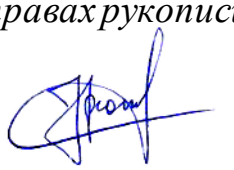
МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ И НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

по специальности 2.9.6. Экология

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, академик ИА РТ Азизов Р. О.

Душанбе - 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ 4
ВВЕДЕНИЕ 5
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЯ 9
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР ФАКТОРОВ ФОРМИРОВАНИЯ И ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА.. 16
1.1. Факторы формирования антропогенной нагрузки на атмосферный воздух города Худжанд 16
1.2. Климатические условия и их влияние на формирование качества атмосферного воздуха города Худжанд 23
1.3. Системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха 30
1.4. Воздействие загрязнения атмосферного воздуха на здоровье человека и экосистемы 41
1.5. Методы мониторинга и оценки качества атмосферного воздуха 46
Выводы по главе 1. 51
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ГОРОДА ХУДЖАНД 54
2.1. Объект, контролируемые показатели и информационная база исследования 54
2.2. Методика инструментального мониторинга качества атмосферного воздуха 59
2.2.1. Обзор методов исследования 59
2.2.2. Выбор и характеристики технических средств исследования 62
2.3. Организация системы наблюдений 68
Выводы по главе 2 73
ГЛАВА 3. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В ГОРОДЕ ХУДЖАНД 76
3.1. Метеорологические и топографические показатели г. Худжанд 78
3.2. Мониторинг качества атмосферного воздуха 83
3.3. Основные источники выбросов в атмосферу города 87
3.3.1. Промышленность 88
3.3.2. Транспорт 97
3.3.3. Выбросы парниковых газов 102

3.3.4. Бытовые выбросы.....106
3.3.5. Трансграничные выбросы.....107
Выводы по главе 3.....108
ГЛАВА 4. АНАЛИЗ, ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В г. ХУДЖАНД.....111
4.1. Обоснование и выбор метода определения качества воздуха.....111
4.2. Результаты мониторинга качества атмосферного воздуха в г. Худжанде.....113
4.3. Результаты анализа данных по итогам наблюдения.....119
4.4. Математическое моделирование процесса загрязнения атмосферного воздуха в пределах г. Худжанд.....141
4.4.1. Расчётный пример моделирования на основе параметров источника ООО «Джавони».....149
Выводы по главе 4.....153
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....156
РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ..... Ошибка! Закладка не определена.
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....159
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ..176
ПРИЛОЖЕНИЕ.....180

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АИС	Автоматизированная информационная система
АНКОС	Автоматизированная система наблюдений и контроля окружающей среды
ВОЗ	Всемирная организация здравоохранения
ВВП	Валовой внутренний продукт
ГГО	Главная геофизическая обсерватория
ГИС	Географическая информационная система
ГСМОС	Глобальная система мониторинга окружающей среды
GFS	Global Forecast System
ЕГСЭМ	Единая государственная система экологического мониторинга Российской Федерации
ЕМЕП	Европейская программа мониторинга и оценки
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ЕАОС	Европейское агентство по окружающей среде
ЕЕА	European Environment Agency
ЕРА	Агентство по охране окружающей среды США
ИК	Инфракрасное излучение
ИКВ	Индекс Качества Воздуха
ЛОС	Летучие органические соединения
НПЗ	Наблюдательный пункт за загрязнением окружающей среды
НУООА	Национальное управление по освоению океана и атмосферы
КТЗВБР	Конвенция о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния
ООН	Организация Объединённых Наций
ПДК	Предельно допустимая концентрация
ПДВ	Предельно допустимые выбросы
ПЛОС	Полулетучие органические соединения
ПЗА	Потенциал загрязнения атмосферы
ТЧ	Твердые частицы
УФ	Ультрафиолетовое излучение
ЮНЕП	Программа Организации Объединённых Наций по окружающей среде
КООС	Комитет охраны окружающей среды при Правительстве РТ
РВПЗ	Протокол о регистрах выбросов и переноса загрязнителей
ОАМ	Оптика-абсорбционный метод

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 при длительном воздействии повышать риск сердечно-сосудистых и респираторных заболеваний.

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 атмосферного 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 Худжанде 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 выросс 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.

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.

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 [29, 30], И.П. Герасимова [16], Е.В. Вениципнова [14], а также в работах, посвящённых современным методам и средствам контроля состояния окружающей среды [18, 37, 51, 76, 100].

Закономерности влияния метеорологических факторов на процессы накопления, переноса и рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере исследованы Э.Ю. Безуглой [8], А.Е. Морозовым и Н.И. Стародубцевой [50], А.Ф. Финаевым [97], а также отражены в климатологических исследованиях территории Таджикистана [7, 17, 86, 87, 88, 89, 91, 90, 91, 93, 94, 118, 144].

Вопросы формирования атмосферного аэрозоля, пылевых вторжений и распределения концентраций PM2,5 на территории Республики Таджикистан рассмотрены в работах С.Ф. Абдуллаева, С.Ф. Абдуллозода, В.А. Маслова, Б.И.

Назарова и соавторов [2, 1, 3, 4, 52, 53, 54]. 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 [6, 11, 31, 32, 33, 34, 35, 44].

Методические аспекты применения низкобюджетных оптических сенсоров для экологического мониторинга представлены в современных отечественных и зарубежных исследованиях [58, 107, 108, 113, 116, 120, 128, 135, 138, 141, 145]. Основы математического моделирования распространения загрязняющих веществ изложены в работах М.Е. Берлянда [10], С.С. Замая и О.Э. Якубайлика [28], Н.А. Соляник и соавторов [83], а также в методике ОНД-86 [48] и моделях Turner и AERMOD [146, 147].

Несмотря на значительный объём исследований, для г. Худжанда 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.

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.

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 города 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.

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

Предмет 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 атмосферного 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 города 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 городе 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

Личный вклад автора 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 страниц. Диссертация содержит 48 рисунков, 30 таблиц, список использованной литературы из 156 наименований и 20 опубликованных работ автора.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР ФАКТОРОВ ФОРМИРОВАНИЯ И ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

1.1. Факторы формирования антропогенной нагрузки на атмосферный воздух города Худжанд

В контексте настоящего исследования особое значение имеет оценка факторов, формирующих качество атмосферного воздуха непосредственно в г.Худжанд. Город является административным и промышленным центром Согдийской области, где одновременно развиваются промышленное производство, транспорт, строительство, сфера услуг и инженерная инфраструктура. Рост экономической активности сопровождается увеличением потенциальной нагрузки на атмосферный воздух, тогда как фактический уровень загрязнения определяется сочетанием мощности источников выбросов, их пространственного размещения и метеорологических условий рассеивания.

Официальные данные Программы социально-экономического развития г.Худжанд подтверждают рост производственной нагрузки. В 2025 году в городе функционировало 325 промышленных предприятий, а объём промышленного производства увеличился примерно с 1,5 млрд сомони в 2021 году до 2,1 млрд сомони в 2025 году. Одновременно расширился ассортимент выпускаемой продукции, включающий пищевое производство, текстильную и швейную промышленность, производство строительных материалов, пластмассовых и алюминиевых профилей, мебели, полиграфической продукции, электротехнического оборудования и другой продукции [71]. Для оценки качества воздуха данный процесс важен как фактор возможного роста нагрузки от стационарных источников выбросов.

Существенная динамика отмечается и в транспортно-строительном комплексе. По данным Программы развития, объём пассажирских перевозок в 2025 году по сравнению с 2021 годом увеличился примерно в 1,5 раза, а объём грузовых перевозок — в 2,3 раза. Объём капитальных вложений в строительную отрасль города в 2025 году по сравнению с 2021 годом вырос в 4,5 раза; за пятилетний период было построено и реконструировано более одной тысячи

объектов различного назначения [71]. Эти процессы могут сопровождаться увеличением интенсивности движения, расхода топлива, дорожной и строительной пыли, а также вторичного подъёма частиц с открытых поверхностей. Следовательно, при оценке воздушной среды Худжанд необходимо учитывать совокупный эффект промышленного, транспортного и строительного развития.

Для дальнейшего анализа источники загрязнения воздуха города целесообразно разделять на пять групп: 1) стационарные — промышленные предприятия, котельные и технологические установки; 2) мобильные — автомобильный и иной транспорт; 3) площадные — строительные площадки, дорожная пыль и открытые грунтовые поверхности; 4) бытовые — отопление частного сектора и открытое сжигание отходов; 5) природные — пылевые вторжения и ветровой подъём минеральной пыли. Трансграничный перенос рассматривается как дополнительный механизм поступления загрязнителей.

Опыт исследований в Таджикистане показывает, что структура вклада источников может существенно различаться между городами. В исследовании Всемирного банка по управлению качеством воздуха для Душанбе значительную роль в формировании PM2,5 играли ветровая пыль и бытовое отопление, тогда как вклад промышленности и транспорта по результатам модельного распределения был ниже [106]. Эти количественные доли не могут механически переноситься на Худжанд, поскольку города различаются по структуре застройки, промышленности, отопления, транспортной нагрузке и метеорологическим условиям.

Формирование воздушной среды современного города определяется совокупным воздействием природно-климатических условий и антропогенной деятельности. Рост промышленного производства, транспортной нагрузки, строительства, энергопотребления и бытового сжигания топлива сопровождается поступлением в атмосферу газообразных и аэрозольных загрязняющих веществ. В урбанизированных территориях характер их накопления и рассеивания определяется не только интенсивностью выбросов, но

и планировочной структурой города, рельефом, температурным режимом, скоростью ветра, влажностью и другими метеорологическими факторами. Применительно к Худжанду это означает необходимость совместного рассмотрения стационарных, мобильных, площадных и природных источников загрязнения. Поэтому оценка качества городской воздушной среды требует комплексного анализа источников антропогенной нагрузки и условий, определяющих перенос и накопление загрязняющих веществ.

Рассматривая антропогенное воздействие на биосферу, можно исходить из положения В.И. Вернадского о том, что развитие человеческого общества становится одним из факторов преобразования биосферы [15]. В условиях индустриальной и научно-технической цивилизации данное воздействие проявляется не только в прямом изъятии природных ресурсов, но и в изменении состава атмосферы, водных объектов, почвенного покрова и природных экосистем [66]. Как отмечает исследователь Белов С.В. «Безопасность жизнедеятельности человека не может рассматриваться отдельно от состояния окружающей среды, поскольку качество среды обитания является одним из ключевых условий сохранения здоровья, трудоспособности и устойчивого развития общества» [9, с. 15-16]. Следовательно, формирование воздушной среды города следует рассматривать как результат взаимодействия природных условий, антропогенной нагрузки и уровня экологического управления.

Как отмечает исследователь Фесечко А.И. «Гармония внутренних процессов организма человека, его психофизиологических качеств с ритмами окружающей (внешней) среды является твердой основой стабильной жизнедеятельности организма, то есть базисом его здоровья, безопасности и хорошего самочувствия. Влияние внешних условий сказывается в нашей повседневной жизни в некоторых случаях даже в большей степени, чем это было в прошлом. Отмечено, что при резких сменах погодных условий, космических ритмов при нормальной реактивности проявляются, прежде всего, реакции, вызванные общим «напряжением» организма» [96, стр 214]

Понятие «условия жизнедеятельности» в источниках не имеет точного универсального определения. В настоящем исследовании под условиями жизнедеятельности рассматривается совокупность факторов городской деятельности и организации территории — транспортная нагрузка, функционирование промышленных объектов, бытовое отопление, строительство, плотность и характер застройки, — способных влиять на формирование качества атмосферного воздуха. Следовательно, комфортность и качество жизни населения в значительной степени зависят от условий окружающей среды, которые формируются под воздействием природных и социальных факторов. Географическое положение, климатические условия, рельеф местности, наличие природных ресурсов, уровень развития инфраструктуры и социальные условия оказывают комплексное воздействие на здоровье, благополучие и экономическую активность населения [9].

Техногенное загрязнение затрагивает не только атмосферный воздух, но и другие компоненты окружающей среды. Исследования в зонах влияния стационарных источников показывают возможность накопления загрязняющих веществ в почвах и снежном покрове, что свидетельствует о комплексном характере антропогенного воздействия [43].

Как известно, экологические процессы не могут быть ограничены государственными границами. Экологические проблемы носят трансграничный характер [77, 79]. Выбросы промышленных предприятий, автотранспорта и других источников загрязнения могут переноситься воздушными массами на тысячи километров, вызывая кислотные дожди, смоги и другие негативные явления. Это подчеркивает необходимость международного сотрудничества в решении экологических проблем.

Вопросы трансграничного характера загрязнения атмосферного воздуха получили развитие в международной экологической политике. В частности, в рамках Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния сформировался подход, согласно которому загрязнение воздуха не может рассматриваться только как локальная проблема отдельного города или

государства [122]. Европейская программа мониторинга и оценки дальнего переноса загрязняющих веществ (EMEP), действующая под эгидой ЕЭК ООН, показывает, что «Долгосрочное наблюдение за переносом загрязнителей необходимо для оценки кислотности осадков, эвтрофикации, воздействия тяжелых металлов, стойких органических загрязнителей, а также связи загрязнения воздуха с изменением климата» [122, с. 118]. Данный подход имеет значение и для Центральной Азии, где пылевые переносы, промышленные выбросы, транспортные коридоры и метеорологические условия формируют региональные потоки загрязнения.

Загрязнение воздуха относится к ведущим экологическим факторам риска для здоровья населения. В связи с этим 27 июня 2014 года Ассамблея ООН по окружающей среде приняла резолюцию №1/7 «Укрепление роли Программы ООН по окружающей среде в обеспечении качества воздуха» [95].

Загрязнение атмосферного воздуха относится к числу ведущих экологических факторов риска для здоровья населения. По данным ВОЗ, в 2019 году 99 % населения мира проживало на территориях, где уровни качества воздуха не соответствовали рекомендациям ВОЗ; воздействие загрязнения атмосферного воздуха в городах и сельских районах стало причиной около 4,2 млн преждевременных смертей в 2019 году, а совокупное воздействие атмосферного и бытового загрязнения воздуха связано с 6,7 млн преждевременных смертей ежегодно [109]. ВОЗ также подчеркивает, что «Основными загрязнителями, представляющими угрозу для здоровья, являются PM2,5, PM10, озон, диоксид азота, диоксид серы и оксид углерода» [152, с. 72].

Экономические последствия загрязнения воздуха также имеют глобальный масштаб. По оценкам Всемирного банка «Ущерб здоровью от воздействия PM2,5 в 2019 году составил 8,1 трлн долл. США, что эквивалентно 6,1 % мирового ВВП» [143, с. 19]. Следовательно, загрязнение атмосферного воздуха следует рассматривать не только как природоохранную и санитарно-гигиеническую проблему, но и как фактор социально-экономического риска, влияющий на расходы здравоохранения, производительность труда, качество жизни населения

и устойчивость городского развития. По мнению специалистов Агентства по гидрометеорологии Республики Таджикистан «В последние годы проблема загрязнения воздуха стала одной из основных экологических проблем страны. В частности, в Вахшской и Гиссарской зонах всё чаще фиксируется высокая концентрация атмосферных выбросов» [55, 99, с 22].

Вопросы состояния атмосферы и принимаемые меры по охране атмосферного воздуха в стране нашли отражение в стратегических документах развития Республики Таджикистан [40, 55], специальных докладах о результативности экологической деятельности [59], материалах международных организаций по снижению загрязнения воздуха [47], а также в программах социально-экономического развития городов и районов республики [72].

На национальном уровне вопросы охраны атмосферного воздуха связаны с более широкими задачами устойчивого развития, экологической безопасности и перехода к «зеленой» экономике [40, 55, 92]. В Национальной стратегии развития Республики Таджикистан на период до 2030 года вопросы рационального использования природных ресурсов, снижения экологических рисков и повышения качества жизни населения рассматриваются как составные элементы устойчивого развития страны [55]. Концепция перехода Республики Таджикистан к устойчивому развитию на 2007–2030 годы также подчеркивает необходимость согласования экономического роста с экологическими ограничениями и сохранением природного потенциала [40]. В этой связи исследование формирования воздушной среды г. Худжанд имеет прикладное значение, поскольку результаты мониторинга качества воздуха могут быть использованы при разработке городских программ, природоохранных мер и решений в сфере экологического управления.

В научной литературе РТ значительное внимание уделяется изучению атмосферного аэрозоля, пылевых вторжений, химического и элементного состава аэрозольных частиц, а также их влияния на региональные климатические процессы. В работах Б.И. Назарова, С.Ф. Абдуллаева, В.А. Маслова и соавторов приведены данные о «Структуре и свойствах пылевых и аэрозолеобразующих

примесей в аридных зонах юго-восточной части Центральной Азии, динамические процессы при пылевых вторжениях, атмосферный аэрозоль Центральной Азии, сезонные изменения параметров атмосферы в г. Душанбе по данным AERONET, а также содержание элементов в пробах почв и пылевого аэрозоля Таджикистана» [2, 1, 52, 53, с. 15, 21, 67].

В последние годы в таджикской научной литературе появились работы, непосредственно посвященные мелкодисперсным частицам PM2,5. В исследованиях С.Ф. Абдуллозода, В.А. Маслова, С.Дж. Абдуллоевой и соавторов рассмотрены «Среднесуточные вариации массовой концентрации PM2,5 в атмосфере г. Душанбе за период 2014–2024 гг., а также среднедневные вариации содержания мышьяка, свинца и цинка в составе частиц атмосферного аэрозоля PM2,5 за 2014–2022 гг.» [3, с. 53]. Эти данные подтверждают необходимость долгосрочного анализа как массовой концентрации, так и состава мелкодисперсных частиц в городских условиях Таджикистана.

Исследования Х.Б. Бобоева, С.С. Шоева, С.М. Каримова, Х.Ш. Гулахмадова и соавторов посвящены «Оценке загрязнения атмосферного воздуха г. Душанбе, определению приоритетных загрязняющих веществ, анализу загрязнения в зоне влияния промышленных объектов, а также расчетным подходам к оценке рассеивания газо-пылевых выбросов» [11, 31, 32, 33, 34, 35]. В этих работах отмечается значимость стационарных и мобильных источников загрязнения, влияние промышленных объектов и транспорта на качество воздуха, а также необходимость развития системы контроля загрязняющих веществ в приземном слое атмосферного воздуха.

Дополнительное подтверждение необходимости учитывать смешанное происхождение пылевого загрязнения дают исследования, выполненные непосредственно в Худжанде и его окрестностях. В работе С.Ф. Абдуллозода, Х.И. Тиллобоева и Р.А. Джураевой по данным наблюдений 2023–2024 гг. показано, что «Наиболее заметные уровни PM10 фиксировались в отдельные периоды зимы и весны; авторы связывают наблюдаемую изменчивость с сочетанием транспортных и отопительных выбросов, неблагоприятных

метеорологических условий и поступления пустынного пылевого аэрозоля из сопредельных территорий» [5, с. 25]. Как результат, уже имеющиеся исследования по Худжанду подтверждают, что задача определения ведущего источника загрязнения должна решаться с учётом как локальной антропогенной нагрузки, так и природного и трансграничного переноса.

