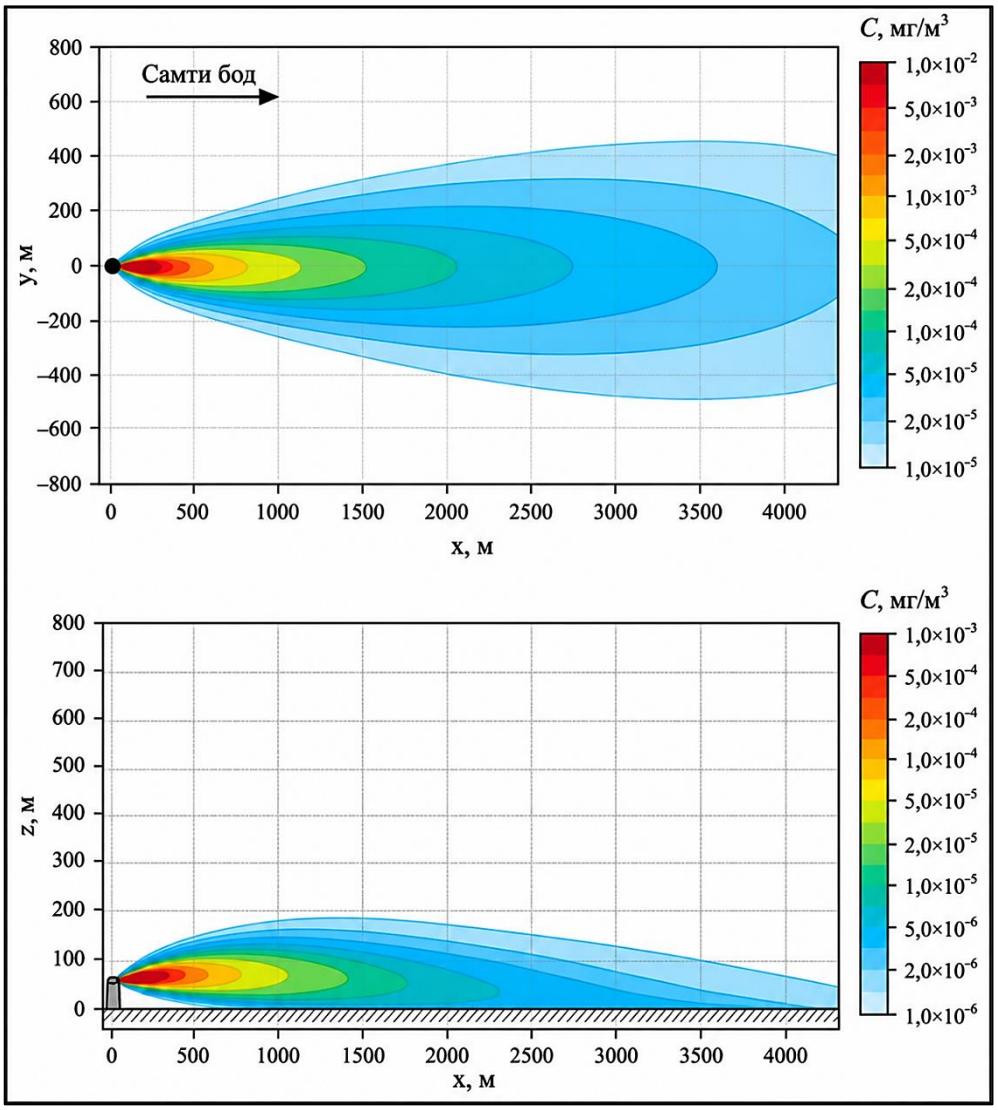
Ш – 53,7%; Ғ – 25,2%; ҶҒ – 11,2%; ШШ – 5,6%; ҶШ – 2%; Шм – 1,5%; Ҷ – 0,4%; ШҒ – 0,4%

Расми 14. – Диаграммаи самтҳои вазиши шамол дар ш. Хуҷанд аз рӯйи маълумоти бисёрсола

Натиҷаҳои таҳлил зарурати баҳисобгирии маҷмӯии реҷаи ҳарорат, намӣ, боришоти атмосферӣ, самту суръати шамол ва сарбории мавсимии гармидиҳиро ҳангоми арзёбӣ ва пешгӯии консентратсияи PM2,5 тасдиқ мекунанд [2-М].

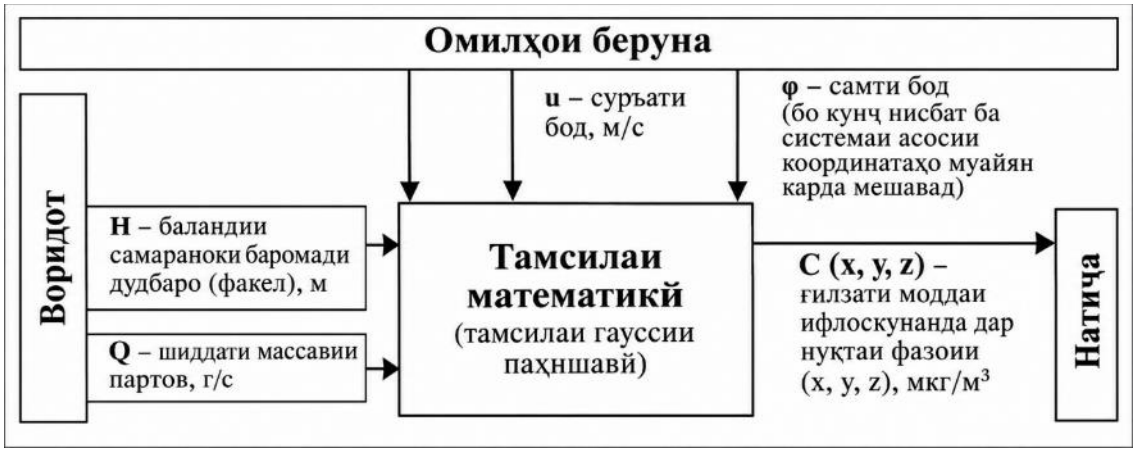
Барои арзёбии пешакии паҳншавии фазоии моддаҳои ифлоскунанда дар таҳқиқот равиши физикию математикӣ дар асоси тамсилаи гауссии паҳншавӣ мутобиқ карда шуд. Тамсила шиддатнокии массавии партов Q, баландии самараноки манбаъ H (м), суръат ва самти шамол, гурӯҳи устувории атмосфера ва координатаҳои фазоии нуқтаҳои ҳисобиро ба назар мегирад. Ин равиш имкон медиҳад, ки тақсимоти консентратсияҳо дар шароити муайяни интиқол ва паҳншавӣ ҳисоб карда шавад [12, 6-М].

Натиҷаҳои амсиласозии математикӣ метавонанд дар шакли изохатҳои консентратсияҳо пешниҳод шаванд, ки тақсимоти фазоии омехтаҳоро дар самти шамол ва ҳамвориҳои амудӣ ба он инъикос мекунанд. Чунин тасвир имкон медиҳад, ки минтақаҳои саҳми ҳисобӣ ва тағйирёбии консентратсия бо зиёд шудани масофа аз манбаъ муайян шаванд (расми 15).



Расми 15. – Тақсимоти фазоии консентратсияҳои ҳисобии моддаҳои ифлоскунанда дар шакли изохатҳо

Пайдарпайии ҳисоб муайян кардани хусусиятҳои ибтидоии манбаъ, шароити метеорологӣ, параметрҳои паҳншавии атмосферӣ ва ҳисоб намудани консентратсияҳоро дар нуқтаҳои муайяни фазо дар бар мегирад. Дар марҳилаи аввал координатаҳо, параметрҳои геометрӣ, шиддатнокии массавии партов ва баландии самараноки манбаъ муайян карда мешаванд. Сипас суръат ва самти шамол, гурӯҳи устувории атмосфера ва параметрҳои паҳншавии уфуқӣ ва амудӣ σy ва σz ба назар гирифта мешаванд. Дар асоси ин маълумот майдони ҳисобии консентратсияҳо ташаккул меёбад. Параметрҳои асосии воридотӣ ва натиҷавии тамсила дар расми 16 нишон дода шудаанд.



Расми 16. – Параметрҳои асосии воридотӣ ва натиҷавии тамсилаи гауссии паҳншавии моддаҳои ифлоскунанда

Дар тамсилаи собити баррасишаванда ибтидои координатаҳо дар пояи манбаъ ҷойгир буда, меҳвари OX ба самти шамол, OY ба самти амудӣ нисбат ба интиқол ва OZ амудӣ ба боло равона шудааст. Тақсимоти консентратсияи моддаи ифлоскунанда бо тамсилаи гауссии паҳншавӣ муайян карда мешавад (формулаи 1):

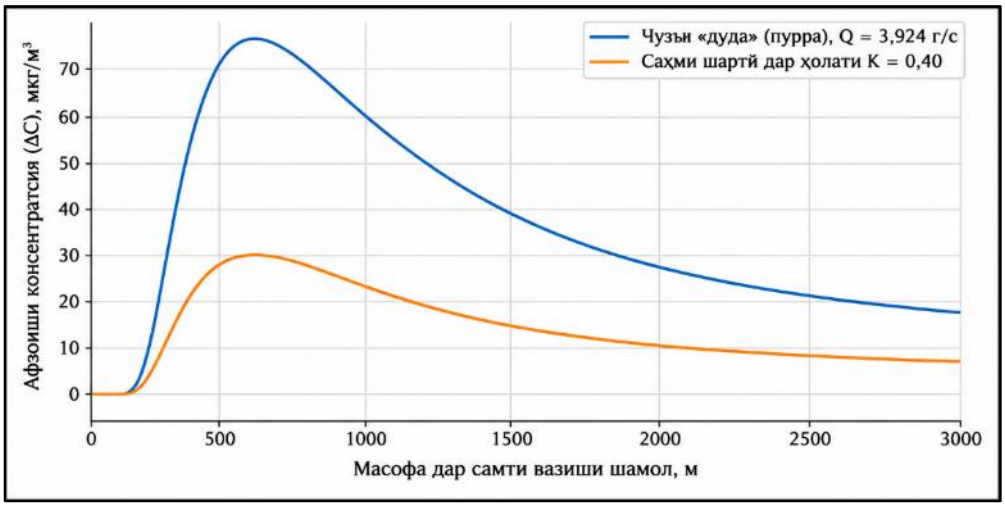
$$C\ (x,y,z) = \frac{Q}{2\pi u\sigma_y\ (x)\sigma_z(x)}\ exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)}\right) \times \left[exp\ \left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right) + exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right)\right] \qquad (1)$$

дар ин ҷо C(x,y,z) – консентратсияи ҳисобии моддаи ифлоскунанда; Q – шиддатнокии массавии партов, г/с; u – суръати шамол, м/с; σy ва σz – параметрҳои паҳншавии уфуқӣ ва амудӣ, м; H – баландии самараноки манбаъ, м; x, y, z – координатаҳои нуқтаи ҳисобӣ мебошанд. Ҳангоми истифодаи Q бо воҳиди г/с консентратсия аввал бо г/м³ муайян шуда, сипас ба мкг/м³ гузаронида мешавад.