Таким образом, таджикские исследования в области атмосферного аэрозоля, пылевых бурь, PM2,5, промышленных выбросов и экологического мониторинга формируют важную научную основу для настоящей диссертации. Вместе с тем большинство указанных работ ориентировано преимущественно на г. Душанбе, отдельные промышленные зоны или общерегиональные аэрозольные процессы. Вопросы формирования воздушной среды г. Худжанд, сезонной динамики PM2,5 влияния метеорологических факторов и возможности применения недорогих автоматизированных сенсоров в сочетании с математическим моделированием остаются недостаточно изученными.

1.2. Климатические условия и их влияние на формирование качества атмосферного воздуха города Худжанд

Климат — это результат взаимодействия радиационных, циркуляционных процессов, круговорота воды и географических факторов, находящихся в тесной многосторонней взаимосвязи [81].

Как отмечают исследователи Братков В.В. и Воронин А.П. «Климатообразующие факторы можно разделить на внешние (астрономические и географические) и внутренние. Внешними являются факторы поглощения и преобразования солнечной радиации. Географические факторы климата, в том числе, высота над уровнем моря, географическая широта, удаленность от водных ресурсов, физическая характеристика поверхности и так далее определяют течение климатообразующих процессов в определенной местности. Внутренние факторы возникают внутри составляющей климатической системы» [12, с. 37].

В результате воздействия указанных факторов формируется климатический режим, с учетом усредненных многолетних метеорологических данных. К основным климатообразующим процессам относятся: поглощение и

преобразование солнечной радиации; атмосферная циркуляция, круговорот воды (влагооборот). Процесс поглощения и преобразования поступающей солнечной радиации и тепла входит во взаимодействие с атмосферой и создает радиационный и тепловой баланс данной местности.

Э.Ю. Безуглая рассматривает метеорологический потенциал загрязнения атмосферы как совокупность климатических условий, способствующих накоплению или рассеиванию загрязняющих веществ в городе [8]. В развитие данного подхода А.Е. Морозов и Н.И. Стародубцева отмечают, что «Метеорологические условия определяют не только скорость переноса загрязнителей, но и вертикальное перемешивание воздушных масс, устойчивость приземного слоя атмосферы, вероятность формирования инверсий и повторяемость неблагоприятных метеорологических условий» [50, с. 65].

Как отмечено в Справочнике по климату СССР «Для города Худжанд климатические характеристики имеют непосредственное значение для интерпретации концентраций мелкодисперсных частиц. Использованные в диссертации многолетние материалы метеорологических наблюдений показывают выраженный континентальный и засушливый режим. В холодный период года количество осадков составляет около 87 мм, тогда как в летние месяцы — всего около 9–11 мм» [91, с. 48].

Согласно данным сервиса pogodaiklimat.ru «По данным многолетних метеорологических наблюдений, осадки в Худжанде характеризуются межгодовой изменчивостью, а сухой летний период способствует вторичному пылеобразованию» [93].

Температурные ряды также указывают на изменение климатического фона. По данным, обобщённым для г. Худжанд, средняя температура июля за последнее десятилетие анализируемого ряда составляла около 29,33 °C, а января — около 1,58 °C; по сравнению с более длительными многолетними характеристиками отклонение оценивалось примерно в +1,68 °C для летнего и +2,60 °C для зимнего периода [93, 94, 118]. Эти изменения не являются прямой причиной антропогенных выбросов, однако они способны изменять высоту слоя

перемешивания, интенсивность испарения и высушивания поверхности, образование вторичной пыли и продолжительность периодов рассеивания.

Ветровой режим г. Худжанд определяется ориентировкой Ферганской долины и прилегающим рельефом. Ветровой режим г. Худжанд определяется ориентировкой Ферганской долины и прилегающим рельефом. Для территории города наиболее характерны ветры восточного, западного и юго-западного направлений. Среднегодовая скорость ветра, по климатическим материалам, составляет около 4–5,5 м/с. Несмотря на в целом благоприятную проветриваемость территории, в отдельные периоды слабого ветра могут формироваться условия для временного накопления загрязняющих веществ [89]. Архивные данные строительной климатологии для станции Ленинабад (Худжанд) дополнительно показывают, что «Повторяемость скоростей ветра до 1 м/с составляет около 30 % за год, скоростей 2–5 м/с — около 35 %, а скоростей 8 м/с и более — около 20 %; средняя скорость ветра за отопительный период составляет около 5,0 м/с, за три наиболее холодных месяца — 5,2 м/с» [85]. Таким образом, несмотря на в целом благоприятную проветриваемость территории, периоды слабого ветра имеют существенную повторяемость и могут создавать условия для временного накопления загрязняющих веществ. Поэтому концентраций PM2,5 должна учитывать сочетание температуры, влажности, осадков, ветрового режима и устойчивости атмосферы.

Современные документы по развитию города также прямо связывают экологические риски Худжанда с изменением климата и указывают на тенденции потепления, увеличение периодов сильной жары, изменение режима осадков и рост значимости пылевых явлений [71]. На национальном уровне Всемирный банк отмечает устойчивое повышение температуры в РТ в 1940–2020 гг., причём для равнинных территорий характерен средний темп потепления порядка 0,1–0,2 °C за десятилетие, а число дней с температурой 40 °C и выше увеличивается [156]. Данная тенденция усиливает необходимость учитывать климатический фон при оценке и прогнозировании состояния качества воздуха.

Как отмечают исследователи Абдуллозода С.Ф., Маслов В.А. и Абдуллоева С.Д. «Природная пылевая нагрузка для Худжанда подтверждается и инструментально-синоптическими исследованиями. Во время сильной пылевой бури 4 ноября 2021 года пылевой шлейф достиг Худжанда около 12:00 UTC, видимость быстро снизилась ниже 2,5 км, а затем оставалась ниже 1 км примерно семь часов; в момент прихода пылевой массы скорость ветра составляла около 10 м/с» [112, с. 35]. Анализ обратных траекторий показал перенос пылевых воздушных масс через территории Казахстана и пустынные районы Центральной Азии. Этот эпизод демонстрирует, что высокие концентрации ТЧ в Худжанде могут формироваться не только локальными источниками, но и региональным переносом, который должен учитываться при анализе мониторинговых данных. Важным климатообразующим процессом является круговорот воды, определяющий процессы испарения, влажности, облачности и осадков.

Как отмечает исследователь Братков В.В. «За счет интенсивности солнечной радиации происходит процесс обмена фотохимических примесей и возникновения вторичных продуктов загрязнения атмосферного воздуха. Как результат, объем осадков и уровень влажности напрямую влияют на процесс вымывания примесей из атмосферы. Условия переноса и распространения выбросов в атмосфере определяются характером циркуляционного режима, температурными инверсиями и их продолжительностью» [12, с. 43].

Для условий Таджикистана особое значение имеет сочетание горного рельефа, долинного расположения городов и повторяемости слабого ветрового режима. Как отмечает исследователь Финаев А.Ф. «Анализируя потенциал загрязнения атмосферы Таджикистана по сочетанию метеорологических факторов, указывал на высокую способность воздушного бассейна республики к накоплению примесей. Данное положение подтверждает необходимость рассмотрения городов Согдийской области, включая Худжанд, не только как территорий с антропогенными источниками загрязнения, но и как пространств, где природно-климатические условия могут усиливать эффект накопления загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы» [97, с. 112].

Следовательно, сезонная оценка качества воздуха должна включать анализ погодных условий, так как одинаковые объемы выбросов при различных метеорологических режимах могут формировать разные уровни загрязнения.

В научных исследованиях рассматривается влияние городской застройки на формирование и рассеивание примесей [42]. На рассеивание примесей влияет ряд факторов: планировка городских улиц, их ширина и направление, высота зданий, наличие и площадь зеленых насаждений и водных объектов.

К другим естественным и градостроительным факторам можно отнести изменяющийся температурно-радиационный, ветровой и влажностный режим крупного населенного пункта. Над городом возникают конвективные восходящие и нисходящие воздушные потоки, фиксируются туманы и погодные явления, замедляющие рассеивание загрязнителей. За счет топографических условий местности направление и скорость ветра могут меняться [115, 117].

Наряду с температурой, влажностью и ветровым режимом при моделировании загрязнения следует учитывать турбулентность атмосферы и вертикальные градиенты скорости ветра [151].

Атмосфера является постоянно изменяющейся средой, состояние которой определяется совокупностью метеорологических факторов. С учетом климатических условий уровень загрязнения воздуха может зависеть от следующих показателей:

- метео-климатический потенциал загрязнения;
- высота слоя перемешивания и рассеивания загрязнения;
- интенсивность температурных инверсий;
- застои атмосферного воздуха на различных высотах.

В Республике Таджикистан состояние атмосферного воздуха и уровень его загрязнения зависят от техногенных и природно-климатических факторов. Географическое расположение и горный рельеф создают особые условия загрязнения воздушного бассейна [97]. Этим объясняются значительные суточные и сезонные колебания погодных условий на территории страны.

В Центральноазиатском регионе главными климатическими особенностями являются: сухость, большая солнечная радиация, резкие колебания годового и суточного изменения температур, запыленность воздуха. Распределение осадков по территории крайне неравномерно. В то время как в долинах годовое количество осадков редко превышает 600 мм, в горных районах этот показатель может достигать 1600 мм. Зимне-весенний период характеризуется наибольшим количеством осадков [91].

Ветровой режим определяется общей и горнодолинной циркуляцией атмосферы под влиянием рельефа. Зимой преобладают горные ветра, направленные вниз по склонам и долинам. Средняя скорость ветра изменяется в широких пределах - от 0,8 до 6,0 м/с и зависит от годового хода атмосферной циркуляции, а также места расположения населенного пункта [67].

Большое разнообразие рельефа, также влияет на повторяемость штилей. Наибольшее количество штилей отмечается в замкнутых котловинах и под склонами гор, а минимум повторяемости наблюдается на горных хребтах. В открытых широких долинах она колеблется от 18 до 28 процентов. Штили до 1 м/сек. обычны для долин Таджикистана в утренние и вечерние часы.

В Таджикистане преобладает воздух умеренных широт. Летом преобладает тропический воздух, а в летнее и зимнее время - воздух умеренных широт [88].

Величина переноса и рассеивания загрязнителей зависит от потенциала загрязнения атмосферы (ПЗА). В 60-е годы начали использовать комплексные метеорологические показатели для оценки этих процессов [129].

Отмечается, что в последние годы применение ПЗА стало затруднительным на фоне климатических изменений и изменений нормативно-правовой базы в сфере ООС и атмосферного воздуха. Это привело к тому, что вырабатываются другие модели оценки потенциала загрязнения [140].

Проведенный в 80-е годы обзор и анализ физико-географических условий, влияющих на накопление примесей в атмосфере на территории страны, показали высокую способность воздушного бассейна к накоплению примесей [97].

Можно констатировать, что на территории Республики Таджикистан качество атмосферного воздуха и уровень его загрязнения зависят как от техногенных факторов, так и от природно-климатических условий ее расположения, влияния процесса глобального изменения климата планеты, который стал особенно актуальным в последние годы [50].

Таджикистан относится к числу стран, наиболее уязвимых к последствиям изменения климата, несмотря на сравнительно небольшой вклад в глобальные выбросы парниковых газов. В Докладе Всемирного банка по климату и развитию Таджикистана 2024 года изменение климата рассматривается как фактор, способный усиливать риски экстремальной жары, засух, деградации земель и загрязнения воздуха, а также создавать дополнительную нагрузку на городскую инфраструктуру [156]. Дополнительным экологическим аспектом атмосферного загрязнения в горных регионах Центральной Азии является перенос и осаждение светопоглощающих аэрозольных частиц на снежном и ледниковом покрове. Чёрный углерод, образующийся при неполном сгорании топлива и биомассы, а также некоторые виды минеральной пыли способны снижать отражательную способность поверхности снега (альбедо), увеличивать поглощение солнечной радиации и усиливать процессы таяния. Для оценки качества воздуха в Худжанде это означает необходимость учитывать климатические тенденции прежде всего через их влияние на метеорологические условия накопления, вторичного пылеобразования, переноса и рассеивания загрязняющих веществ.

По прогнозам специалистов, в стране наблюдаются более частые и интенсивные экстремальные погодные явления, изменение характера осадков и усиление засухи. Ожидается увеличение числа дней с экстремально высокой температурой и продолжительных тепловых волн, что негативно повлияет на качество атмосферного воздуха и уровень его загрязнения [7, 17].

Согласно шестому оценочному докладу МГЭИК «Изменение климата проявляется не только через рост средних температур, но и через увеличение частоты и интенсивности экстремальных явлений, изменение режима осадков, засушливости и тепловых волн» [117]. Для Центральной Азии эти процессы

имеют особое значение, поскольку регион отличается континентальностью климата, дефицитом влаги, высокой запыленностью и зависимостью городских экосистем от локальных циркуляционных условий. Как нами отмечено ранее «Изменение климата в регионе всё чаще проявляется через сочетание жары, пыльных переносов, ухудшения видимости, роста нагрузки на дыхательную систему и снижения качества жизни населения» [45, с. 8]. В условиях г. Худжанд такие факторы могут усиливать сезонные колебания PM2,5 и PM10, особенно в периоды пыльных бурь, температурных инверсий и слабого ветра.

1.3. Системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха

1971 год стал годом начала обсуждения научными кругами вопроса организации экологического мониторинга. Истоки понятия "мониторинг окружающей среды" уходят корнями в Стокгольмскую конференцию 1972 года, где Р. Манн предложил «Рассматривать мониторинг как систему регулярных наблюдений за состоянием природных объектов. Данное определение подчеркивает многоаспектный характер мониторинга, охватывающий как пространственные, так и временные изменения. Данный подход, основанный на научных принципах, позволяет разрабатывать эффективные меры по охране окружающей среды» [21, с. 48-49].

Правовые основы экологического мониторинга в Республике Таджикистан определяются законами «Об охране окружающей среды» и «Об экологическом мониторинге» [26, 27]: - ***«Мониторинг окружающей среды»*** («экологический мониторинг») - комплексная система наблюдений, оценки и прогноза изменений состояния окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов. По определению системы экологического мониторинга даётся следующее: ***«Система экологического мониторинга»*** – многоцелевая и многокомпонентная информационная структура, формирующаяся посредством объединения отдельных подсистем, информационно-измерительных и информационно-вычислительных комплексов, взаимосвязанных друг с другом

общностью целей, общими требованиями к организации и проведению наблюдений, к обобщению и интеграции получаемых данных [57];

Мониторинг имеет три основных направления (рисунок 1.1): наблюдение за факторами воздействия и состоянием окружающей среды; оценку фактического ее состояния; прогноз и оценку прогнозируемого состояния.

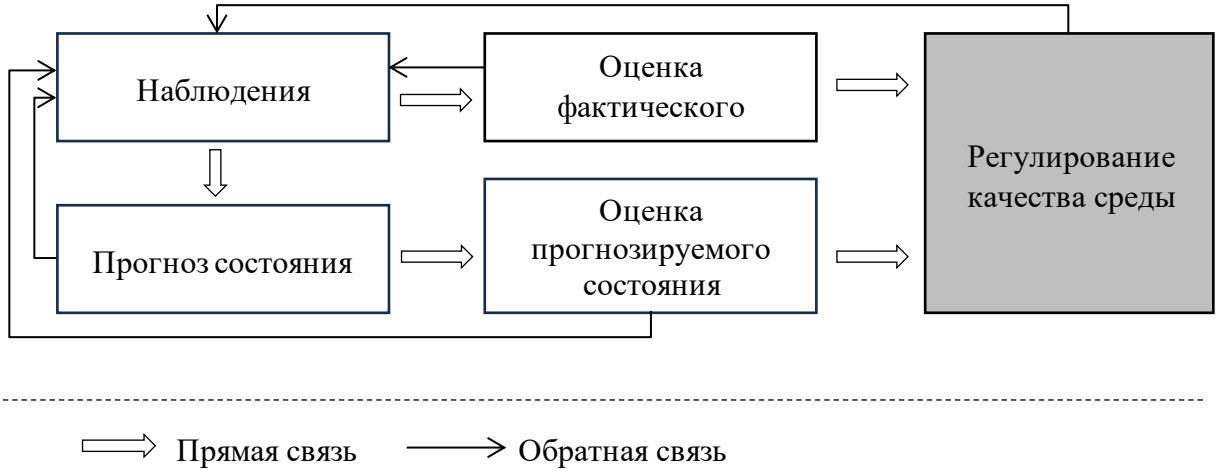


Рисунок 1.1. – Блок-схема системы мониторинга

Система мониторинга учитывает процедуры определения объекта наблюдения, обследование объекта, разработку информационной модели объекта, планирование определенных измерений, оценку и идентификацию модели объекта, прогнозирование и представление информации пользователю.

Структура системы мониторинга приведена на рисунке 1.2 [19]

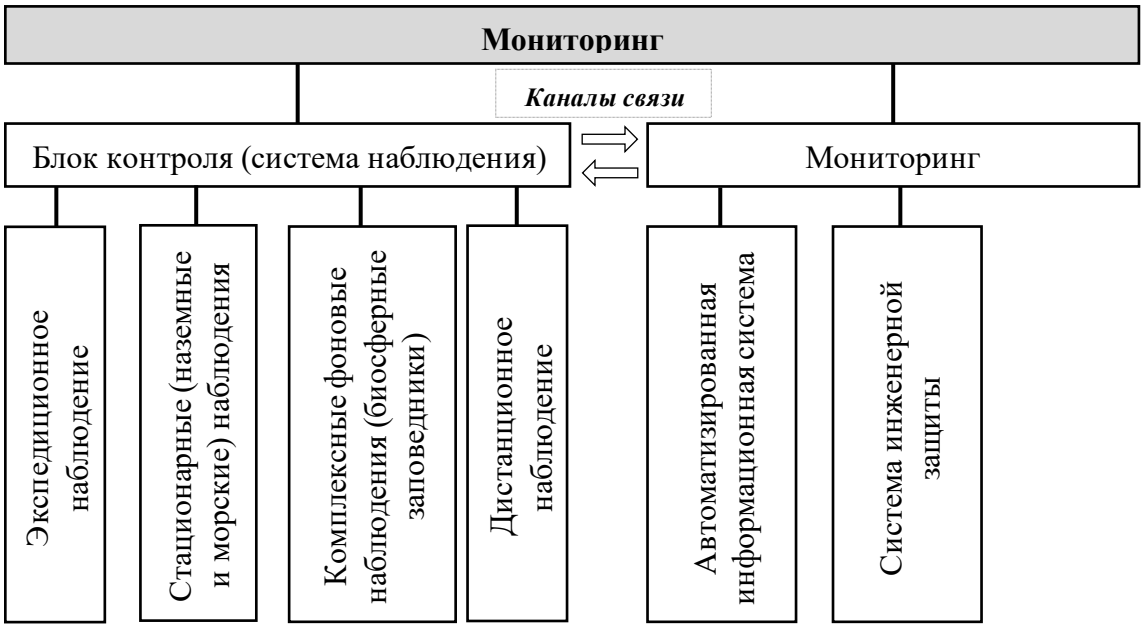


Рисунок 1.2 – Структура мониторинга

По рис.1.2 основная часть мониторинга отведена блоку контроля и управления. Эти блоки имеют каналы передачи данных между собой.

Структура экологического мониторинга зависит от автоматизированной информационной системы (АИС), которая хранит, ищет и обрабатывает данные о состоянии ОС, прогнозирует её изменения и решает задачи по экологическому управлению. В свою очередь, полученные данные в режиме реального времени отображаются на карте через ГИС технологии [98].

Как отмечают исследователи Розумная Л.А. и Кураева О.П. «Рассматривать мониторинг как систему регулярных наблюдений за состоянием природных объектов. Данное определение подчеркивает многоаспектный характер мониторинга, охватывающий как пространственные, так и временные изменения. Данный подход, основанный на научных принципах, позволяет разрабатывать эффективные меры по охране окружающей среды» [78, с.82]

Как отмечает исследователь Ю.А. Израэль «Экологический мониторинг можно рассматривать как систему наблюдений, оценки и прогноза изменений состояния природной среды под воздействием факторов» [29, с. 17-18]. И.П. Герасимов, развивая представления о наземном мониторинге окружающей среды, выделял уровни наблюдений, связанные с санитарно-гигиеническими, хозяйственными и биосферными задачами [16]. Данные подходы сохраняют актуальность и для мониторинга воздуха, поскольку современная система должна не только фиксировать концентрации загрязняющих веществ, но и обеспечивать интерпретацию данных, выявление источников, прогнозирование и информационную поддержку управленческих решений.

Имеются различные геоинформационные платформы и проекты, основанные на сборе, обработке динамических метеорологических данных, которые выявляют причины и информируют о загрязнении воздуха:

Проект «Windy» – разработан на основе открытых источников программы Earth, с использованием данных с Meteoblue. Ресурс предоставляет данные по мониторингу ветра, температуры, осадков и т. д. [154].

Проект «World Air Quality Index» – предоставляет данные о качестве воздуха для большого количества стран и городов. Источниками данных являются природоохранные ведомства, станции мониторинга и партнеры [155].

Проект «BreezoMeter» - мониторит за загрязнением атмосферного воздуха, распространения пыльцевых аллергенов и масштабных возгораний. После приобретения компанией Google соответствующие технологии получили развитие в составе сервисов Google Maps Platform [111].

Проект «IQAirmap» – платформа по сбору, обработке и визуализации данных. Имеет систему рейтинга стран и городов по качеству воздуха. Структура мониторинга базируется на таких элементах как: объект мониторинга; производственная работа с учетом базы мониторинга; система научно-методических разработок; система технического обеспечения [132].

Международная практика показывает, что «Развитие мониторинга качества воздуха постепенно переходит от отдельных пунктов наблюдения к интегрированным системам управления данными. Программа GEMS/AIR, развивавшаяся под эгидой ВОЗ и ЮНЕП, стала одним из ранних примеров международной системы городского мониторинга качества воздуха, в которой особое внимание уделялось сопоставимости данных, методологии наблюдений и процедурам обеспечения качества» [115, 142]. В современных условиях аналогичные задачи решаются через цифровые платформы, открытые базы данных и системы управления данными качества воздуха. Как отмечают Исследователи Х. Алимов, G. Bathan-Baterina, R. Biggs, «Сбор данных является только начальным этапом; не менее важны выбор датчиков, их размещение, калибровка, хранение и открытый обмен данными» [108, с. 11].

В этом контексте особое значение приобретают открытые системы управления данными, включая инициативу COMPASS, ориентированную на создание доступной DMS-платформы для пользователей, испытывающих дефицит технических и финансовых ресурсов. Следовательно, для РТ развитие мониторинга воздуха должно включать не только расширение числа постов наблюдения, но и создание устойчивой системы управления данными.

Важно отметить, что система экологического мониторинга включает наблюдения за состоянием биосферы и антропогенными воздействиями. Данная система не может напрямую управлять источниками выбросов, но предоставляет важные данные для принятия экологических решений, основанных на анализе и прогнозировании собранных данных.

Классификация системы экологического мониторинга производится в зависимости от используемых подходов по решению задач, по уровню организации и по природной среде, а также является условной (таблица 1.1) [16].

Системы экологического мониторинга классифицируются по методам наблюдения (инструментальные измерения, дистанционная съёмка, косвенная индикация), объектам контроля (атмосферный воздух, вода, почва, радиационные и другие физические факторы), пространственному масштабу, характеру воздействия и целям мониторинга, включая оценку состояния окружающей среды, выявление изменений и прогнозирование.

Таблица 1.1. – Система наземного мониторинга окружающей среды по И.П. Герасимову

Объекты	Характеристика	Службы и опорные базы
Биологический (санитарный)		
Приземной слой атмосферы	ПДК токсичных веществ. Физические и биологические загрязнители. (шум, аллергены и др.)	Гидро-метеорическая, водохозяйственная, санитарно-эпидемиологическая.
Поверхностные и подземные воды, промышленные и бытовые стоки и выбросы		
Радиоактивные излучения	Предельная степень радиоизлучения	
Геосистемный (хозяйственный)		
Исчезающие виды животных и растений	Функциональная структура природных экосистем	Гидро-метеорическая, водохозяйственная, санитарно-эпидемиологическая.
Природные экосистемы	Популяционное состояние растений и животных	
Агросистемы	Урожайность сельхоз культур	
Лесные экосистемы	Продуктивность насаждений	
Биосферный (глобальный)		
Атмосфера (тропосфера) и озоновый слой	Радиационный баланс, тепловой перегрев, газовый состав и запыление	Международные биосферные станции
Гидросфера	Загрязнение больших рек и водоёмов, водные бассейны, круговорот воды на обширных водосборах и континентах.	
Растительный и почвенный покровы, животное население	Глобальные характеристики состояния почв, растительного покрова и животных. Глобальный баланс CO_2 и O_2.	

По утверждению Ю.А. Израэля «Мониторинг представляет собой систему наблюдений за изменениями биосферы под антропогенным влиянием. Его целью является предупреждение негативных последствий воздействия человека на природу» [29, с. 29]. (таблица1.2).

Таблица 1.2. – Классификация экологического мониторинга по Ю.А. Израэлю

<table>
<tr><th colspan="5">Мониторинг источников воздействия
Источник воздействия</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Мониторинг факторов воздействия</td><td colspan="4">Факторы воздействия</td></tr>
<tr><td>Физические</td><td colspan="2">Биологические</td><td>Химические</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Мониторинг состояния биосферы</td><td>Атмосфера</td><td>Океан</td><td>Поверхность суши с реками, подземные воды</td><td>Биота</td></tr>
<tr><td colspan="3">Геофизический мониторинг</td><td>Биологический мониторинг</td></tr>
</table>

В таблице 1.2 представлена классификация экологического мониторинга, охватывающая наблюдения за изменениями абиотической части биосферы и реакцией экосистемы. Мониторинг включает геофизические и биологические аспекты, определяющие разнообразие методов исследований [14].

Как отмечают исследователи Розумная Л.А. и Кураева О.П. «Перечень веществ, по которым проводится анализ, устанавливается на основе сведений о составе и характере выбросов от источников загрязнения в городе и метеорологических условий рассеивания примесей. Определяются вещества, которые выбрасываются предприятиями города, и оценивается возможность превышения ПДК этих веществ. В результате составляется список веществ, подлежащих контролю в первую очередь. При осуществлении экологического мониторинга с помощью инструментальных методов анализа на региональном уровне создается автоматизированная система контроля загрязнения воздуха в промышленном регионе или на нескольких предприятиях. Такая система контроля позволяет получить по каналам связи непрерывную информацию о концентрации примесей» [78, с. 85]

На основе классификации систем мониторинга их можно разделить по методам ведения, объектам наблюдения, по масштабам обобщения данных, по источнику организации мониторинга и по применяемым методам.

В научной литературе объектами наблюдения являются *климатический, биосферный, генетический, мониторинг океана и источников загрязнения* [13].
По масштабам обобщения данных мониторинг делится на: *локальный, точечный, национальный, региональный и глобальный*.
По организации - *на государственный, производственный и общественный*.

Государственная система экологического мониторинга производит мониторинг, оценку и прогноз состояния окружающей среды за свой счет с целью обеспечения экологических оснований процесса принятия решений.

Производственный мониторинг проводится за счет собственников производственных объектов, которые оказывают антропогенное влияние на окружающую природную среду с учетом фиксации изменений индикаторов.

Общественный экологический мониторинг осуществляется по инициативе общественных организаций и граждан. Он предоставляет важную информацию о состоянии окружающей среды, которая используется для принятия обоснованных экологических решений. Этот вид мониторинга играет ключевую роль в повышении осведомленности населения и вовлечении его в процессы охраны природы.

Исходя из поставленных задач, методы мониторинга могут различаться и их можно разделить следующим образом:

- Эколого-аналитический;
- Химический метод наблюдения за химическим составом атмосферы, воды, осадков, донных отложений, почв, растительности и животных;
- Физическое наблюдение направлено на выявление влияния физических процессов и факторов на окружающую среду;
- Биологический мониторинг;
- Экобиохимический мониторинг химической и биологической оценки.

После Стокгольмской конференции ООН 1972 года получили развитие международные инициативы систематического наблюдения за состоянием окружающей среды, включая Глобальную систему мониторинга окружающей среды (ГСМОС). Их основными направлениями стали координация

национальных наблюдательных сетей, унификация методов измерений, сбор и анализ экологических данных, а также международный обмен информацией [56].

В каждой стране глобальный мониторинг ведется в рамках национальной Программы, которая формируется на основе определения приоритетных загрязняющих веществ и соответствующих их характеристик.

Мониторинг состояния атмосферного воздуха выступает важным компонентом экологического мониторинга. Данный мониторинг производит систематическое измерение концентрации загрязняющих веществ в воздухе и оценивает уровень их влияния на окружающую среду, включая людей, животных и растения, так же как определение местоположения и идентификацию источника загрязнения. В Таджикистане за мониторинг атмосферного воздуха отвечает КООС и Агентства гидрометеорологии.

Основными задачами государственного мониторинга воздуха являются:

1. Мониторинг загрязнения воздуха и распределение загрязняющих веществ в пространстве и во времени, выявление и контроль источников выбросов;
2. Предоставление заинтересованным организациям экстренной и системной информации об изменении уровня загрязнения атмосферы, ее изменению, прогнозам и предупреждению о возможных изменениях показателей.

Как отмечено в сообщении Европейской комиссии к Европейскому парламенту «По всему миру качество воздуха является одним из наиболее актуальных вопросов экологической политики. Основное внимание уделяется проблеме загрязнения твердыми частицами (PM10 и PM2,5) и приземным озоном. Загрязнение воздуха мелкими частицами представляет наибольшую опасность здоровью населения. Опасность для здоровья человека от загрязнения воздуха мелкими частицами PM2,5 значительно выше, чем опасность от других загрязняющих веществ» [84, с 12].

В наиболее развитых странах мира существуют различные национальные и международные системы мониторинга атмосферного воздуха. Они отличаются по степени разветвленности, площади охвата территории, количеством наблюдательных постов, методами и постановкой задач.

Как отмечено в руководстве по обзору методологии GEMS/AIR «Программа ГСМОС/ВОЗДУХ (закрыта в 1996 году) была единственной глобальной инициативой по долгосрочному мониторингу качества атмосферного воздуха в городах развивающихся стран. Она оценивала уровень загрязнения, тенденции его изменения и возможности городов контролировать загрязнение воздуха» [142].

Различные программы ВОЗ, «Здоровые города» и др. Производится сбор и анализ данных по качеству воздуха с учетом исследования динамики изменений на уровне городов [137].

В Европейском Союзе проблема загрязнения атмосферного воздуха является приоритетной среди экологических вопросов. В рамках стратегии по управлению качеством воздуха реализуются различные проекты и мероприятия по снижению концентрации озона и ТЧ в атмосферном воздухе [84, 136].

Европейское агентство по окружающей среде (ЕАОС), созданное в 1990 году и действующее с 1994 года, обеспечивает сбор, обработку и распространение экологической информации в странах Европы. В области качества атмосферного воздуха агентство содействует интеграции национальных данных мониторинга, оценке тенденций загрязнения и информационному обеспечению природоохранной политики [125].

Также в рамках «Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния», реализуется особая Международная Программа мониторинга и оценки дальних переносов загрязнителей [122].

Как отмечено в отчётах Агентства по охране окружающей среды США «В Стратегической программе США, Агентства по охране окружающей среды США (EPA) на период 2006–2011 гг. одной из пяти главных задач была определена цель «Чистый воздух и глобальное изменение климата». Озон, PM2,5 и токсические загрязняющие вещества были определены как приоритетные загрязнители» [148, с. 19].

В настоящее время разработан и широко внедрен показатель нормированных загрязнителей. Эту работу осуществило EPA с привлечением специалистов Национального управления по освоению океана и атмосферы

(НУООА) и Национального бюро стандартов. Показатель нормированных загрязнителей представляет собой комбинированный показатель ежедневного загрязнения атмосферы, и он показывает их соответствие установленным стандартам качества воздуха.

Согласно данным Метеорологического агентства Японии «В Японии национальная сеть мониторинга воздуха сеть мониторинга воздуха включает в себя промышленные центры, сельские регионы, сравнительно безопасные в экологическом отношении. По данным Министерства окружающей среды Японии, на конец 2024 финансового года национальная сеть включала 1724 пункта, из которых 1353 предназначались для общего мониторинга качества воздуха, а 371 — для контроля загрязнения от автотранспорта» [134, с.17].

В 90-е годы прошлого века была создана Единая государственная система экологического мониторинга Российской Федерации (ЕГСЭМ). С 2002 года вместо ЕГСЭМ действуют только ведомственные сети мониторинга, которые имеют 668 станций в 247 городах Российской Федерации [41, 60].

В Республике Таджикистан мониторинг загрязнения атмосферного воздуха начал проводиться с 1963 года. До государственной независимости наблюдения осуществлялись на уровне семи городов посредством 21 наблюдательного пункта за загрязнением окружающей среды (НПЗ). Они определяли 21 вид загрязняющих веществ, включая тяжелые металлы. Из 21 НПЗ 7 располагались в г. Душанбе, в г. Худжанд – 3, в г. Курган-Тюбе – 3, в г. Яван – 2, в г. Куляб – 1, в г. Турсунзаде – 3 и в г. Сарбанд – 1. Помимо этого, с целью более детального изучения загрязнения атмосферного воздуха периодически проводились маршрутные и локальные наблюдения с использованием мобильной лаборатории «Атмосфера-2» [82].

В 1990-е годы вследствие социально-экономических трудностей сеть государственного мониторинга загрязнения атмосферного воздуха существенно сократилась. Согласно материалам Четвёртого экологического обзора Таджикистана, по состоянию на ноябрь 2023 года государственные наблюдения осуществлялись в ряде городов, включая Душанбе, Худжанд, Бохтар, Гулистон

и Турсунзаде, однако автоматизация и пространственный охват сети оставались ограниченными [126]. В 2026 году Агентство по гидрометеорологии сообщило о расширении сети автоматизированных наблюдений и запуске национальной онлайн-платформы качества воздуха [99].

Как указано в докладе ЦАКП «В Республике Таджикистан, нигде кроме г.Душанбе, практически не осуществляется определение содержания PM2,5 и приземного озона (O3) в атмосферном воздухе. В ограниченном объеме осуществляется мониторинг выбросов оксида азота, сернистого ангидрида, оксида углерода, фтористого водорода и твердых частиц в атмосферном воздухе» [82, с. 15]. В публичных ежедневных отчётах для пункта Худжанд приводятся данные по NO2, SO2 и пыли, тогда как фракции PM1, PM2,5 и PM10 для этого пункта в таблице регулярной отчётности не указаны [126]. При этом именно PM2,5 и PM10 являются ключевыми индикаторами воздействия мелкодисперсного аэрозоля на здоровье населения. Это подтверждает необходимость дополнительной распределённой системы наблюдений, способной обеспечить более высокое пространственное и временное разрешение данных по твердым частицам.

Недостаточный охват мониторинговой сети ограничивает возможность объективной оценки сезонной и пространственной динамики загрязнения воздуха. Один государственный пункт не позволяет в полной мере отразить различия между промышленными зонами, транспортными коридорами, жилой застройкой и районами, подверженными воздействию природной пыли. Четвёртый экологический обзор Таджикистана также подчёркивает необходимость модернизации инвентаризации выбросов, расширения мониторинга и усиления наблюдений за песчаными и пылевыми бурями [126]. Международный опыт показывает, что в таких условиях целесообразно сочетать государственные стационарные наблюдения, автоматизированные сенсорные сети, общественный мониторинг, метеорологические данные и геоинформационные платформы [19, 64, 108, 132]. Для г. Худжанд такой подход является особенно актуальным.

1.4. Воздействие загрязнения атмосферного воздуха на здоровье человека и экосистемы

Качество атмосферного воздуха характеризуется свойствами атмосферы, которые определяют влияние физических, химических и биологических факторов на людей, флору и фауну, а также на материалы, конструкции и окружающую среду [36].

Атмосфера служит надежной защитой от вредных космических излучений, определяет климат данной местности и планеты в целом, оказывает решающее воздействие на здоровье людей, их трудоспособность, жизнедеятельность растительного и животного мира. Атмосферный воздух выполняет также геологические, экологические, терморегулирующие, защитные, хозяйственные и другие функции. Закон РТ «Об охране атмосферного воздуха» даёт следующее определение:

Загрязнение атмосферного воздуха – это поступление в атмосферный воздух, нахождение и возникновение в нем загрязняющих окружающую среду веществ, имеющих вредные свойства, местоположение или количество которых приводят к отрицательным изменениям качества атмосферного воздуха, в том числе к превышению нормативов в области охраны атмосферного воздуха.

Качество атмосферного воздуха – состояние воздуха, характеризующееся химическими, биологическими, иными показателями или их совокупностью.