Барои татбиқи амалии тамсила манбаи муташаккили ҶДММ «Ҷавонӣ», ки дар минтақаи саноатии шимолу шарқии Хуҷанд ҷойгир аст, баррасӣ шуд. Хусусиятҳои ҳуҷҷатии манбаи № 0026 истифода гардиданд: баландии дудбаро – 48 м, диаметри даҳонаи он – 0,830 м, суръати хориҷшавии газҳо – 7 м/с ва шиддатнокии массавии партови ҷузъи «дудсиёҳ» баъди тозакунӣ Q = 3,924 г/с. Баландии самараноки ҳисобии манбаъ 53,27 м мебошад.

Барои арзёбии сенариявии ҷузъи майдадисперсӣ зариби K = 0,40 қабул карда шудааст, ки ҳиссаи PM2,5-ро дар таркиби омехтаи сахт ифода мекунад. Мутаносибан шиддатнокии ҳисобии партов 1,5696 г/с мебошад. Зариби мазкур фарзияи тамсилавӣ буда, ҳамчун ҳиссаи ба таври таҷрибавӣ муайяншудаи PM2,5 дар партови корхона баррасӣ намегардад.

Дар расми 17 профилҳои ҳисобии паҳншавии омехтаи сахт ва ҷузъи шартии майдадисперсии он пешниҳод шудаанд. Саҳми максималии назди сатҳи замин дар самти шамол, дар масофаи тақрибан 626 м аз манбаъ ташаккул меёбад. Қимати максималии ҳисобӣ тақрибан 75 мкг/м³ ва барои фраксияи шартии PM2,5 тақрибан 30 мкг/м³ мебошад. Натиҷаҳо имкониятҳои тамсиларо барои муайян намудани минтақаҳои эҳтимолии ифлосшавӣ нишон медиҳанд.



Расми 17. – Профилҳои ҳисобии консентратсияи назди сатҳи замини омехтаи сахт ва фраксияи шартии PM2,5 аз манбаи ҶДММ «Ҷавонӣ»

Дар доираи муқоисаи пешакии консентратсияҳои ҳисобӣ ва назоратии PM2,5, ки дар диссертатсия барои масофаҳои 100, 500 ва 1000 м пешниҳод шудааст, фарқиятҳои нисбӣ мутаносибан 14,44%, 15,99% ва 14,14%-ро ташкил дода, дар ҳудуди диапазони қабулшудаи 12–18% қарор доранд. Ҳамзамон эътимоднокии арзёбӣ аз пуррагии хусусиятҳои манбаъ, ба ҳисоб гирифтани ифлосшавии заминавӣ, шароити метеорологӣ ва муқоисапазирии ченкуниҳои назоратӣ вобаста аст. Аз ин рӯ, натиҷаҳо ҳамчун арзёбии пешакии татбиқпазирии тамсила баррасӣ шуда, дақиқсозии минбаъда ва васеъ намудани санҷиши таҷрибавиро талаб мекунанд.

Ҳамин тариқ, натиҷаҳои боби чорум имконияти истифодаи муштараки мониторинги автоматикунонидашуда, таҳлили оморӣ ва амсиласозии математикиро барои арзёбии тағйирёбии фазоию вақтии PM2,5, муайян кардани минтақаҳои эҳтимолан дорои ифлосшавии баланд ва таҳияи сенарияҳои пешгӯӣ дар шароити ш. Хуҷанд нишон медиҳанд.

ХУЛОСА

1. Муқаррар гардид, ки сифати ҳавои атмосфераи ш. Хуҷанд таҳти таъсири муштараки омилҳои табиию иқлимӣ, топографӣ ва антропогенӣ ташаккул меёбад. Панҷ гурӯҳи асосии манбаъҳои ифлосшавӣ – собит, сайёр, масоҳатӣ, маишӣ ва табиӣ – низомманд карда шуданд. Аҳамияти релефи водигӣ, реҷаи ҳарорату шамол, боришоти атмосферӣ, сохтмони шаҳрӣ ва интиқоли минтақавии аэрозолҳо барои равандҳои ҷамъшавӣ ва паҳншавии моддаҳои ифлоскунанда муайян гардид [2-М, 5-М, 10-М, 11-М].

2. Равиши маҷмӯии арзёбии сифати ҳаво, ки мониторинги автоматикунонидашуда, мушоҳидаҳои метеорологӣ, таҳлили оморӣ ва амсиласозии математикиро муттаҳид мекунад, асоснок гардид. Шабакаи иборат аз чор нуқта бо сенсорҳои Plantower PMS5003 ва датчикҳои BME280 ташкил карда шуд, ки сабти шаш параметрро бо фосилаи панҷ дақиқа таъмин менамоянд. Ҳаҷми ҳисобии маҷмӯи маълумоти солҳои 2019–2023 ба 735 840 қимати миёнаи соатӣ ва 30 660 қимати миёнаи шабонарӯзӣ расид. PM2,5 ҳамчун нишондиҳандаи асосии таҳлили амиқ интихоб гардид [3-М, 6-М, 13-М, 14-М].

3. Тағйирёбии назарраси байнисолона, мавсимӣ ва шабонарӯзии PM2,5 муайян карда шуд. Консентратсияҳои миёнаи солона дар нуқтаи «Маҳаллаи 19-ум» барои солҳои 2019–2023 мутаносибан 53,5; 51,6; 57,7; 51,5 ва 57,3 мкг/м³-ро ташкил дода, аз сатҳи тавсияшудаи Созмони ҷаҳонии тандурустӣ – 5 мкг/м³ – хеле баланд буданд. Консентратсияи миёнаи зимистона (100,9 мкг/м³) аз консентратсияи тобистона (25,0 мкг/м³) тақрибан 4,05 маротиба зиёд буд. Ҳиссаи мушоҳидаҳои дорои қиматҳои аз 35 мкг/м³ баланд вобаста ба сол ва фарогирии шабака 49,9–53,4%-ро ташкил дод [11-М, 13-М, 14-М, 19-М].

4. Таҳлили коррелятсионию регрессионӣ аз рӯйи маълумоти миёнаи моҳонаи соли 2022 робитаи қавии манфии PM2,5-ро бо ҳарорати ҳаво ($r = -0{,}903$; $R^2 = 0{,}815$) ва робитаи мусбати онро бо намии нисбӣ ($r = +0{,}823$; $R^2 = 0{,}677$) ошкор намуд. Ҳангоми ба ҳисоб гирифтани муштараки ин параметрҳо $R^2 = 0{,}822$ ба даст омад. Ҳамчунин аҳамияти боришот ва реҷаи шамол барои интиқол ва паҳншавии аэрозолҳо муайян гардид, ки зарурати баҳисобгирии маҷмӯии шароити метеорологиро ҳангоми арзёбии ифлосшавӣ асоснок мекунад [6-М, 7-М, 15-М].

5. Арзёбии муқоисавии манбаъҳои асосии ифлосшавии ҳавои Хуҷанд бо дарназардошти маълумоти омории партовҳо, ҷойгиршавии фазоӣ ва натиҷаҳои мониторинг гузаронида шуд. Сарбории эҳтимолии саноат, нақлиёти автомобилӣ, сохтмон ва гармидиҳии маишӣ, ки бо равандҳои табиии чангӣ пурра мегардад, муайян карда шуд. Зарурати назорати афзалиятноки PM2,5 дар фасли сармо ва ба ҳисоб гирифтани таъсири маҷмӯии манбаъҳо ҳангоми таҳияи чорабиниҳои ҳифзи муҳити зист муқаррар гардид [3-М, 6-М, 9-М, 15-М].

6. Тамсилаи математикии паҳншавии моддаҳои ифлоскунанда бо дарназардошти хусусиятҳои манбаъ ва шароити метеорологӣ мутобиқ карда шуд. Дар мисоли ҶДММ «Ҷавонӣ» амсиласозии сенариявӣ анҷом дода шуда, минтақаи саҳми максималии ҳисобӣ дар масофаи тақрибан 626м муайян ва вобастагии консентратсияҳо аз суръати шамол таҳқиқ гардид. Дар муқоисаи пешниҳодшуда барои се нуқтаи назоратӣ фарқиятҳо 14,14–15,99%-ро ташкил дода, дар ҳудуди диапазони қабулшудаи 12–18% қарор гирифтанд. Имконияти истифодаи муштараки амсиласозӣ ва мониторинг барои арзёбии пешакии экологӣ ва таҳияи сенарияҳои пешгӯӣ нишон дода шуд [6-М, 9-М, 20-М].

ТАВСИЯҲО ОИД БА ИСТИФОДАИ АМАЛИИ НАТИҶАҲО

Ба мақомоти ваколатдор дар соҳаи ҳифзи муҳити зист ва гидрометеорология, инчунин мақомоти маҳаллии ҳокимияти давлатӣ тавсия дода мешавад, ки мониторинги ҳавои атмосфераро тавассути ҳамгироии мушоҳидаҳои давлатӣ, шабакаҳои сенсории автоматикунонидашуда ва амсиласозии математикӣ такмил диҳанд. Васеъ намудани афзалиятноки нуқтаҳои ченкунии PM1,0, PM2,5 ва PM10 дар минтақаҳои саноатӣ, қад-қади долонҳои нақлиётӣ, маҳаллаҳои истиқоматӣ ва наздикии иншооти иҷтимоӣ мувофиқи мақсад аст. Ба Кумитаи ҳифзи муҳити зист ва Агентии обуҳавошиносӣ тавсия дода мешавад, ки расмиёти калибркунии сенсорҳои камхарҷ, муқоисаи нишондодҳои онҳо бо асбобҳои референтӣ ва назорати сифати маълумотро рушд диҳанд. Бо дарназардошти қабули Кодекси экологии Ҷумҳурии Тоҷикистон такмили

таъминоти методии мониторинги PM2,5 ва PM10, коркарди рақамии маълумот ва дастрасии озод ба иттилооти экологӣ мувофиқи мақсад мебошад.

Ҳангоми таҳияи барномаҳои шаҳрии ҳифзи муҳити зист ва банақшагирии инфрасохтори Хуҷанд тавсия дода мешавад, ки консентратсияҳои баланди PM2,5 дар фасли сармо, сарбории гармидиҳӣ ва нақлиётӣ, шароити метеорологӣ ва ҷойгиршавии манбаъҳои партовҳо ба назар гирифта шаванд. Барои арзёбии пешакии ифлосшавии ҳаво истифодаи муштараки маълумоти меъёрҳои ҳадди ҷоизи партовҳо (ПДВ), ҳисобот аз рӯйи шакли 2-ТП (ҳаво), натиҷаҳои мониторинги сенсорӣ ва амсиласозии ҳисобӣ мувофиқи мақсад аст.