Различают следующие виды воздействия загрязнения воздуха на людей и окружающую среду: угроза здоровью человека; вред растениям, животным и экосистемам планеты в целом; производство продуктов питания; экономический ущерб; глобальные проблемы. Воздействие на здоровье человека. Загрязненный воздух негативно влияет на здоровье человека и окружающую среду. Высокие уровни озона, двуокиси азота, двуокиси серы и мелких частиц (особенно PM2,5) представляют серьёзную угрозу для здоровья [114].

Современные рекомендации ВОЗ по качеству воздуха подтверждают, что риски для здоровья населения сохраняются даже при более низких концентрациях загрязнителей, чем предполагалось ранее [152]. ВОЗ установила

«Рекомендуемое среднегодовое значение для PM2,5 на уровне 5 мкг/м³, для PM10 — 15 мкг/м³, для NO_2 — 10 мкг/м³, а также определила ориентиры для озона, SO_2 и CO»[152, с. 22]. Это имеет принципиальное значение для оценки качества воздуха в городах ЦА, где фактические концентрации PM2,5 нередко многократно превышают данные ориентиры. Например, по данным IQAir «Среднегодовая концентрация PM2,5 в Таджикистане в 2024 году составила 46,3 мкг/м³, что более чем в 9 раз превышает рекомендуемый ВОЗ уровень 5 мкг/м³ [102, с. 23-24]. Указанное обстоятельство подтверждает необходимость систематического мониторинга мелкодисперсных частиц в городах страны.

Атмосферные загрязнители имеют широкий спектр отрицательного воздействия на здоровье человека. Они могут вызывать кашель, трудности дыхания, дополнительную нагрузку на легкие, сердце и в целом на организм и приводить вплоть до летального исхода. Только при сгорании бензина, выделяется более 200 загрязняющих веществ таких как оксид углерода, свинец, углеводороды, сероводород, окислы азота и др. Выбросы окислов азота провоцируют увеличение заболеваний легких и могут разъедать слизистые оболочки глаз, легких, способствуют образованию ядовитых туманов.

При солнечном свете углеводороды образуют сухой смог из канцерогенных веществ. Диоксид серы (SO_2), взаимодействуя с влагой, образует серную кислоту (H_2SO_4), которая разрушает легочную ткань. Особенно опасен диоксид серы, когда он проникает в дыхательные пути. Пыль с диоксидом кремния (SiO_2) вызывает силикоз — заболевание легких.

Наиболее опасны твердые частицы (PM) размером менее 5 мкм, которые могут проникать в лимфатические узлы и оседать в альвеолах легких. Выбросы, содержащие мышьяк, кобальт, фосфор, свинец, бензапирен, кадмий и другие вещества, могут вызывать онкологические заболевания, повреждать кроветворную систему и снижать иммунитет.

В соответствии с последними оценками ВОЗ, подверженность влиянию загрязненного воздуха, является более важным фактором риска для основных неинфекционных заболеваний, чем считалось ранее [63, 105].

Экономический ущерб от загрязнения воздуха. Загрязнение воздуха влияет на экономику несколькими способами: оно приводит к человеческим жертвам, снижает трудоспособность людей, влияет на жизненно важные продукты, наносит ущерб культурным и историческим памятникам, снижает способность экосистем выполнять функции и увеличивает затраты на восстановление экосистем.

По оценке ВОЗ, стоимость затрат на медицинские услуги и потери производительности труда в результате загрязнения воздуха в Европейском регионе составляет 1,6 трлн.долл.США. В 2015 году был оценен годовой экономический ущерб от преждевременной смертности и заболеваемости из-за загрязнения воздуха. В 44 странах Европейского региона ВОЗ этот ущерб составил 1% ВВП [121].

Европейское исследование 2000г. показало, что экономические потери, из-за воздействия озона на 23 сельскохозяйственные культуры составили 6,7 млрд.евро. По данным ВБ, только в 2019г. потери обошлись мировой экономике в 8,1 трлн. долл. США, что эквивалентно 6,1% мирового ВВП [143].

По утверждению Сидоренко В.Н. «Экономический ущерб в России от негативного влияния загрязненной ОС на здоровье жителей страны составляет 3,2−5,9% от ВВП, т.е. больше бюджета системы здравоохранения и охраны окружающей среды [80, с. 11-12].

Экономическая оценка последствий загрязнения воздуха важна не только на глобальном, но и на национальном уровне. Ранее нами отмечено, что «Качество воздуха рассматривается как макроэкономический риск для РТ, поскольку воздействие PM2,5 связано с расходами системы здравоохранения, потерей производительности труда, снижением учебной и трудовой активности, а также потерями в сельском хозяйстве, энергетике и городском развитии» [44, с. 31-32]. Согласно приведенным оценкам, расходы здоровья и потери производительности, связанные с загрязнением воздуха, могут быть сопоставимы примерно с 4% национального ВВП, что делает проблему качества воздуха значимой для экономического планирования и политики [44].

Загрязнение воздуха, включая выбросы серы, азота и приземного озона, негативно влияет на экосистемы, нарушая их функционирование и рост. Диоксид серы и оксид азота, выпадая в виде кислотных дождей, повышают кислотность воды, почвы и растительности, что вредно для флоры и фауны. Это нарушает круговорот питательных веществ, углерода и водоснабжения.

Воздействие взвешенных частиц на растительность проявляется через их осаждение на поверхности листьев и последующее взаимодействие с растительными тканями. При значительной пылевой нагрузке накопление частиц на листовой поверхности может ограничивать поступление солнечной радиации, нарушать газообмен и снижать интенсивность фотосинтеза. Характер воздействия зависит от размера, количества и химического состава частиц, особенностей растительных видов и продолжительности экспозиции. Для городских условий особое значение имеют зелёные насаждения, выполняющие функции регулирования микроклимата, задерживания атмосферной пыли и поддержания экологической устойчивости городской среды.

Приземной озон повреждает клеточные мембраны растений, подавляя их рост и развитие, что приводит к потере растительного покрова. Эвтрофикация, вызванная накоплением азота в водоемах, приводит к цветению водорослей и потере кислорода, из-за чего деградируют экосистемы и их биоразнообразие.

Воздействие загрязнения воздуха на экосистемы проявляется не только через здоровье населения, но и через снижение устойчивости растительности, сельскохозяйственных культур и водных экосистем. В рамках Международной совместной программы ЕЭК ООН по воздействию загрязнения воздуха на естественную растительность и сельскохозяйственные культуры (ICP Vegetation) установлено, что «Приземный озон, образующийся в результате фотохимических реакций с участием оксидов азота и других загрязнителей, снижает продуктивность растений и может вызывать потери урожая сои на 6–16 %, пшеницы — на 7–12 %, кукурузы — на 3–5 %» [131, с. 85]. Международная программа ICP Waters, в свою очередь, оценивает влияние загрязнителей на реки и озера, включая процессы подкисления, поступление тяжелых металлов и

стойких органических загрязнителей [130]. Эти данные показывают, что загрязнение воздуха является комплексным фактором риска для здоровья, биоразнообразия, продовольственной безопасности и водных экосистем.

Загрязнение воздуха и производство продуктов питания. Загрязнение атмосферного воздуха оказывает влияние не только на здоровье населения и состояние экосистем, но и на продуктивность сельскохозяйственных культур. Особое значение имеет приземный озон, являющийся вторичным загрязнителем и образующийся в результате фотохимических реакций с участием оксидов азота и летучих органических соединений под воздействием солнечного излучения. Поступая в листья растений преимущественно через устьица, озон нарушает процессы фотосинтеза, ускоряет старение тканей и может приводить к снижению урожайности.

Исследования в рамках Международной совместной программы ЕЭК ООН по воздействию загрязнения воздуха на естественную растительность и сельскохозяйственные культуры (ICP Vegetation) показывают, что «Чувствительность сельскохозяйственных культур к озону существенно различается. Относительные глобальные потери урожая вследствие воздействия приземного озона оцениваются для сои в пределах 6–16 %, пшеницы — 7–12 %, кукурузы — 3–5 %» [39, с. 12]. Таким образом, снижение концентраций загрязнителей — предшественников приземного озона имеет значение не только для улучшения качества атмосферного воздуха, но и для обеспечения устойчивости сельскохозяйственного производства.

Изменение климатических условий также способно влиять на качество атмосферного воздуха. Повышение температуры, учащение периодов жары и засушливости, изменение режима осадков и условий атмосферной циркуляции могут изменять интенсивность образования, переноса, накопления и удаления загрязняющих веществ [25, 27]. Для условий Таджикистана данные процессы имеют особое значение вследствие континентального климата, высокой запылённости и выраженной зависимости качества воздуха от метеорологических условий.

Кислотные дожди — это группа подкисленных атмосферных осадков в виде снегопада, росы, ливней, дождей и тумана с показателем pH меньше 5,6. В природе не существует воды с нейтральной реакцией. Основной причиной возникновения кислотных дождей считаются двуокиси азота и серы, накапливающиеся в воздушной оболочке земли. В результате химических реакций эти элементы образуют кислоты, выпадающие в виде осадков [22].

Загрязнение атмосферного воздуха может воздействовать на животный мир как непосредственно, через вдыхание загрязнённого воздуха, так и опосредованно — посредством поступления загрязняющих веществ в почву, воду и пищевые цепи. Научные исследования указывают на возможные нарушения физиологического состояния, репродуктивных процессов и выживаемости отдельных видов птиц в условиях атмосферного загрязнения. Для водных экосистем существенное значение имеет сухое и влажное осаждение соединений серы, азота и других компонентов атмосферных примесей, способных изменять химические характеристики водной среды [130]. Применительно к Худжанду данные процессы обосновывают необходимость дальнейшего изучения потенциального атмосферного воздействия на городские зелёные территории, прибрежные экосистемы Сырдарьи и связанные с ними сообщества живых организмов.

Как отмечено в отчётах ВОЗ «Смог является формой интенсивного загрязнения приземного воздуха, возникающей при сочетании значительных выбросов загрязняющих веществ и неблагоприятных метеорологических условий. В научной и нормативной литературе обычно различают сернистый (лондонский) и фотохимический типы смога; конкретный состав и интенсивность смога зависят от структуры выбросов, солнечной радиации, температуры и условий перемешивания атмосферы» [109, с. 55].

1.5. Методы мониторинга и оценки качества атмосферного воздуха

Загрязнение воздушной среды является процессом привнесения или возникновение в ней физических, химических, биологических агентов, оказывающих негативное воздействие.

Основные типы загрязнений: физическое (радиация, электромагнитное излучение и т.д.); химическое (аэрозоли, тяжелые металлы); механическое (пыль); биологическое (микробиологическое, внесение чужеродных видов).

Как отмечает исследователь Ю.В. Пешков «Рассматривая систему государственного мониторинга загрязнения атмосферного воздуха, подчеркивает значение регулярности наблюдений, репрезентативности пунктов контроля и сопоставимости данных во времени» [65, с. 48-49]. Исследователи И.В. Якунина и Н.С. Попов «Выделяют инструментальные, лабораторные, дистанционные и биологические методы контроля окружающей среды, что позволяет рассматривать мониторинг как многоуровневую систему получения и обработки информации» [100, с. 62]. При этом для городской среды особое значение имеет сочетание различных методов: стационарные посты дают возможность получать сопоставимые временные ряды, маршрутные наблюдения позволяют уточнять локальные зоны загрязнения, а дистанционные и автоматизированные системы расширяют пространственный охват наблюдений.

Каждый тип загрязнения имеет характерный и специфичный для него источник загрязнения – природный или хозяйственный объект, являющийся началом поступления загрязнителя. Уровень загрязнения воздуха варьируется во времени и пространстве, характеризуясь особенностями источников выбросов, типом и свойствами загрязнителей, объемом выбросов, а также топографическими и метеорологическими факторами. Исходя из понимания этих процессов, на практике применяются различные методы мониторинга воздушной среды, классифицируемые различными авторами [37, 51].

Аналитические лабораторные методы мониторинга и контроля загрязнителей в атмосфере включают в себя отбор проб с последующей их доставкой и проведением анализа в лабораторных условиях [18].

При проведении мониторинга загрязнения атмосферного воздуха используют следующие варианты по методу организации работы [65]:

– стационарный, наблюдения производят из наблюдательной станции;
– маршрутный, для наблюдения используют несколько точек отбора проб;

– передвижной, с разных точек, в зависимости от направления ветров;

– дистанционный мониторинг.

Стационарный мониторинг существует длительное время, обычно пункты расположены на благоприятной для наблюдений местности, предназначены для постоянной оценки загрязнения воздуха в течение максимально длительного периода. На них производится плановый, регулярный отбор проб для последующего комплексного анализа.

Методы мониторинга воздушной среды подразделяются на [100]: контактные, неконтактные (дистанционные) и биологические.

Контактные методы мониторинга окружающей природной среды включают в себя классические, химические методы анализа, а также современные способы инструментального анализа. (рис. 1.3)

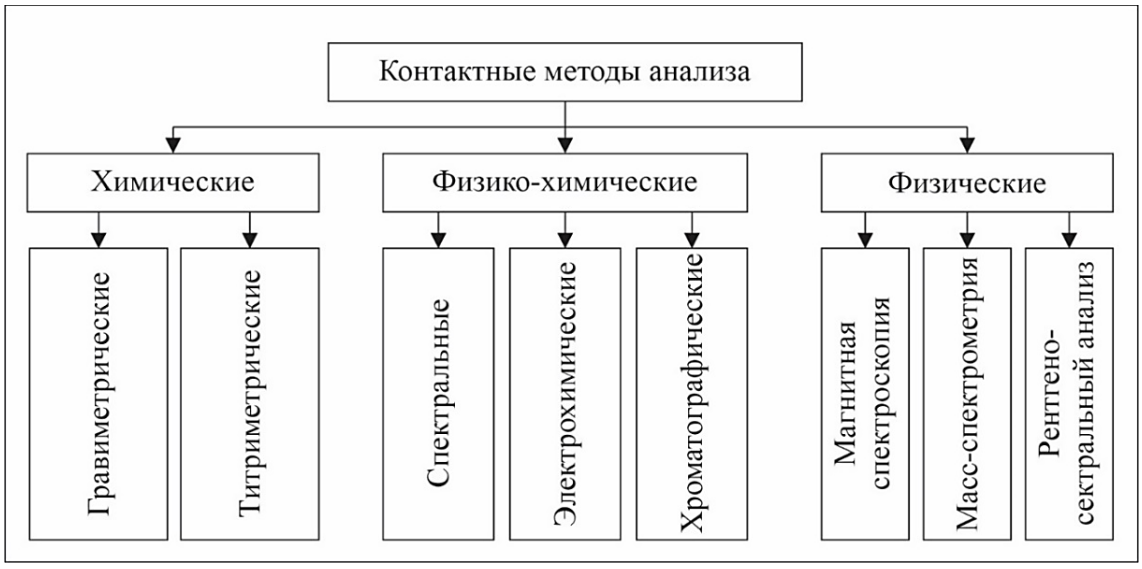


Рисунок 1.3. – Классификация контактных методов анализа

Чаще всего при анализе загрязнений воздуха применяют методы газовой хроматографии, спектроскопию, колориметрию и потенциометрию. Газовая хроматография – это способ изучения микропримесей летучих органических соединений. В настоящее время получают своё развитие также методы спектрального анализа. Эти методы применяются для определения концентраций примесей токсичных соединений в атмосфере [76].

Неконтактные методы основаны на использовании электромагнитных, акустических и гравитационных зондирующих полей, которые обладают

информативными характеристиками и разнообразными эффектами взаимодействия с материалом объекта контроля.

Методы зондирования атмосферного воздуха разделяются на многочисленные группы: ракетный, эхо - и радиолокационнный, лазерный, оптической локации, комбинационного рассеивания, резонансной флюоресценции, регистрации проходящего излучения и на дифференциальный метод [41].

Средства неконтактного контроля делятся на пассивные и активные. Пассивный метод принимает зондирующее поле от объекта, а активный — отражённые, прошедшие или переизлученные поля, создаваемые источником.

Спутниковые данные дистанционного зондирования направлены на решение важных задач мониторинга и могут фиксировать температуру, влажность, облачность, динамику фронтов, ураганов, температуру земной поверхности, мониторинг загрязнения почвы и водных ресурсов, а также определение выбросов промышленных предприятий (рисунок 1.4).

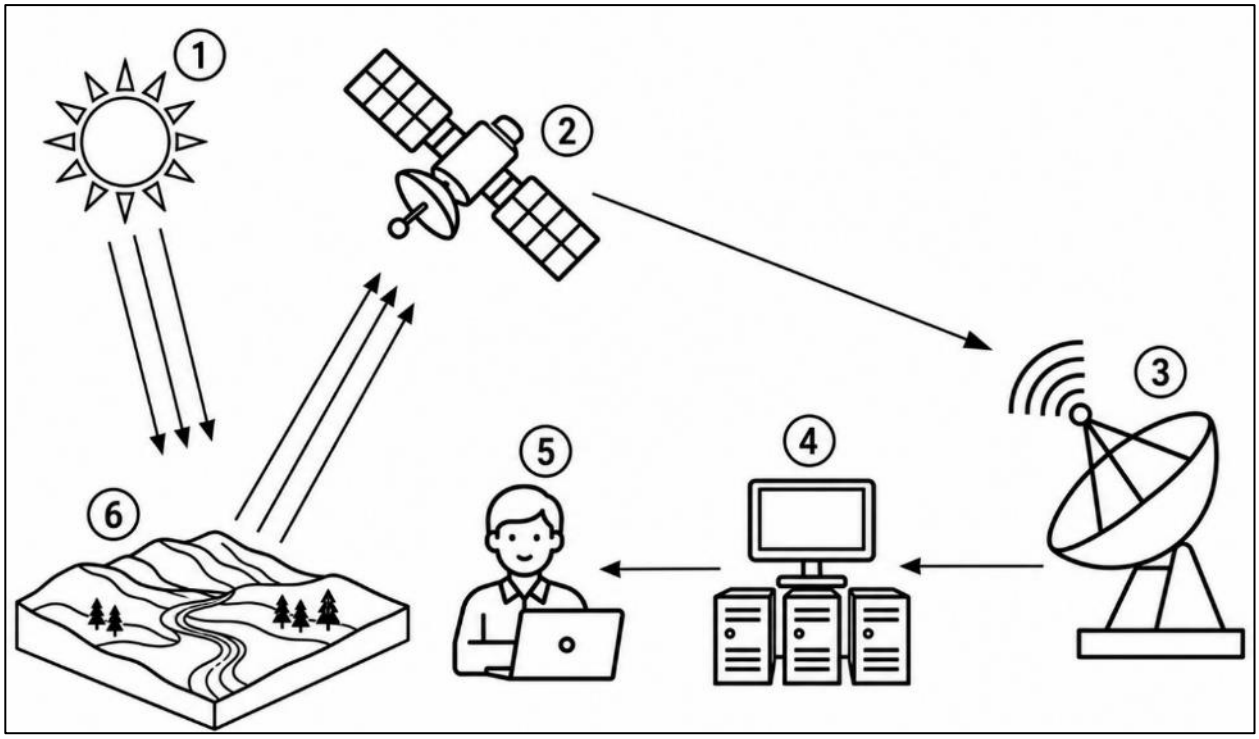


Рисунок 1.4 – Принципиальная схема спутникового дистанционного зондирования

(1. Источник электромагнитного излучения; 2. Высотный комплекс; 3. Наземный комплекс; 4. Система сбора, обработки и хранения данных; 5. Потребитель; 6. Зона зондирования.)