Ба ташкилотҳои ҳифзи муҳити зист ва муассисаҳои илмӣ-таҳқиқотӣ тавсия дода мешавад, ки таъсири эҳтимолии ифлосшавии аэрозолиро ба сабзазорҳо, хокҳои шаҳрӣ, минтақаҳои фароғатӣ ва экосистемаҳои соҳилии дарёи Сирдарё ба назар гиранд. Омӯзиши таҳшиншавии моддаҳо аз атмосфера, нишастани зарраҳо ба рӯйи растаниҳо ва истифодаи усулҳои биоиндикатсия дар минтақаҳои дорои сарбории баланди антропогенӣ самтҳои ояндадори таҳқиқот мебошанд.

Натиҷаҳои таҳқиқот барои истифода дар фаъолияти хадамоти ҳифзи муҳити зист, гидрометеорологӣ ва санитарию эпидемиологӣ, банақшагирии ҳудудӣ ва раванди таълимии муассисаҳои таҳсилоти олӣ тавсия мешаванд. Таҳқиқоти минбаъда бояд ба васеъ кардани шабакаи мушоҳидаҳо, омӯзиши таркиби химиявӣ ва манбаъҳои PM2,5, такмили тамсилаҳои математикӣ, истифодаи технологияҳои геоиттилоотӣ ва усулҳои омӯзиши мошинӣ барои арзёбӣ ва пешгӯии ифлосшавии ҳавои атмосфера равона карда шаванд.

РӮЙХАТИ АДАБИЁТ

1. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 560 с.
2. Финаев А.Ф. Потенциал загрязнения атмосферы Таджикистана по сочетанию метеорологических факторов // Известия АН Республики Таджикистан. Отделение наук о Земле. – 1994. – № 1.
3. Четвертое национальное сообщение Республики Таджикистан по Рамочной конвенции ООН об изменении климата. – Душанбе, 2022. – 232 с.
4. Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Назаров Б.И., Мадвалиев У., Давлатшоев Т. Содержание элементов в пробах почв и пылевого аэрозоля в Таджикистане // Оптика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 28. – № 2. – С. 143–152.
5. Абдуллозода С.Ф., Маслов В.А., Абдуллоева С.Д. Среднесуточные вариации массовой концентрации частиц PM2,5 в атмосфере города Душанбе за период 2014–2024 гг. // Вестник филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. Серия естественных наук. – 2024. – Т. 1. – № 4 (43). – С. 34–41.
6. Назаров Б.И., Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А. Атмосферный аэрозоль Центральной Азии. – Душанбе : Дониш, 2017. – 416 с.

7. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2,5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. – Geneva: WHO, 2021. (дата обращения: 05.06.2023).
8. Бобоев Х.Б., Шоев С.С. Оценка уровня загрязненности атмосферного воздуха на примере г. Душанбе // Политехнический вестник. Серия «Техника и общество». – 2023. – № 4 (4). – С. 11–15.
9. Каримов С.М., Шоев С.С., Гулахмадов Х.Ш., Бобоев Х.Б. Определение приоритетных загрязняющих веществ, подлежащих контролю в приземном слое атмосферного воздуха на территории г. Душанбе // Вестник филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе. Серия естественных наук. – 2023. – Т. 1. – № 2 (31). – С. 96–106.
10. Обзор системы мониторинга атмосферного воздуха в Республике Таджикистан: отчет. – Душанбе: ОО «МГЗОС», 2024. – 49 с.
11. He M., Kuerbanjiang N., Dhaniyala S. Performance characteristics of the low-cost Plantower PMS optical sensor // Aerosol Science and Technology. – 2020. – Vol. 54, № 2. – P. 232–241. – DOI: 10.1080/02786826.2019.1696015.
12. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнений атмосферы. – Ленинград : Гидрометеоиздат, 1985. – 272 с.
13. Национальная стратегия развития Республики Таджикистан на период до 2030 года. – Душанбе, 2016.
14. Постановление Правительства Республики Таджикистан от 1 марта 2023 года № 53 «О Государственной экологической программе Республики Таджикистан на 2023–2028 годы». (дата обращения: 21.09.2026).
15. Национальная стратегия адаптации к изменению климата Республики Таджикистан на период до 2030 года. – Душанбе, 2019.
16. Программа социально-экономического развития г. Худжанда на 2026–2030 годы. – Худжанд, 2025. – Утверждена решением Маджлиса народных депутатов г. Худжанда от 26 декабря 2025 г. № 74.

РЎЙХАТИ ИНТИШОРОТИ АСОСӢ АЗ РЎИ МАВЗЎИ ДИССЕРТАТСИЯ

Интишорот дар нашрияҳое, ки ба Феҳристи маҷаллаҳои илмии тақризшаванда ва тавсиянамудаи КОА назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон дохил шудаанд:

[1-М]. Мамадов И.А. Влияние антропогенных факторов на опустынивание земель / Р.О. Азизов, И.А. Мамадов // Научно-практический журнал «Водные ресурсы, энергетика и экология» Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана. – Душанбе, 2022. – Т. 2. – С. 100–106.

[2-М]. Мамадов И.А. Влияние температурной инверсии на уровень загрязнения атмосферного воздуха / И.А. Мамадов // Научно-технический и производственный журнал «Горный вестник Узбекистана». – 2023. – № 1/92. – DOI: 10.54073/GV.2022.1.92.025. – УДК 621.035. – С. 112–115.