Биологические методы представляют всестороннюю оценку состояния среды обитания, включающую интегральную характеристику её состояния и биологическую оценку, которая передает прямую информацию о реакции организмов на стрессовые факторы.

В настоящее время широко применяются ***автоматизированные системы наблюдения и контроля окружающей среды*** (АНКОС). Их используют природоохранные службы, предприятия и бизнес-структуры [64].

Автоматизированные системы экологического мониторинга особенно важны для промышленных и урбанизированных территорий, где загрязнение воздуха имеет выраженную пространственную неоднородность. Исследователи В.М. Панарин, А.М. Зякун, А.В. Бизикин и А.А. Зуйкова «Рассматривают автоматизированные системы мониторинга атмосферы как техническую основу для оперативного контроля состояния воздушной среды промышленных территорий»[64, с. 27]. Однако даже автоматизированные измерения требуют процедур обеспечения качества данных, регулярной проверки оборудования, сопоставления с эталонными методами и корректной интерпретации результатов. В этом смысле автоматизация мониторинга не заменяет научно-методическое обеспечение, а требует его усиления.

В условиях ограниченного числа стационарных постов наблюдения и высокой стоимости развертывания плотной сети эталонных станций важным направлением развития мониторинга становится совмещение инструментальных измерений, недорогих сенсорных сетей, данных об источниках выбросов и математического моделирования. Как нами ранее отмечено, традиционные стационарные посты остаются необходимыми, однако не всегда обеспечивают полную пространственную картину загрязнения, особенно в городах со сложной структурой источников [6, с. 8]. При этом сами данные мониторинга фиксируют концентрацию в точке наблюдения, но не позволяют автоматически определить конкретный источник. Для идентификации возможного вклада источников необходимы инвентаризация выбросов, анализ метеорологических условий, пространственное сопоставление источников и пунктов наблюдений и

моделирование рассеивания. Для условий Худжанда особенно важно учитывать совокупность промышленных, транспортных, коммунально-бытовых и природных источников, включая пылевые переносы. Математическая модель в данном случае должна рассматриваться как дополнительный инструмент, позволяющий оценивать пространственное распространение примесей, проверять сценарии и интерпретировать результаты инструментального мониторинга.

Проведённый анализ методов мониторинга и оценки качества атмосферного воздуха показывает, что для условий Худжанда наиболее обоснован комплексный подход, объединяющий автоматизированные измерения PM1, PM2,5 и PM10, регистрацию метеорологических параметров, статистическую обработку временных рядов, анализ источников выбросов и математическое моделирование процессов рассеивания. Такой подход позволяет перейти от простой фиксации концентраций к оценке причин их изменения и формированию прогностических сценариев. В следующей главе рассматривается методика исследования качества атмосферного воздуха г.Худжанд, включая организацию сети наблюдений, средства измерения, обработку данных и расчётно-аналитические методы.

Выводы по главе 1.

На основании анализа научной литературы, климатических и антропогенных факторов, а также современных подходов к мониторингу качества воздуха г. Худжанд сформулированы следующие выводы:

1. Анализ научной литературы выявил недостаточную изученность пространственно-временной динамики концентраций PM2,5 в условиях г.Худжанд и ограниченность многолетних инструментальных наблюдений. Существующие исследования преимущественно охватывают отдельные загрязняющие вещества, периоды наблюдений или региональные процессы переноса атмосферного аэрозоля. Это обосновывает необходимость комплексного многолетнего исследования качества атмосферного воздуха непосредственно на территории города.

2. Формирование качества атмосферного воздуха определяется совместным воздействием природно-климатических и антропогенных факторов. Для Худжанда особое значение имеют долинный рельеф, ветровой режим, температурные инверсии, отопительный период, транспортная нагрузка и пылевые переносы. Развитие промышленности, транспорта и строительства усиливает потенциальную антропогенную нагрузку. В 2021–2025 гг. объём промышленного производства города увеличился примерно на 40 %, пассажирские перевозки — в 1,5 раза, грузовые — в 2,3 раза. Эти тенденции требуют учёта при оценке источников загрязнения и условий формирования качества воздуха.
3. Загрязнение атмосферного воздуха взвешенными частицами PM2,5 и PM10 относится к значимым экологическим факторам риска для здоровья населения. Длительное воздействие мелкодисперсных частиц связано с повышением риска сердечно-сосудистых, респираторных и других заболеваний, а также преждевременной смертности. Поэтому систематический мониторинг PM2,5 имеет особое значение для оценки качества городской воздушной среды и обоснования природоохранных мероприятий.
4. Анализ систем государственного экологического мониторинга Таджикистана показал исторически ограниченный пространственный охват наблюдений и недостаточную доступность длительных сопоставимых рядов концентраций PM2,5, PM10 и приземного озона. Несмотря на развитие автоматизированных систем наблюдения, для Худжанда сохраняется необходимость более детальной оценки различий в загрязнении воздуха между промышленными, транспортными и жилыми зонами города.
5. Международный опыт подтверждает эффективность интегрированных систем экологического мониторинга, объединяющих инструментальные измерения, контроль качества данных, их хранение, обработку, визуализацию и геоинформационное представление. Перспективным

направлением является дополнение государственной наблюдательной сети распределёнными автоматизированными сенсорными системами, позволяющими повысить пространственную и временную детализацию наблюдений при условии обеспечения качества измерений.

6. Загрязнение атмосферного воздуха представляет не только экологическую и санитарно-гигиеническую, но и социально-экономическую проблему. Его последствия связаны с ухудшением здоровья населения, увеличением расходов на здравоохранение, снижением производительности труда и качества жизни. В условиях промышленного и инфраструктурного развития Худжанда вопросы качества воздуха необходимо учитывать при городском планировании и разработке природоохранных мероприятий.
7. Для оценки формирования качества атмосферного воздуха Худжанда необходимо комплексное рассмотрение стационарных, мобильных, площадных, бытовых и природных источников загрязнения с учётом возможного трансграничного переноса аэрозоля. Сравнительная оценка их потенциального воздействия должна опираться на данные наблюдений, характеристики источников выбросов и метеорологические условия, исключая прямое перенесение результатов исследований других городов на условия Худжанда.
8. Проведённый литературный обзор обосновывает необходимость комплексного подхода к оценке и прогнозированию качества атмосферного воздуха г. Худжанд, основанного на сочетании автоматизированного мониторинга PM2,5, статистического анализа метеорологических факторов, оценки антропогенной нагрузки и математического моделирования рассеивания загрязняющих веществ. Такой подход соответствует цели и задачам диссертационного исследования и создаёт методологическую основу для последующего анализа пространственно-временной изменчивости загрязнения и разработки научно-практических рекомендаций.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ГОРОДА ХУДЖАНД

2.1. Объект, контролируемые показатели и информационная база исследования

Загрязнение атмосферного воздуха является одним из наиболее распространённых и опасных видов негативного воздействия на окружающую среду и здоровье населения. В связи с этим охрана атмосферного воздуха и развитие систем его мониторинга рассматриваются как приоритетные направления экологической политики, экологической безопасности и городского управления. Особое значение имеет загрязнение воздуха частицами PM2,5, поскольку данный показатель используется в международной практике как один из ключевых индикаторов риска для здоровья населения [109, 152].

Для охраны атмосферного воздуха необходимо учитывать процессы поступления, накопления, переноса и рассеивания загрязняющих веществ, а также влияние природно-климатических и антропогенных факторов. В городских условиях на уровень загрязнения влияют транспорт, промышленные предприятия, строительные работы, частный сектор, рельеф, ветровой режим, температурные инверсии, влажность воздуха и сезонность отопления.

Объектом исследования является воздушный бассейн г. Худжанд в пределах городской территории и зон влияния основных транспортных коридоров, жилой застройки и промышленных площадок. Основным индикатором качества воздуха принята массовая концентрация PM2,5; дополнительно регистрировались PM1,0 и PM10. К сопутствующим метеорологическим параметрам относились температура воздуха, относительная влажность и атмосферное давление, а при интерпретации результатов дополнительно учитывались данные об осадках, скорости и направлении ветра.

Несмотря на возможность одновременной регистрации концентраций PM1,0, PM2,5 и PM10, основным показателем для углублённого статистического анализа и математического моделирования выбрана фракция PM2,5. Такой выбор обусловлен высокой значимостью PM2,5 для оценки рисков здоровью

населения и наличием рекомендаций ВОЗ 2021 года, устанавливающих ориентировочные уровни среднегодовой концентрации 5 мкг/м³ и среднесуточной концентрации 15 мкг/м³ [152]. Показатели PM1,0 и PM10 использовались для дополнительной характеристики аэрозольного загрязнения, тогда как основной анализ был сосредоточен на пространственно-временной изменчивости PM2,5 и факторах её формирования.

Информационная база исследования сформирована из нескольких взаимодополняющих массивов: 1) данные автоматизированного мониторинга PM2,5 и метеорологических параметров; 2) многолетние климатические и метеорологические материалы по Худжанду; 3) сведения о стационарных источниках и выбросах предприятий, включая статистическую отчётность по форме 2-ТП (воздух); 4) материалы проекта нормативов предельно допустимых выбросов ООО «Джавони»; 5) показатели развития промышленности, транспорта, строительства и городской инфраструктуры; 6) научные публикации о пылевых переносах и особенностях загрязнения воздуха в Худжанде.

Таблица 2.1 – Основные массивы исходных данных и их назначение

Массив данных	Источник	Использование в исследовании
Автоматизированный мониторинг PM1,0, PM2,5, PM10, температуры, влажности и атмосферного давления	Сеть из четырёх автоматизированных пунктов наблюдения	Оценка состояния воздуха, сезонной, суточной и пространственной изменчивости
Климатические и метеорологические данные	Многолетние ряды по Худжанду; данные периода наблюдений	Анализ условий накопления, переноса и рассеивания
Стационарные выбросы	Формы 2-ТП (воздух)	Инвентаризация предприятий, загрязняющих веществ и динамики выбросов
Параметры отдельного стационарного источника	ПДВ ООО «Джавони»	Исходные геометрические и эмиссионные параметры для расчётного кейса
Социально-экономические показатели города	Официальная программа развития Худжанда и статистические материалы	Характеристика динамики промышленности, транспорта, строительства и инфраструктуры
Данные о природной пылевой нагрузке	Научные публикации и метеорологическая информация	Идентификация эпизодов регионального и трансграничного переноса пыли

Взвешенные частицы представляют собой твердые и жидкие частицы различного размера, формы, химического состава и происхождения, находящиеся в атмосферном воздухе во взвешенном состоянии. По происхождению они могут быть природными и антропогенными. К природным источникам относятся пылевые переносы, эрозия почв, природные аэрозоли и продукты биологических процессов. К антропогенным источникам относятся выбросы автотранспорта, промышленных предприятий, строительных работ, сжигание топлива, а также бытовые и коммунальные источники.

Удаление взвешенных частиц из атмосферы происходит преимущественно за счет сухого осаждения и вымывания атмосферными осадками. Интенсивность этих процессов зависит от размера частиц, их плотности, химического состава, влажности воздуха, скорости ветра, характера осадков и устойчивости приземного слоя атмосферы. Атмосферные аэрозольные частицы имеют различный химический и физический состав и являются сложными продуктами физико-химических процессов в атмосфере.

Гигиеническая оценка вредности твердых частиц в большинстве случаев зависит от определения их размера. Особое внимание уделяется частицам диаметром менее 10 мкм, поскольку они способны длительное время находиться в воздухе и проникать в дыхательные пути человека. Частицы таких размеров характерны преимущественно для крупных населенных пунктов с высокой транспортной нагрузкой, промышленными предприятиями, строительными площадками и другими источниками выбросов.

В связи с этим одним из основных направлений экологического мониторинга является учёт загрязнения атмосферного воздуха городской среды частицами PM2,5 и PM10. Обозначение PM происходит от английского термина Particulate Matter и характеризует взвешенные частицы в атмосферном воздухе. В русскоязычной литературе также применяется обозначение ТЧ — твёрдые частицы. Мелкодисперсные частицы PM2,5 способны проникать глубоко в дыхательные пути, достигая альвеол лёгких, что повышает риски сердечно-сосудистых и респираторных заболеваний [109, 152]. Их размеры значительно

меньше диаметра человеческого волоса, составляющего обычно 50–70 мкм. Сравнение размеров аэрозольных частиц и схема их проникновения в дыхательную систему представлены на рисунке 2.1.

Следует отметить, что фракция PM2,5 включает также более мелкие частицы PM1,0 (диаметром до 1,0 мкм) и ультрадисперсные частицы (менее 0,1 мкм).

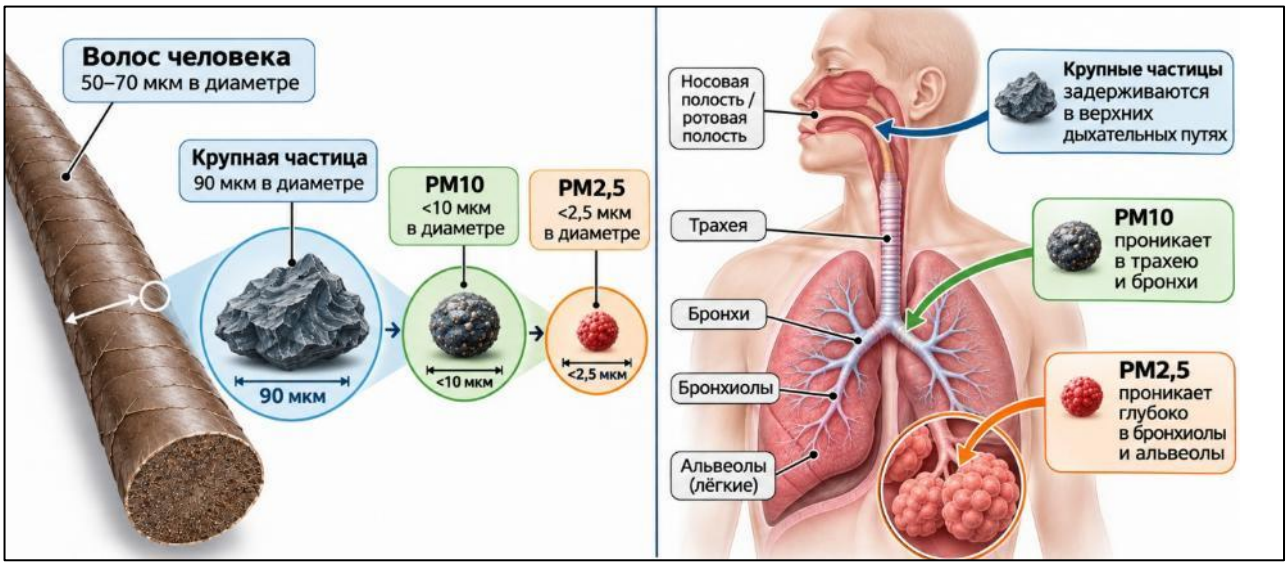


Рисунок 2.1. – Сравнение размеров аэрозольных частиц PM10 и PM2,5 и схема их проникновения в дыхательную систему человека..

С практической точки зрения разделение аэрозольных частиц на фракции PM1,0, PM2,5 и PM10 имеет важное экологическое и санитарно-гигиеническое значение, поскольку они различаются источниками образования, механизмами переноса, продолжительностью нахождения в атмосфере и глубиной проникновения в дыхательную систему. Особое значение имеет фракция PM2,5, способная достигать альвеолярной области лёгких, что обосновывает её выбор в качестве основного показателя углублённого анализа качества воздуха.

К потенциальным антропогенным источникам PM2,5 в жилых районах относятся автомобильный транспорт, бытовое отопление и промышленные выбросы. Транспорт способствует загрязнению воздуха продуктами сгорания топлива, а также частицами, образующимися при износе шин, тормозных механизмов и повторном подъёме дорожной пыли. Газообразные выбросы транспорта могут участвовать в образовании вторичных аэрозолей.

В Худжанде актуальность мониторинга PM1,0, PM2,5 и PM10 определяется сочетанием нескольких факторов: высокой плотностью населения в отдельных микрорайонах, наличием транспортных коридоров, близостью промышленных зон, строительной активностью, сезонными изменениями метеорологических условий и недостаточной обеспеченностью мониторинга автоматическими средствами измерения мелкодисперсных частиц.

В период проведения исследования доступные сведения о химическом и компонентном составе взвешенных частиц в атмосферном воздухе жилых районов Худжанда оставались ограниченными. Данные массовых концентраций позволяют оценивать уровень аэрозольного загрязнения, однако без дополнительных химико-аналитических исследований невозможно достоверно определить состав частиц и количественный вклад отдельных источников. Это ограничивает возможности разработки мероприятий, адресованных конкретным источникам загрязнения.

В рамках настоящего исследования была поставлена задача организации распределённого автоматизированного мониторинга концентраций PM1,0, PM2,5 и PM10 в атмосферном воздухе г. Худжанд с приоритетным анализом пространственно-временной изменчивости PM2,5 и её зависимости от метеорологических факторов. В связи с ограниченным доступом к специализированному лабораторному оборудованию определение химического и элементного состава аэрозольных частиц в задачи исследования не входило.

Таким образом, выбор контролируемых показателей и методов исследования обусловлен необходимостью расширения пространственного и временного охвата наблюдений за качеством атмосферного воздуха Худжанда. Применение автоматизированного мониторинга PM1,0, PM2,5 и PM10 с приоритетным анализом PM2,5 позволяет сформировать информационную основу для оценки динамики аэрозольного загрязнения, выявления его связи с метеорологическими условиями и последующего математического моделирования.

2.2. Методика инструментального мониторинга качества атмосферного воздуха

В связи с тем, что твердые частицы являются одним из приоритетных загрязнителей атмосферного воздуха, в исследовании особое внимание уделено выбору методов измерения PM1,0, PM2,5 и PM10. При выборе метода учитывались непрерывность наблюдений, возможность получения данных в режиме, близком к реальному времени, стоимость оборудования, автономность работы, устойчивость к местным климатическим условиям и возможность последующей обработки данных.

Как отмечают исследователи Clements A., Duvall R., Greene D., Dye T. «Мониторинг мелкодисперсных частиц в атмосферном воздухе является методически сложной задачей. На результаты измерений могут влиять дисперсный состав аэрозоля, форма и химический состав частиц, влажность, температура, режим воздушного потока, стабильность питания прибора и алгоритмы преобразования оптического сигнала в массовую концентрацию. Поэтому при использовании автоматизированных и недорогих сенсорных технологий необходимо учитывать ограничения метода и применять процедуры контроля качества данных» [116, с. 16-17].

2.2.1. Обзор методов исследования

Существуют два основных подхода к измерению концентрации твердых частиц в атмосферном воздухе: гравиметрические методы и косвенные методы непрерывного измерения. Гравиметрические методы основаны на отборе пробы воздуха, осаждении частиц на фильтре и последующем определении массы частиц. Косвенные методы позволяют проводить измерения в режиме, близком к реальному времени, на основе физических свойств аэрозольного потока, включая светорассеяние, ослабление излучения, электрические, акустические и другие эффекты [20, 75].

Гравиметрический метод включает извлечение пыли из воздушного потока и ее фильтрацию. Масса пыли определяется как разница в весе фильтра до и после анализа. Концентрация рассчитывается по формуле, приведенной ниже.

$$C = m/Qt,\ мг/м^3$$

m — масса пробы пыли в мг/м³;

Q — расход воздуха, м³/с;

т — время отбора пробы.

Гравиметрический метод позволяет определять массовую концентрацию взвешенных частиц с использованием фильтров и последующего лабораторного взвешивания. Однако он требует регулярного отбора и обработки проб, обслуживания оборудования и не обеспечивает оперативной регистрации кратковременных изменений концентраций.

К разновидностям методов, связанных с фильтрацией и последующим анализом, относится денситометрический метод. Он основан на определении оптической плотности твердых частиц, осажденных на фильтре.

Пьезоэлектрический метод измерения концентрации пыли основан на изменении собственной частоты колебаний пьезокристалла при осаждении частиц на его поверхности. Накопление пыли изменяет механические свойства пьезоэлемента и частоту его колебаний. Метод является перспективным, однако требует решения вопросов надежного осаждения частиц на активной поверхности кристалла и периодической очистки поверхности.

Косвенные методы измерения концентрации ТЧ позволяют проводить непосредственные измерения в аэрозольном потоке без традиционного пробоотбора. Их преимущество заключается в возможности автоматизации, непрерывной регистрации данных и передачи результатов в режиме, близком к реальному времени. Вместе с тем точность таких методов зависит от физических свойств аэрозоля, влажности, температуры, характеристик воздушного потока, стабильности питания прибора и применяемых алгоритмов пересчета сигнала в массовую концентрацию твердых частиц [116, 120].

Для непрерывного мониторинга применяются автоматические анализаторы, основанные на нефелометрии, бета-абсорбции, колеблющемся микробалансе конического элемента, пьезоэлектрических и оптических технологиях. Методы различаются принципами измерения, точностью, стоимостью оборудования и требованиями к обслуживанию.

Электрические методы основаны на регистрации заряда аэрозольных частиц. Их результаты зависят от электрических свойств частиц, влажности, температуры и характеристик воздушного потока.

Акустический метод предусматривает оценку концентрации частиц по ослаблению звуковой энергии при прохождении через аэрозольную среду. Его применение ограничивается технической сложностью оборудования и необходимостью специальной настройки.

Оптические методы получили широкое распространение благодаря компактности приборов, возможности автоматизации и непрерывной регистрации данных. Они основаны на измерении рассеивания или ослабления светового излучения взвешенными частицами. Массовая концентрация определяется с помощью градуировочных зависимостей или встроенных алгоритмов обработки оптического сигнала.

Точность оптических измерений зависит от характеристик прибора, размера, формы, плотности и оптических свойств частиц, а также температуры и влажности воздуха. Типовой измерительный комплекс включает источник излучения, фотоприёмник, оптический канал, блок обработки и передачи данных.

Оптико-абсорбционный метод регистрирует ослабление светового излучения, тогда как метод лазерного светорассеяния позволяет оценивать характеристики частиц по интенсивности рассеянного света. Возможность определения концентраций PM1,0, PM2,5 и PM10 зависит от конструкции прибора и алгоритмов обработки сигнала.

Датчики, использующие принцип лазерного рассеивания, излучают лазерный свет в поток воздуха, содержащий взвешенные частицы. Частицы рассеивают свет, а фотоприемник фиксирует интенсивность рассеянного излучения. На основе полученного сигнала микропроцессор рассчитывает эквивалентный диаметр частиц, их количество и массовую концентрацию по фракциям PM1,0, PM2,5 и PM10 [141].

Используя микропроцессор Arduino, Raspberry Pi или иную программно-аппаратную платформу, можно сконструировать устройство, включающее датчики твердых частиц и метеорологических параметров. Такие приборы могут работать через интерфейсы UART, PWM или другие цифровые каналы связи. Полученные данные могут выводиться на дисплей, сохраняться локально или передаваться в облачное хранилище через Wi-Fi, GSM/GPRS или другие каналы передачи данных. Это позволяет организовать непрерывный мониторинг качества воздуха при относительно невысокой стоимости оборудования и возможности расширения сети наблюдений.

Для целей настоящего исследования наиболее приемлемым является использование автоматизированных оптических датчиков, работающих на принципе лазерного рассеивания. Такой выбор обусловлен необходимостью получения непрерывных данных по PM1,0, PM2,5 и PM10, длительной автоматизированной работы в составе городской наблюдательной сети, сравнительно низкой стоимостью, простотой обслуживания и возможностью последующей цифровой обработки данных. При этом результаты, полученные с использованием таких датчиков, требуют критической интерпретации с учетом влияния влажности, температуры, свойств аэрозоля и условий размещения прибора [116, 120, 141].

2.2.2. Выбор и характеристики технических средств исследования

Для измерения массовой концентрации взвешенных частиц фракций PM1,0, PM2,5 и PM10 использованы оптические сенсоры Plantower PMS5003. Датчики данной серии работают на основе лазерного светорассеяния и обеспечивают цифровую передачу результатов измерений [141].

К основным преимуществам PMS5003 относятся компактность, цифровой интерфейс, регистрация данных в режиме, близком к реальному времени, минимальный различимый диаметр частиц около 0,3 мкм и конструктивная возможность адаптации расположения входного и выходного воздушных каналов. Цифровой универсальный датчик концентрации частиц серии PMS5003 имеет следующий внешний вид:



Рисунок 2.2 – Основные компоненты автоматизированной системы мониторинга качества атмосферного воздуха: сенсоры Plantower PMS5003, электронные модули и защитные корпуса

Таблица 2.2 – Технические характеристики датчика измерения концентрации твердых частиц PM, серии PMS5003

Параметры	Показатели/Индекс	Единица
Диапазон измерения частиц	0.3~1.0; 1.0~2.5; 2.5~10	мкм (μm)
Эффективность подсчета частиц	50%@0.3μm - 98%@≥0.5μm	
Эффективный диапазон частиц (стандарт PM2,5)	0~500	μg/m³
Максимальный диапазон частиц (стандарт PM2,5)	≥1000	μg/m³
Разрешение частиц	1	μg/m³
Ошибка максимальной концентрации частиц (стандарт PM2,5)	±10%@100~500μg/m3 ±10μg/m3@0〜100μg/m3	
Стандартный объем частицы	0.1	Литр（L）
Время одного сигнала (минимум)	<1	сек. (S)
Время одного сигнала (максимум)	<10	сек. (S)
Источник питания (постоянный ток)	Тип: 5.0 Min:4.5 Max:5.5	Volt (V)
Потребление в активности	≤100	мкА
Потребление в режиме ожидания	≤200	мкА
Диапазон рабочих температур	-10~+60	℃
Рабочий диапазон влажности	0~99	%
Диапазон температур хранения	-40~+80	℃
Среднее время безотказной работы	≥3	год
Физический размер	50mm×38mm×21mm	mm

Принцип работы. Датчик использует принцип лазерного рассеивания (рисунок 2.3), то есть производит измерение на основе рассеивания лазерного излучения взвешенными частицами в воздухе. Затем датчик собирает рассеянный свет в определённом диапазоне и получает кривую изменения светорассеяния во времени. В результате эквивалентный диаметр твердых частиц и их количество по различным фракциям на единицу объема рассчитываются микропроцессором [141].

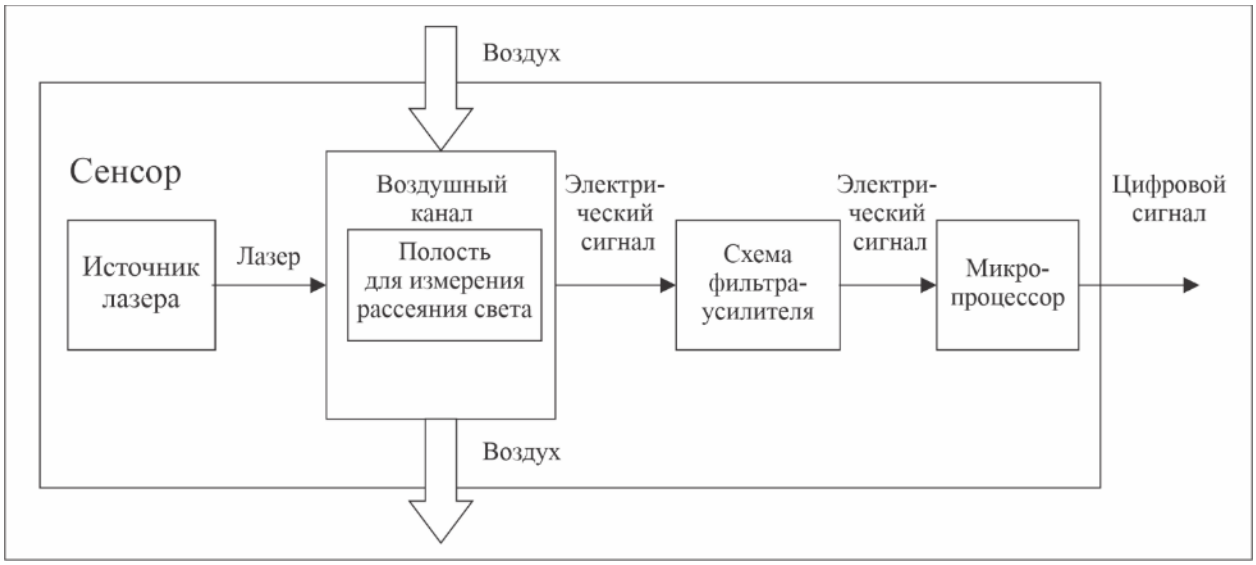
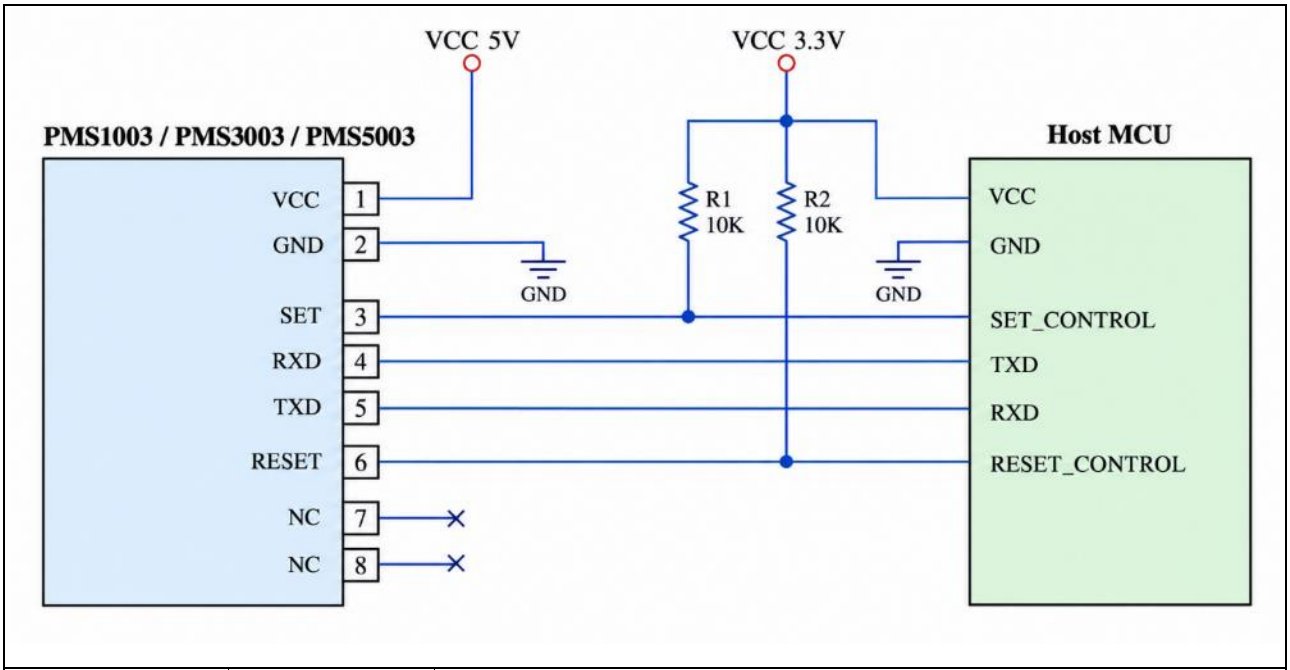


Рисунок 2.3 – Функциональная схема измерения концентрации взвешенных частиц сенсором Plantower PMS5003

Выходной результат. Датчик выводит данные о количестве частиц разных размеров на единицу объема и массовую концентрацию частиц по фракциям. Единица объема для подсчета количества частиц составляет 0,1 л, а единица массовой концентрации — мкг/м³. Существуют два варианта цифрового выхода: пассивный и активный. Режим по умолчанию активируется после включения питания. Интервалы передачи данных самим сенсором не следует отождествлять с интервалом регистрации в автоматизированной сети. В настоящем исследовании данные сохранялись с периодичностью 5 минут с последующим формированием почасовых и среднесуточных показателей. (рисунок 2.4)

Обозначение соединительных контактов:



Контакты	Функция	Описание
1	**VCC**	Напряжение питания 5V
2	**GND**	Земля
3	**SET**	ВЫСОКИЙ или ПРИОСТАНОВЛЕННЫЙ – режим работы НИЗКИЙ – спящий режим работы
4	**RXD**	Получение данных UART/TTL
5	**TXD**	Передача данных UART/TTL
6	**Reset**	НИЗКИЙ для сброса

Рисунок 2.4 – Схема расположения и назначения контактов сенсора Plantower PMS5003

Сопряжение датчика PMS5003 с Arduino. Прибор имеет интерфейс UART или PWM и может программироваться через Arduino или Raspberry Pi. Датчики Plantower выдают последовательные данные со скоростью 9600 бод, которые могут считываться компьютером или микроконтроллером. При необходимости датчик может быть подключен к ПК через USB-адаптер, например последовательный конвертер USB 2.0 в TTL UART CP2102.

Для считывания данных PMS5003 через микроконтроллер может применяться программный алгоритм обмена по интерфейсу UART со скоростью 9600 бод. После включения сенсора необходим период стабилизации показаний продолжительностью не менее 30 секунд. Полученные данные передаются управляющему устройству для последующей обработки и регистрации. (рис.2.5.)

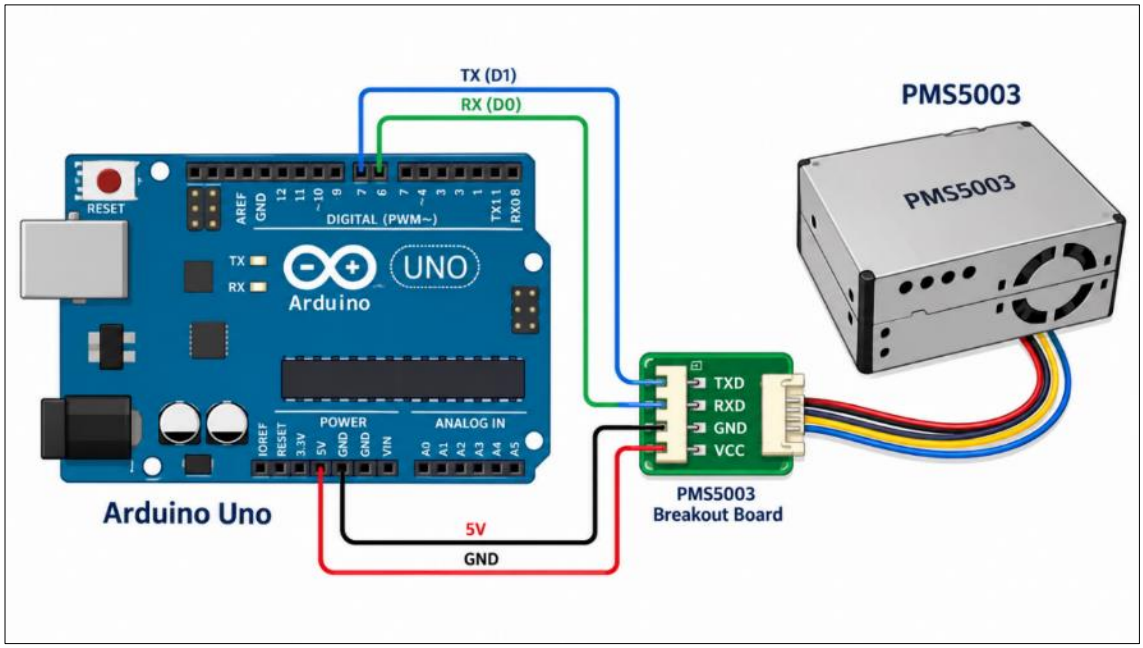


Рисунок 2.5 – Схема подключения датчика измерения концентрации частиц серии PMS5003 к микропроцессору Arduino

Автоматизированный измерительный комплекс, использованный для организации наблюдений, объединяет оптические сенсоры Plantower PMS5003, метеорологический датчик BME280, средства обработки и передачи данных, источник питания и защитный корпус.

Корреляция прибора. В отчётах отмечено «В разных городах Республики Казахстан 10 устройств аналогичного типа были протестированы в 2020 году в течение более трех месяцев в режиме 24/7 с эталонным монитором PM2,5 Казгидромета Comde Derenda APM-2. Результаты испытаний показали высокую степень согласованности показаний датчиков с эталонными приборами ($R^2 \approx 0{,}86$). В настоящее время данные со станций GSM AirKaz принимаются государственным предприятием «Казгидромет» и публикуются в официальных ежемесячных отчетах» [58, 107, 113, 128, 135, 138, 145, с. 112-113].