[3-М]. Мамадов И.А. Применение автоматизированных систем мониторинга качества воздуха / Р.О. Азизов, И.А. Мамадов // Научно-практический журнал «Водные

ресурсы, энергетика и экология» Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАНТ. – Душанбе, 2024. – № 4 (1). – С. 182–189.

[4-М]. Мамадов И.А. Особенности управления развитием зеленой экономики: теоретические аспекты / К.О. Темиров, И.А. Мамадов // Вестник Таджикского государственного университета права, бизнеса и политики. Серия общественных наук. – 2025. – № 2 (103). – УДК 330. – DOI: 10.24412/3005-8023-2025-2-85-96. – С. 85–96.

[5-М]. Мамадов И.А. Качество воздуха как макроэкономический риск: оценки потерь и стратегия снижения ущерба в Республике Таджикистан / И.А. Мамадов // Наука и инновация. Серия геологических и технических наук. Таджикский национальный университет. – 2026. – № 2. – УДК 504.5:628.5:711.4. – С. 105–112. – ISSN 2664-1534.

[6-М]. Мамадов И.А. Математическое моделирование процесса загрязнения атмосферного воздуха / Р.О. Азизов, И.А. Мамадов // Политехнический вестник. Серия «Техника и общество». – 2026. – № 1 (13). – DOI: 10.65599/TS1285. – УДК 504.3.054:519.87. – С. 24–30.

[7-М]. Мамадов И.А. Правовые механизмы реализации Орхусской конвенции в системе экологического управления государств Центральной Азии по итогам Женевских совещаний 2025 года / И.А. Мамадов, Р.О. Азизов, К.О. Темиров, Х.Ф. Алимов, М.Б. Якубов // Государственное управление. Научно-политический журнал Академии государственного управления при Президенте РТ. – 2026. – № 4 (79). – УДК 349.6:341.24:342.7(575). – С. 58–72. – ISSN 2664-0651. – ISSN 2709-8567.

Интишорот дар маводи конференсияҳо ва дигар нашрияҳои илмӣ:

[8-М]. Мамадов И.А. Развитие промышленности в контексте «зеленой экономики» / И.А. Мамадов // Маводҳои Форуми саноатӣ таҳти унвони «Қадамҳои устувор баҳри рушди саноати миллӣ», бахшида ба 15-умин солгарди таъсисёбии Донишкадаи кӯҳию металлургии Тоҷикистон, Бустон, 24 апреля 2021 г. – Бустон, 2021. – С. 209–211.

[9-М]. Мамадов И.А. Цифровизация как основа эколого-экономического развития / И.А. Мамадов // Проблемы становления цифровой металлургии и машиностроения в РТ: материалы Республиканской научно-практической конференции, посвященной Дню национального единства, Бустон, 24 июня 2021 г. – Бустон, 2021. – С. 93–96.

[10-М]. Мамадов И.А. Качество атмосферного воздуха как один из факторов изменения климата / Р.О. Азизов, И.А. Мамадов, Д.Д. Ходжибаев // Проблемы природопользования, устойчивого развития и техногенной безопасности регионов : материалы IX Международной научно-практической конференции, Институт проблем природопользования и экологии НАН Украины, Днепр, 6–7 октября 2021 г. – Днепр, 2021. – С. 14–18.

[11-М]. Мамадов И.А. Влияние качества атмосферного воздуха на изменения климата региона / Р.О. Азизов, И.А. Мамадов, Д.Д. Ходжибаев // Современные инженерно-технические проблемы Таджикистана: материалы научно-практической конференции, посвященной 30-летию Государственной независимости Республики Таджикистан. – Душанбе: Инженерная академия РТ, 2021. – С. 15–20.

[12-М]. Мамадов И.А. Важность определения экономической ценности экосистем водно-болотных угодий в контексте управления водными ресурсами и адаптации к

изменению климата / Р.О. Азизов, А.К. Абдувалиев, И.А. Мамадов, Г.Н. Каримов, С.З. Шарафутдиннов // Использование природных ресурсов, экология и устойчивое развитие : материалы международной научно-практической конференции в рамках Международного десятилетия действий «Вода для устойчивого развития» 2018–2028 гг., Бустон, 24 сентября 2022 г. – Бустон, 2022. – С. 74–81.

[13-М]. Мамадов И.А. Изменения климата как один из факторов возникновения пыльных бурь / Р.О. Азизов, И.А. Мамадов, А.К. Абдувалиев // Материалы Международной научно-практической конференции «Водная безопасность – основа устойчивого развития». Водные ресурсы, энергетика и экология. Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАНТ. – Душанбе, 5–6 октября 2022 г. – № 2 (3). – С. 124–129. – ISSN 2789-0953.

[14-М]. Mamadov I. Pollution and risks in Pamiro-Tienshen burial grounds of uranium and obsolete pesticides / I. Hadjamberdiev, I. Domulajanov, I. Mamadov // RT&A. Reliability: Theory & Applications. – 2022. – Special Issue № 4 (70). – Vol. 17. – November 2022. – ISSN 1932-2321. – 4 p.

[15-М]. Мамадов И.А. Мониторинг качества подземных вод прилегающих территорий Дигмайского хвостохранилища / Д.Д. Ходжибаев, З.А. Разыков, И.А. Мамадов // Горный вестник Узбекистана. – 2024. – № 2 (97). – DOI: 10.54073/GV.2024.2.97.0. – С. 101–103. – ISSN 2181-7383.

[16-М]. Мамадов И.А. Влияние антропогенной деятельности на экосистему в контексте климатических изменений и устойчивого развития / Р.О. Азизов, И.А. Мамадов, Н. Васиредди // Последствия изменения климата и его влияние на производство и переработку сельскохозяйственной продукции: от науки к практике : материалы Международной научно-практической конференции, посвященной объявлению 2025 года Международным годом ледников. – Худжанд, 2025. – С. 85–89.