В научных работах также приводятся данные «О работе аналогичных недорогих датчиков (Low-Cost Sensors, LCS) и сравнении их показателей по PM2,5 и PM10 с данными стационарных пунктов мониторинга окружающей среды. В качестве эталонных приборов использовались мониторы класса GRIMM, T640, GRIMM EDM 180, а также оптический счетчик частиц SDS011 и приборы федерального эквивалентного метода (Federal Equivalent Method, FEM).

При этом необходимо отметить, что стоимость эталонных приборов может начинаться от 20 000 долларов США, тогда как стоимость датчиков LCS составляет около 175 долларов США в стандартном исполнении, включающем сенсоры PM1,0, PM2,5, PM10, температуры, влажности и давления» [68, с. 27].

Результаты совместных измерений мелкодисперсной пыли показали высокую корреляцию. На основании проведённых исследований сделан вывод о том, что недорогие датчики (LCS - Low cost sensor) обладают большим потенциалом для улучшения охвата данными о качестве воздуха в регионах с ограниченными ресурсами.

К таким же выводам приходят другие исследователи в различных регионах. При этом указывается, что такие недорогие датчики чувствительны ко многим метеорологическим факторам, включая температуру, влажность и особенности источников выбросов [113, 128, 135, 138, 145].

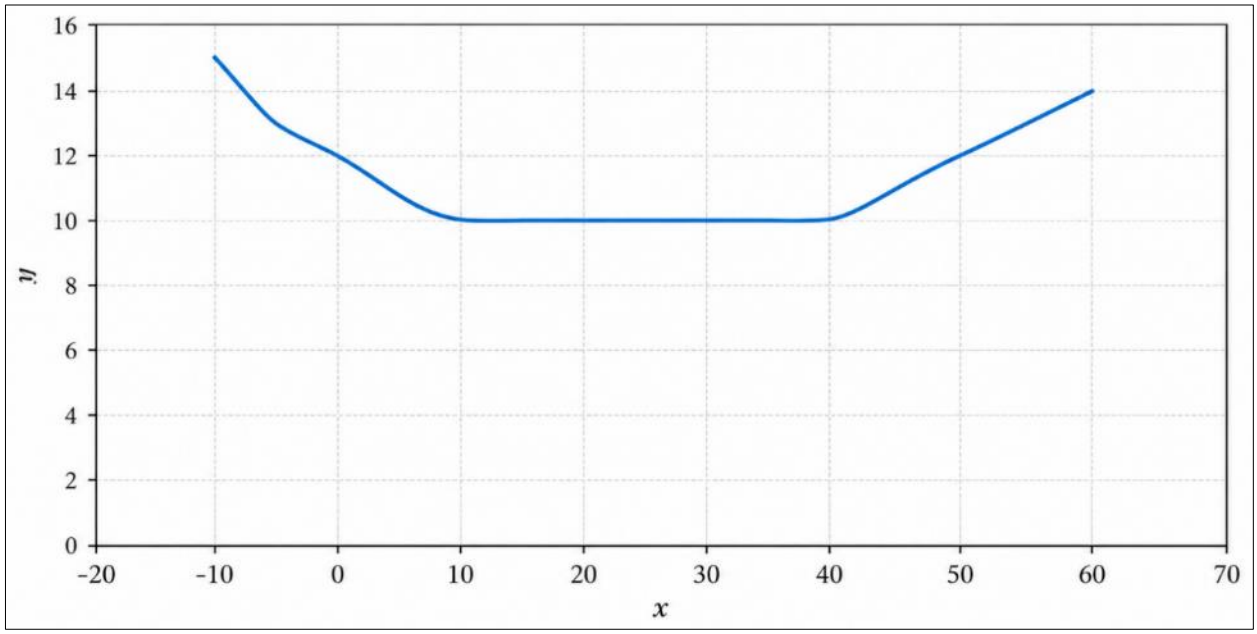


Рисунок 2.6. – Зависимость погрешности показаний сенсора PMS5003 от температуры воздуха по данным изготовителя в %

Как отмечает исследователь Булот Ф.М.Дж. «Недорогие датчики стоят примерно в 100 раз дешевле эталонных мониторов. Их доступная стоимость делает такие устройства привлекательным инструментом для устранения пробелов в сборе и обработке данных о твердых частицах. Показания таких датчиков могут хорошо коррелировать с мониторинговыми станциями

эталонного класса (R^2>0,8), однако при высоких температурах и повышенной относительной влажности возможны дополнительные погрешности. В частности, погрешность учета концентрации мелкодисперсных частиц может изменяться при температуре ниже 10 °C и выше 40 °C. Для получения данных высокого качества датчики такого типа требуют программной коррекции, калибровки и процедур контроля качества, которые применяются в международных сетях мониторинга качества воздуха» [113, с. 116].

2.3. Организация системы наблюдений

При организации автоматизированного мониторинга атмосферного воздуха в рамках настоящего исследования учитывались положения законодательства РТ об охране атмосферного воздуха, экологическом мониторинге и гидрометеорологической деятельности, а также методические требования к размещению наблюдательных пунктов и проведению измерений. Особенности использования недорогих оптических сенсоров рассматривались с учётом международной практики и технической документации изготовителя.

Регулирование в области мониторинга качества воздуха осуществляется следующими законодательными актами:

1. Закон РТ «Об охране атмосферного воздуха» от 28 декабря 2012 г. № 915 [25]. В соответствии со статьей 29 данного закона мониторинг атмосферного воздуха является составной частью Единой государственной системы экологического мониторинга РТ. п.2. «Проведение мониторинга атмосферного воздуха осуществляется в соответствии с законодательством РТ».

2. Закон РТ «Об экологическом мониторинге» от 25 марта 2011 года № 707 [27]. Глава 1. Статья 4 п.2. «Субъектами экологического мониторинга являются: государственные уполномоченные органы по организации и проведению экологического мониторинга; местные органы государственной власти; природопользователи».

Глава 1. Статья 5 «К основным принципам организации и осуществления экологического мониторинга относятся: единство и сопоставимость методов наблюдений и контроля сбора, обработки, хранения и распространения

полученной информации; – достоверность информации о состоянии объектов экологического мониторинга и ее доступность для потребителей».

Глава 3. Статья 11 п. 4. «Общественные объединения и граждане вправе участвовать в проведении экологического мониторинга за счет своих и иных, предусмотренных законодательством средств». п. 5. «Данные экологического мониторинга, полученные общественными объединениями и соответствующие требованиям к качеству информационных ресурсов, вносятся в реестр объектов экологического мониторинга».

3. Закон РТ «О гидрометеорологической деятельности» от 2 декабря 2002 г. № 86 (в действующей редакции от 13 ноября 2024 г. № 2098) [23].

В соответствии со статьей 10 «Субъектами гидрометеорологической деятельности являются уполномоченный государственный орган в области гидрометеорологии и его территориальные организации, организации наблюдательной сети, специализированные организации активного воздействия на метеорологические и другие геофизические процессы, а также иные физические и юридические лица, осуществляющие гидрометеорологическую деятельность на основании лицензий» [23].

Согласно статье 15 «Гидрометеорологическая служба осуществляет наблюдения и контроль за уровнями загрязнения атмосферы, поверхностных вод, почв, ледников, снежного покрова и растительного мира в целях определения антропогенной нагрузки на указанные объекты окружающей природной среды за счет выбросов и сбросов загрязняющих веществ и их трансграничного переноса. Также осуществляется наблюдение и контроль за радиоактивным загрязнением атмосферы, вод, почв и донных отложений. Перечень загрязняющих веществ, подлежащих наблюдению и контролю, определяется Правительством Республики Таджикистан» [23].

Статья 22. «Порядок предоставления информации о состоянии окружающей природной среды физическими и юридическими лицами «Информация о состоянии окружающей природной среды предоставляется физическими и юридическими лицами уполномоченному государственному

органу в области гидрометеорологии в порядке, установленном Правительством РТ»» [23].

А). Правила организации наблюдений за уровнем загрязнения атмосферы пылью в городах и населенных пунктах Республики Таджикистан.

Эффективность и достоверность наблюдений за концентрацией мелкодисперсной пыли в атмосфере города зависит от многих факторов. После решения вопросов о технической оснащённости исследования, на повестку обязательно встаёт вопрос о правильности расположения поста на обследуемой территории и их количестве.

При выборе мест размещения пунктов наблюдения учитывались методические положения ГОСТ 17.2.3.01–86 «Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населённых пунктов», предусматривающие учёт особенностей городской застройки, источников выбросов, рельефа и условий рассеивания загрязняющих веществ [20].

Количество датчиков или НПЗ зависит от цели мониторинга и численности людей населенного пункта. Также учитываются площадь населенного пункта, рельеф местности, степень индустриализации и метеорологические показатели.

Согласно РД 52.04.186–89, рекомендуемое количество стационарных постов зависит от численности населения: до 50 тыс. жителей — 1 пост, 50–100 тыс. — 2, 100–200 тыс. — 2–3, 200–500 тыс. — 3–5, более 500 тыс. — 5–10 постов; для городов с населением более 1 млн человек предусматривается 10–20 стационарных и маршрутных постов [75] Количество постов может быть увеличено в условиях сложного рельефа местности, при наличии большого количества источников загрязнения, а также при наличии на данной территории объектов, для которых чистота атмосферного воздуха имеет первостепенное значение (например, уникальных парков, исторических сооружений и др.). Регулярные наблюдения на стационарных постах проводятся по одной из четырех программ наблюдений: полной (П), неполной (НП), сокращенной (СС), суточной (С).

При определении приземной концентрации примеси в атмосфере отбор проб и измерение концентрации примеси проводятся на высоте 1,5—3,5 м от поверхности земли. Продолжительность отбора проб воздуха для определения разовых концентраций примесей составляет 20—30 мин. Продолжительность отбора проб воздуха для определения среднесуточных концентраций загрязняющих веществ при дискретных наблюдениях по полной программе составляет 20—30 мин через равные промежутки времени в сроки 1, 7, 13 и 19 часов при непрерывном отборе проб — 24 ч. [75]

Указанные требования относятся преимущественно к традиционным методам стационарного контроля и дискретного отбора проб. В настоящем исследовании использована автоматизированная сенсорная система с интервалом регистрации данных 5 минут, что позволило формировать непрерывные временные ряды концентраций PM1,0, PM2,5 и PM10 с последующим расчётом почасовых и среднесуточных значений.

Процесс установки датчиков должен учитывать ряд факторов: расположение промышленных и бытовых источников выбросов; расположение объектов строительства; расположение автомагистралей; размещение на карте промышленных, селитебных и жилых зон; особенности рельефа местности; направление и повторяемость ветра; возможность подключения питания и передачи данных; и безопасность и сохранность оборудования.

При размещении датчиков необходимо учитывать метеорологические особенности атмосферы, которые определяют условия рассеивания мелкодисперсных частиц, а также направление и повторяемость ветра. Положение зон повышенных концентраций зависит от параметров источников выбросов, направления и скорости ветра, устойчивости атмосферы и особенностей рельефа, поэтому должно определяться с учётом местных условий и результатов инструментальных наблюдений или расчётного моделирования. Для получения репрезентативной картины распределения концентрации примеси по городу посты необходимо устанавливать в первую очередь в тех жилых районах, где возможны наибольшие средние уровни загрязнения, затем в

административном центре населенного пункта и в жилых районах с различными типами застройки, а также в парках и зонах отдыха населения.

Для организации действующей постоянно системы мониторинга качества атмосферного воздуха в черте города важно принимать во внимание планируемое в будущем размещение потенциально крупных объектов - загрязнителей и жилых массивов с учетом перспектив развития города.

На практике во многих странах при выборе места установки постов наблюдения применяются дополнительные критерии. Учитываются высота дыхательной зоны человека, близость образовательных и административных учреждений, парков, мест массового пребывания населения, транспортных узлов и участков с высокой плотностью застройки. В условиях использования недорогих автоматизированных датчиков также необходимо учитывать сохранность оборудования, стабильность питания, качество GSM/GPRS-связи и возможность технического обслуживания прибора [116, 120].

В) Определение мест и установка датчиков мониторинга качества атмосферного воздуха на территории г. Худжанд.



Рисунок 2.7 – Карта расположения датчиков измерения концентрации частиц серии PMS5003 и промышленных зон в г. Худжанд

С учётом методических рекомендаций по размещению пунктов наблюдения, особенностей городской застройки, транспортной нагрузки,

расположения промышленных зон и задач исследования были выбраны четыре пункта автоматизированного мониторинга качества атмосферного воздуха на территории г. Худжанд.

На рисунке 2.7 приводится общая информация расположения датчиков измерения концентрации взвешенных частиц серии PMS5003 в г. Худжанд, а также обозначения расположения промышленных зон.

Город Худжанд имеет три основных транспортных коридора. Они идут с юга на запад (трасса Худжанд – Б.Гафуров), с севера на восток (трасса Худжанд - Чанак) и с юга на восток (автотрасса Худжанд — Душанбе). Вблизи этих автотрасс, на окраинах города размещены три промышленные зоны (рис.2.7).

Один датчик установлен в 19 густонаселенном микрорайоне, второй - на территории 31 микрорайона, третий - в квартале «Ватан» и четвертый – в квартале «Шелкокомбинат». Выбор этих точек обусловлен необходимостью охвата жилых территорий с различной плотностью населения, разной транспортной нагрузкой, близостью к промышленным зонам и отличающимися условиями городской застройки.

Высота установки датчиков на четырёх пунктах наблюдения составляла от 1,5 до 10 м и определялась особенностями городской застройки, требованиями сохранности оборудования, доступностью электропитания и условиями передачи данных. При интерпретации пространственных различий концентраций учитывалось, что высота размещения сенсоров может влиять на результаты измерений, особенно вблизи локальных источников загрязнения. Все пункты обеспечивали непрерывную регистрацию концентраций PM1,0, PM2,5 и PM10 и сопутствующих метеорологических параметров с интервалом сохранения данных 5 минут.

Выводы по главе 2

1. Для обоснованной оценки качества атмосферного воздуха необходимо учитывать процессы поступления, накопления и рассеивания загрязняющих веществ, а также влияние антропогенных, природно-климатических и метеорологических факторов. Комплексное применение инструментального

мониторинга, анализа метеорологических условий и расчётных методов позволяет повысить обоснованность оценки состояния атмосферного воздуха г. Худжанд.

2. К основным потенциальным источникам загрязнения атмосферного воздуха мелкодисперсными частицами в городской среде относятся автотранспорт, промышленные предприятия, бытовое отопление, строительная деятельность и природные пылевые процессы. Автотранспорт способствует поступлению первичных аэрозольных частиц, продуктов сгорания топлива и газообразных веществ, участвующих в образовании вторичных аэрозолей. Для условий Худжанда оценка воздействия транспортных выбросов должна проводиться совместно с анализом других антропогенных и природных источников загрязнения.
3. Анализ методов измерения концентраций взвешенных частиц показал, что гравиметрические методы обеспечивают метрологически обоснованное определение массовой концентрации, однако требуют отбора проб и лабораторной обработки. Для непрерывного городского мониторинга более приемлемы автоматизированные методы, включая оптические, основанные на регистрации светорассеяния в аэрозольном потоке.
4. Для регистрации концентраций PM1,0, PM2,5 и PM10 выбраны оптические сенсоры Plantower PMS5003, позволяющие получать данные в режиме, близком к реальному времени, и передавать их для автоматизированной обработки. Применение таких датчиков расширяет возможности пространственно-временного мониторинга, однако требует учёта влияния температуры, влажности, свойств аэрозоля, условий размещения оборудования и контроля качества измерений.
5. Установлено, что при организации сети мониторинга необходимо учитывать плотность населения и застройки, расположение промышленных, транспортных и бытовых источников загрязнения, рельеф, ветровой режим, высоту установки датчиков, а также условия электропитания, передачи данных и сохранности оборудования. При корректной установке,

программной обработке и калибровке недорогие датчики могут демонстрировать высокую степень корреляции с эталонными приборами, достигающую значений $R^2 > 0,8$.

6. Для исследования качества атмосферного воздуха г. Худжанд организована сеть из четырёх пунктов наблюдения, расположенных в 19-м и 31-м микрорайонах, кварталах «Ватан» и «Шёлкокомбинат». Выбор мест обусловлен различиями городской застройки, транспортной нагрузки и близостью к промышленным зонам. Сеть обеспечивает регистрацию концентраций PM1,0, PM2,5, PM10, температуры, влажности и атмосферного давления с интервалом 5 минут. При сравнении данных учитываются особенности размещения пунктов, включая различия высоты установки датчиков. Сформированный массив наблюдений служит экспериментальной основой для анализа пространственно-временной изменчивости PM2,5 и последующего математического моделирования.

Таким образом, выбранные объекты наблюдений, методы измерений и организация сети мониторинга обеспечивают получение достоверной информации о пространственно-временной изменчивости концентраций PM2,5 в условиях г. Худжанд и создают основу для последующего статистического анализа и математического моделирования.

ГЛАВА 3. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В ГОРОДЕ ХУДЖАНД

Город Худжанд представляет собой урбанизированную территорию, объединяющую жилые кварталы, промышленные зоны, транспортные узлы, административные и рекреационные объекты. Особенности городской застройки, размещения источников выбросов, транспортной инфраструктуры и природно-климатических условий определяют характер антропогенной нагрузки и процессы формирования качества атмосферного воздуха.

Как отмечено в материалах Постановления Правительства Республики Таджикистан «Наблюдения за экологическим состоянием и качеством атмосферного воздуха в условиях города являются важной научной и прикладной задачей. Проведение системного мониторинга атмосферного воздуха со стороны государственных органов и научных организаций содействует реализации Государственной экологической программы Республики Таджикистан на 2023–2028 годы, которая направлена на обеспечение благоприятного состояния окружающей среды, устойчивое управление природными ресурсами и повышение уровня экологической безопасности» [68].

Согласно данным Европейского индекса качества воздуха «Качество атмосферного воздуха является одним из факторов, напрямую влияющих на здоровье населения и качество жизни в городе. В международной практике для информирования населения и органов управления применяется индекс качества воздуха, рассчитываемый на основе концентраций ключевых загрязнителей. Европейский индекс качества воздуха использует концентрации PM2,5, PM10, NO_2, O_3 и SO_2, а также опирается на данные более чем 3500 станций мониторинга в Европе» [125]. Для условий Худжанда наиболее значимыми являются мелкодисперсные ТЧ PM2,5 и PM10, поскольку они связаны с транспортными, промышленными, бытовыми и природными источниками загрязнения.

Мелкодисперсные частицы PM2,5 и PM10 относятся к приоритетным показателям загрязнения атмосферного воздуха вследствие их воздействия на

здоровье населения. Длительное воздействие PM2,5 связано с повышением риска сердечно-сосудистых и респираторных заболеваний, а также преждевременной смертности [109, 152].