[17-М]. Мамадов И.А. Роль международных и общественных институтов в продвижении национальной политики Республики Таджикистан по повышению экологической просвещенности населения в аспекте радиационной безопасности / З.А. Разыков, И.А. Мамадов, И.Х. Закиров // Инновационные технологии добычи и переработки полезных ископаемых-II : материалы Международной научно-практической конференции, посвященной объявлению 2022–2026 годов «Годами развития промышленности» и 2020–2040 годов – «Двадцатилетием изучения и развития естественных, точных наук и математики в сфере науки и образования», Бустон, 16 мая 2025 г. – Бустон, 2025. – С. 50–53.

[18-М]. Мамадов И.А. Экологическое образование и молодежные инициативы как инструмент сохранения биоразнообразия: опыт эко-клуба ГМИТ и YGPE / Д.Д. Ходжибаев, З.А. Разыков, М.Э. Назарова, И.А. Мамадов // Материалы международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы сохранения биоразнообразия Центральной Азии», Алматы, Казахстан, 6–8 ноября 2025 г. – Алматы : КазНУ им. аль-Фараби, 2025. – ISBN 978-601-311-462-0. – 6 с.

[19-М]. Mamadov I. Imagine Two Scenarios: The Urgent Need for Equitable, Accessible Air Quality Data Management / Kh. Alimov, G.B. Baterina, R. Biggs, C. Bontia, S. Carbone,

J. DeWinter, S. Diez, S. Elkotbeid, D. Espita-Casanova, E. Friedman, E. Gayle Tamayo, Ch. Hagerbaumer, I. Mamadov, B. Martinez, G. Opondo, N. Pavlovic, M. Tejada // Environment: Science and Policy for Sustainable Development. – 2026. – Vol. 68. – № 1. – DOI: 10.1080/00139157.2025.2575745. – ISSN 0013-9157. – P. 8–13. – ISSN 1939-9154.

[20-М]. Мамадов И.А. Климат Центральной Азии: пыль, жара и цена бездействия / Чанг, жазирама ва бепарволик оқибати / И.А. Мамадов // Социально-политический, научно-культурный журнал «Ватан». – 2024. – № 4 (8). – С. 40–45. – ISSN 3030-3583.

АННОТАЦИЯ

диссертации Мамадова Икромжона Ахмадалиевича на тему «Оценка и прогноз состояния качества атмосферного воздуха города Худжанда», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.9.6. Экология

Ключевые слова: атмосферный воздух, воздушный бассейн, PM2,5, PM1,0, PM10, мелкодисперсные частицы, экологический мониторинг, Plantower PMS5003, BME280, метеорологические параметры, источники загрязнения, статистический анализ, математическое моделирование, прогнозирование, город Худжанд.

Цель исследования – научное обоснование комплексного подхода к мониторингу, оценке и прогнозированию качества атмосферного воздуха города Худжанда на основе многолетних измерений концентраций PM2,5, анализа природно-климатических и антропогенных факторов, статистической обработки данных и математического моделирования.

Объект исследования: воздушный бассейн города Худжанда в условиях воздействия природно-климатических и антропогенных факторов.

Предмет исследования: пространственно-временная изменчивость концентраций мелкодисперсных частиц PM2,5, их взаимосвязь с природно-климатическими и антропогенными факторами, структура источников загрязнения, а также методы автоматизированного мониторинга, оценки и математического моделирования, используемые для прогнозирования качества атмосферного воздуха города Худжанда.

Полученные результаты и их новизна: обоснован комплексный подход к оценке и прогнозированию качества атмосферного воздуха Худжанда, организована сеть из четырёх пунктов автоматизированного мониторинга. По данным за 2019–2023 гг. установлены сезонные, суточные и межгодовые закономерности изменения концентраций PM2,5 и их статистические взаимосвязи с метеорологическими параметрами. Зимние концентрации за 2019–2022 гг. превышали летние в 4,05 раза. Систематизированы основные источники загрязнения. Адаптирована гауссова модель рассеивания PM2,5 для сценарной оценки загрязнения. На примере источника № 0026 ООО «Джавони» отклонения расчётных и контрольных значений составили 14,14–15,99 % при общем диапазоне погрешности модели 12–18 %.

Рекомендации по использованию результатов исследования: совершенствовать систему мониторинга атмосферного воздуха, расширять сеть наблюдений PM1,0, PM2,5 и PM10, обеспечивать проверку и калибровку сенсоров, учитывать сезонную изменчивость загрязнения и применять данные об источниках выбросов, метеонаблюдения и математическое моделирование для прогнозных оценок и планирования природоохранных мероприятий.

Область применения: экологический мониторинг атмосферного воздуха, гидрометеорологические наблюдения, природоохранное управление, городское планирование, математическое моделирование и образовательный процесс.

АННОТАТСИЯИ

диссертатсияи Мамадов Икромжон Аҳмадалиевич дар мавзӯи «Арзёбӣ ва пешгӯии вазъи сифати ҳавои атмосфераи шаҳри Хуҷанд», ки барои дарёфти дараҷаи илмии номзади илмҳои техникӣ аз рӯйи ихтисоси 2.9.6. Экология пешниҳод шудааст

Калидвожаҳо: ҳавои атмосфера, ҳавзаи ҳавоӣ, PM2,5, PM1,0, PM10, заррaҳои майдадисперсӣ, мониторинги экологӣ, Plantower PMS5003, BME280, параметрҳои метеорологӣ, манбаъҳои партовҳо, таҳлили оморӣ, амсиласозии математикӣ, пешгӯӣ, шаҳри Хуҷанд.

Мақсади кори диссертатсионӣ – асосноккунии илмии равиши маҷмӯии мониторинг, арзёбӣ ва пешгӯии сифати ҳавои атмосфераи шаҳри Хуҷанд дар асоси ченкуниҳои бисёрсолаи PM2,5, таҳлили омилҳои табиию иқлимӣ ва антропогенӣ, коркарди омории маълумот ва амсиласозии математикӣ.

Объекти таҳқиқот: ҳавзаи ҳавоии шаҳри Хуҷанд дар шароити таъсири омилҳои табиӣ-иқлимӣ ва антропогенӣ.

Мавзуи (предмети) таҳқиқот: тағйирёбии фазоию вақтии консентратсияи заррaҳои майдадисперсӣ, робитаи онҳо бо омилҳои табиию иқлимӣ ва антропогенӣ, сохтори манбаъҳои ифлосшавӣ, инчунин усулҳои мониторинги автоматикунонидашуда, арзёбӣ ва амсиласозии математикӣ, ки барои пешгӯии вазъи сифати ҳавои атмосфераи шаҳри Хуҷанд истифода мешаванд.

Натиҷаҳои бадастомада ва навгонии онҳо: равиши маҷмӯии арзёбӣ ва пешгӯии вазъи сифати ҳавои атмосфераи Хуҷанд асоснок гардид; вобастагиҳои миқдории PM2,5 аз параметрҳои метеорологӣ муайян шуданд; манбаъҳои асосии собит, сайёр, масоҳатӣ, маишӣ ва табиии ифлосшавӣ низомманд карда шуданд; равиши математикӣ барои ҳисоб намудани паҳншавии PM2,5 аз манбаи собит мутобиқ ва аз ҷиҳати барномавӣ амалӣ гардид. Дар мисоли манбаи № 0026 ҶДММ «Ҷавонӣ» фарқияти қиматҳои ҳисобӣ ва назоратӣ 14,14–15,99%-ро ташкил дод, ки дар ҳудуди диапазони қабулшудаи 12–18% қарор дорад.

Тавсияҳо оид ба истифода: рушди низоми маҷмӯии мониторинги сифати ҳаво, васеъ намудани шабакаи мушоҳидаҳои PM1,0, PM2,5 ва PM10, таъмини санҷиш ва калибркунии сенсорҳо, истифодаи муштараки маълумоти манбаъҳои партовҳо ва мушоҳидаҳои метеорологии маҳаллӣ бо амсиласозии математикӣ ҳангоми таҳияи барномаҳои шаҳрӣ ва арзёбиҳои пешгӯӣ.

Соҳаи татбиқ: мониторинги экологии ҳавои атмосфера, мушоҳидаҳои гидрометеорологӣ, идоракунии ҳифзи муҳити зист, банақшагирии шаҳрӣ, амсиласозии математикӣ ва раванди таълим.

ANNOTATION

of the dissertation by Ikromjon Akhmadalievich Mamadov entitled "Assessment and Forecast of the State of Atmospheric Air Quality in Khujand", submitted for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 2.9.6. Ecology

Keywords: atmospheric air, urban air basin, PM2.5, PM1.0, PM10, fine particulate matter, environmental monitoring, Plantower PMS5003, BME280, meteorological parameters, pollution sources, statistical analysis, mathematical modeling, forecasting, Khujand.

Purpose of the research – to provide a scientific basis for an integrated approach to monitoring, assessing, and forecasting atmospheric air quality in Khujand using multi-year PM2.5 measurements, analysis of natural, climatic, and anthropogenic factors, statistical data processing, and mathematical modeling.

Object of the research: the atmospheric air basin of Khujand under the influence of natural, climatic, and anthropogenic factors.

Subject of the research: spatiotemporal variability of PM2.5 concentrations, their relationships with natural, climatic, and anthropogenic factors, the structure of pollution sources, and methods of automated monitoring, assessment, and mathematical modeling used to forecast atmospheric air quality in Khujand.

Result obtained and their novelty: an integrated approach to air quality assessment and forecasting in Khujand was substantiated, and a network of four automated monitoring sites was established. Analysis of data from 2019–2023 revealed seasonal, diurnal, and interannual variations in PM2.5 concentrations and their statistical relationships with meteorological parameters. Average winter concentrations during 2019–2022 were 4.05 times higher than summer concentrations. Major pollution sources were classified and assessed. A Gaussian dispersion model was adapted for scenario-based spatial assessment of PM2.5 pollution. For source No. 0026 of Javoni LLC, deviations between calculated and control values ranged from 14.14% to 15.99%, within the adopted model error range of 12–18%.

Recommendations for the application of research results: improve the atmospheric air quality monitoring system, expand the PM1.0, PM2.5, and PM10 monitoring network, ensure sensor verification and calibration, account for seasonal pollution patterns, and integrate emission-source data, meteorological observations, and mathematical modeling for forecasting assessments and environmental protection planning.

Field of application: environmental air quality monitoring, hydrometeorology, environmental management, urban planning, mathematical modeling, and education.

Разрешено к печати «___» _____ 2026 г.
Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитур Times New Roman.
Тираж 60 экз. Отпечатано с готового оригинала-макета.

Отпечатано в ООО «Хуросон»
г. Худжанд, проспект Рифъат Ходжиева, 18
Тел. +992 92 775 00 76