Источники первичных выбросов твердых частиц в атмосферу классифицируются как природные и антропогенные. К природным источникам относятся пылевые переносы, морская соль, выветривание горных пород и почв, вулканические извержения, природные пожары и биогенные аэрозоли.

К антропогенным источникам относятся сжигание ископаемого топлива, в том числе угля, нефти, газа и биомассы, выбросы автотранспорта, промышленные процессы, добыча и переработка минерального сырья, строительство, эрозия дорожного покрытия, а также другие виды хозяйственной деятельности. Важно отметить, что антропогенные загрязнители, попадая в атмосферный воздух, могут образовывать вторичные твердые частицы в результате химических реакций газообразных загрязняющих веществ в атмосфере. Вторичные аэрозольные частицы могут образовываться в атмосфере в результате химических превращений газообразных предшественников, включая оксиды азота, диоксид серы, аммиак и некоторые летучие органические соединения [109, 152].

Пространственно-временное распределение загрязняющих веществ в атмосферном воздухе Худжанда формируется под совместным воздействием промышленных, транспортных, коммунально-бытовых и природных источников. Существенное значение имеют рельеф, особенности городской застройки, расположение зелёных зон и метеорологические условия, определяющие интенсивность переноса, накопления и рассеивания атмосферных примесей.

Таким образом, наряду с наличием источников выбросов в атмосферу г.Худжанд, необходимо учитывать метеорологические, топографические, градостроительные и антропогенные факторы, влияющие на распространение, перенос и накопление загрязнителей в воздухе.

3.1. Метеорологические и топографические показатели г. Худжанд

Формирование климата г. Худжанд происходит в результате взаимодействия ряда факторов, обусловленных, прежде всего, его географическим положением, характером подстилающей поверхности, циркуляцией атмосферы и интенсивной солнечной радиацией, имеющей существенное значение для данной территории. Расположен в северной части страны, в западной части Ферганской долины, на берегах Сырдарьи. С юга его обрамляют горы Туркестанского хребта, а с севера — массив Моголтау [86, 87].

С востока от города расположено «Таджикское море» — Кайраккумское водохранилище, а с запада — Фархадское водохранилище. Эти водные объекты также оказывают влияние на местные климатические условия. Климат является континентальным и характеризуется значительными суточными и сезонными колебаниями метеорологических факторов. Среднегодовая продолжительность солнечного сияния составляет 2829 часов. В дни зимнего солнцестояния высота солнца достигает 28°, а в дни летнего солнцестояния — до 75°. В связи с этим среднегодовое количество суммарной радиации достигает 151,1 ккал/см², а при ясном небе данный годовой показатель составляет 183 ккал/см² [86].

Как указано в Справочнике по климату СССР «Количество осадков в основном зависит от южно-каспийских, мургабских и амударьинских циклонов, а также от вторжения холодных воздушных масс. Воздушные массы, достигая фронтальной поверхности гор, охлаждаются, способствуют образованию облаков и выпадению осадков в виде дождя и снега. В Ферганскую долину воздушные массы, как правило, вторгаются с запада и юго-запада, однако на своем пути они встречают склоны горных хребтов, что усиливает облакообразование и выпадение осадков» [91, с. 28].

Климатические данные свидетельствуют о выраженной сезонной неравномерности осадков. Согласно таблице 3.1, за ноябрь–март суммарное количество осадков составляет около 88,7 мм, тогда как за июнь–август — 13,8 мм, что способствует повышению вероятности вторичного пылеобразования в засушливый летний период [91].

Таблица 3.1. – Климатические показатели г. Худжанд

Месяцы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Средний максимум, ℃	3.4	6.1	13.7	22.0	28.7	34.3	35.6	32.5	28.9	20.7	12.4	5.7	20.33
Средний минимум, °С	3.3	1.9	4.3	10.8	15.7	19.7	21.3	18.7	13.7	8.2	3.4	0.6	10.13
Норма осадков, мм	15.2	15.5	24.8	26.9	20.2	8.7	3.8	1.3	3.3	14.8	15.8	17.4	167.7

Данные таблицы 3.1 показывают выраженную сезонность температурного режима и распределения осадков. Наиболее высокие среднемесячные максимальные температуры приходятся на июнь–август, тогда как наибольшее количество осадков фиксируется в весенний и осенне-зимний периоды. В летние месяцы количество осадков резко снижается, что имеет значение для формирования запыленности воздуха и накопления мелкодисперсных частиц в приземном слое атмосферы [91, 144].

Наблюдения показывают, что в течение 1990–2020 годов колебания количества осадков в Худжанде имели нестабильный характер. Это наглядно представлено на рисунке 3.1 [93].

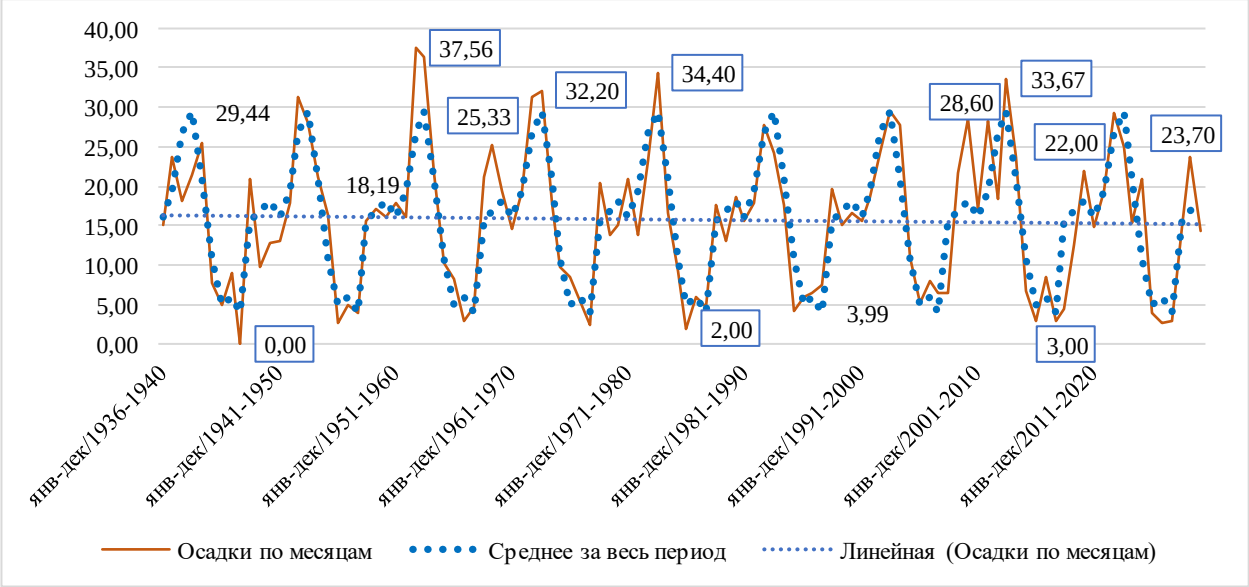


Рисунок 3.1. – Многолетняя динамика количества атмосферных осадков в г. Худжанд за 1936–2020 гг., мм.

На рисунке 3.1 показано суммарное количество осадков за период с 1936 по 2020 год по десятилетиям. Средний показатель осадков за данный период составил: максимум — 29,5 мм в апреле, минимум — 4 мм в сентябре. При этом зафиксированы отклонения показателей от многолетних норм осадков за последние пятьдесят лет [91, 93].

Рисунке 3.2 приведен детальный анализ данных об осадках с 2005 по 2020 годы с целью фиксации тенденции изменений.

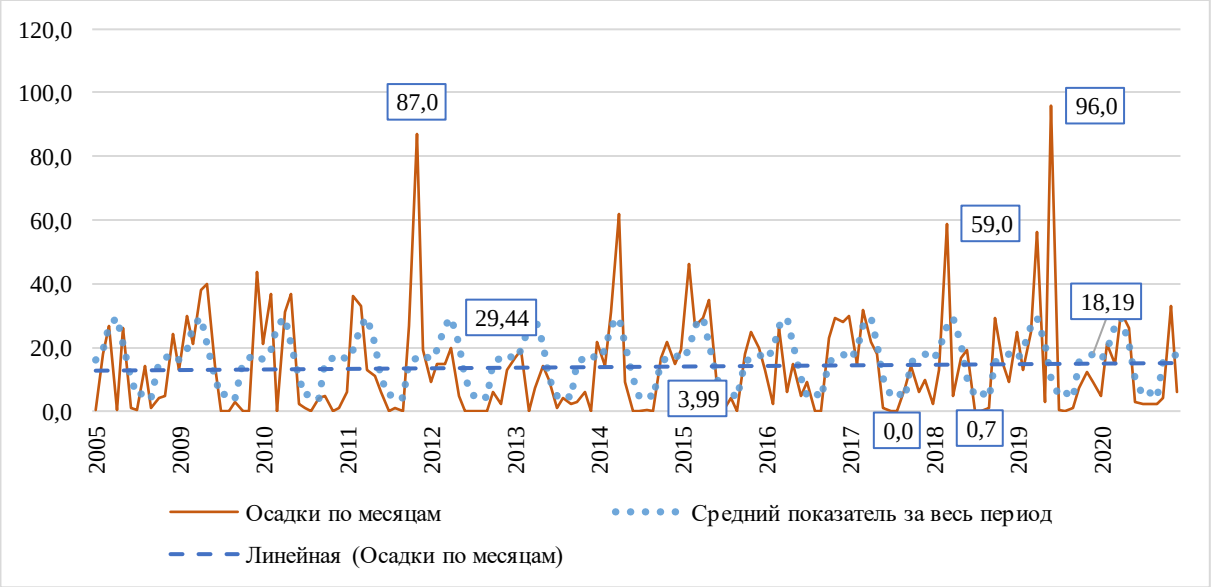


Рисунок 3.2 – Межгодовая и сезонная изменчивость атмосферных осадков в г. Худжанд за 2005–2020 гг., мм.

На рисунке 3.2 зафиксировано изменение количества осадков по месяцам. Исключение составляют 2012 и 2013 годы, когда годовое количество осадков составило 85 мм и 83 мм соответственно. С 2009 по 2020 год минимальное годовое количество осадков составило 138 мм, максимальное — 247 мм в 2019 году. Общая тенденция указывает на рост годового количества осадков, однако в летний период их количество уменьшается на фоне аномального повышения температуры воздуха. Высокие температуры, резкие температурные перепады и отсутствие осадков способствуют возникновению порывистых западных и юго-западных ветров, скорость которых достигает 4–6 м/с [89, 91, 93].

Исследования подтверждают, что январь по-прежнему является самым холодным месяцем года в Худжанде. В этом месяце средние температурные показатели составляют от -0,9^{0}C до -2^{0}C. Отрицательные минимумы наблюдаются даже в октябре -7^{0}C и в апреле -4^{0}C.

В Худжанде и окрестностях температура в марте и ноябре опускается до 15-19°C. Зима быстро сменяется короткой и влажной весной с дождями и быстрым повышением температуры до 15-20°C, и с нередко возникающими холодами и осадками в твердом виде в апреле (таблица 3.2)

Таблица 3.2 – Климатическая таблица г. Худжанд

Месяцы	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек	Год
Максимум C°	15,7	19,5	28,8	36,5	39,9	43,5	45,9	43,8	38,2	33,8	24,4	18,6	45,9
Средний макс. C°	3,5	6,2	13,8	21,7	28,6	34,2	35,5	32,4	28,8	20,6	12,3	5,6	20,28
Среднесуточное значение C°	-0,4	2,2	8,2	15,7	21,7	26,8	28,7	26,4	20,9	13,6	6,6	1,5	14,33
Средний минимум C°	-3,2	-1,8	4,2	10,7	15,5	19,6	21,2	18,8	13,6	8,1	3,4	-0,5	9,13
Рекордный минимум C°	-22,8	-22,2	-13,6	-3,9	0,8	8,7	10,5	7,0	1,4	-6,8	-18,8	-20,0	-22,8
Осадки 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
Среднее количество дней с осадками	11,4	11,0	12,7	12,6	12,0	6,3	4,1	2,6	3,2	6,8	7,4	10,4	100,5
Влажность	77,8	75,4	64,0	56,3	48,7	34,8	33,8	38,4	43,3	55,4	75,2	76,4	56,63
Среднемесячное количество солнечных часов	124,0	127,1	167,4	210,0	294,5	357,0	381,3	359,6	300,0	223,2	156,0	102,3	2802,4
Источник: Всемирная метеорологическая организация													

Результаты анализа температурных данных за период с 1881 по 2020 год также подтверждают изменение многолетних среднемесячных температур атмосферного воздуха [87, 93].

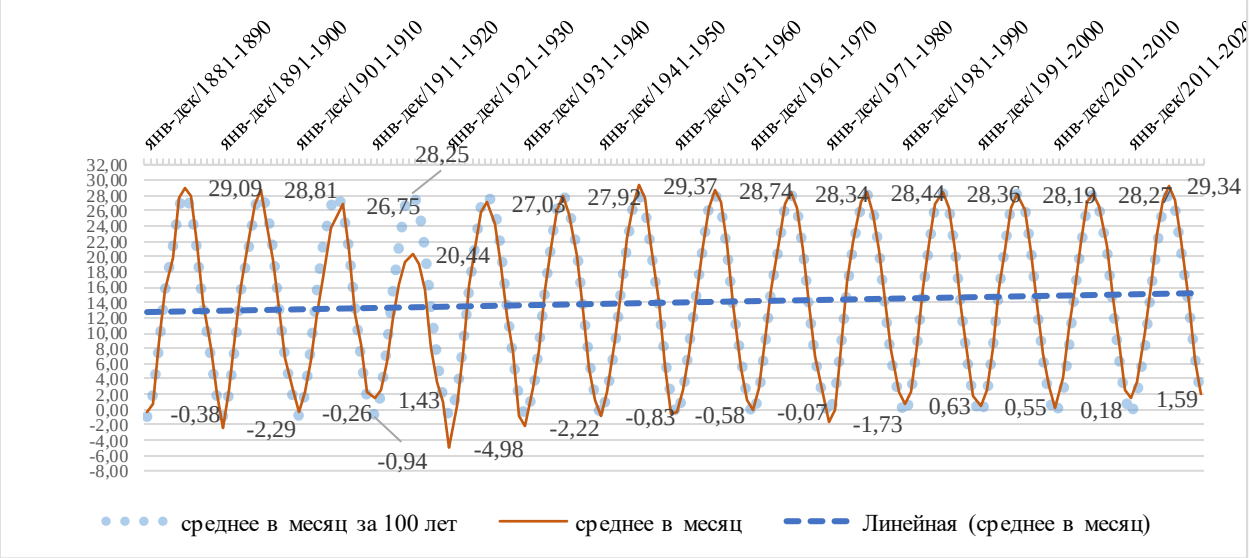


Рисунок 3.3 – Среднемесячная температура воздуха в г. Худжанд

Согласно данным метеорологического сервиса pogodaiklimat.ru «За последние 100 лет средняя высокая месячная температура составила +28,24 °C, а средняя низкая — –0,95 °C (рисунок 3.3). С 1981 года наблюдается повышение зимних температур, с резким скачком начиная с 2011 года. Средняя температура в июле за последние 10 лет составила 29,33 °C, а в январе — 1,58 °C. Разница с вековыми показателями составляет 1,68 °C летом и 2,60 °C зимой, что является значительным отклонением. Эти данные указывают на выраженные

климатические изменения, проявляющиеся в повышении летних температур и изменении режима осадков» [93, 94, 118].

Годовой ход влажности на территории г. Худжанд и его окрестностей связан, прежде всего, с ходом температуры атмосферного воздуха. При этом большое влияние оказывают также характер подстилающей поверхности, особенности рельефа и режим ветра [91].

Годовой ход облачности достигает максимума в зимне-весенние месяцы — 5–7 баллов, а к лету и началу осени уменьшается до 1,6 балла. Увеличение облачности начинается с октября и достигает 3,7 балла по территории РТ [90].

В течение года преобладают ветры двух противоположных румбов, совпадающих с направлением Ферганской долины: с одной стороны — западные и юго-западные ветры, с другой — восточные ветры. Повторяемость западных ветров составляет около 20 %, юго-западных — 32 %, восточных — 29 %. Наибольшая повторяемость восточных ветров приходится на зимний период — 44–48 %, а повторяемость западных ветров возрастает в теплый период года — 20–52 %. Летом для Худжанда характерна горно-долинная циркуляция. Скорость ветра в течение года изменяется незначительно, а среднегодовая скорость ветра составляет 4–5,5 м/с [89].

Выводы:

Анализ метеорологических и топографических условий показывает, что формирование качества атмосферного воздуха Худжанда определяется сочетанием долинного рельефа, сезонного температурного режима, неравномерного распределения осадков и особенностей ветровой циркуляции. Преобладающие западные, юго-западные и восточные ветры способствуют переносу и рассеиванию атмосферных примесей, тогда как периоды слабого ветра могут создавать условия для их накопления.

Недостаточное количество осадков в летний период повышает вероятность вторичного подъёма пыли с открытых грунтовых поверхностей. Зимой дополнительное значение приобретают отопительные выбросы и условия вертикального перемешивания воздуха. Особенности городской застройки,

расположения промышленных объектов, транспортных коридоров и зелёных насаждений также влияют на пространственное распределение загрязняющих веществ.

Следовательно, оценка качества атмосферного воздуха Худжанда должна основываться на совместном анализе концентраций PM2,5, метеорологических показателей и антропогенных источников загрязнения.

3.2. Мониторинг качества атмосферного воздуха

Одной из наиболее острых социально-экологических проблем, связанных с развитием города, комфортности проживания в нем жителей является вопрос состояние атмосферного воздуха.

Загрязнение воздуха в городе определяется концентрацией загрязнителей в приземном слое до 100 метров. Атмосферные выбросы рассеиваются под воздействием ветра, турбулентного обмена и разности температур. Прогноз загрязнения основывается на расчетах распределения примесей от источников выбросов с учетом развития города. Эта проблема актуальна и для Худжанда с населением почти 200 000 человек и площадью около 300 км².

Решение проблем качества атмосферного воздуха требует принятия определенных мер, включая создание и постоянное совершенствование систем экологического мониторинга. Мониторинг должен осуществляться на современной организационной и технологической базе с использованием системы наблюдений данных, включая индикативную систему, применение методов моделирования и выработки соответствующих рекомендаций.

Согласно материалам платформы AQCA «В городе Худжанде отсутствует комплексная система мониторинга окружающей среды. Первые действия по мониторингу загрязнения воздуха в республике начались в 1965 году. В настоящее время изучение состояния загрязнения атмосферного воздуха в городе проводится с использованием ограниченного количества наблюдательных пунктов, что не позволяет получить полную пространственную картину загрязнения в промышленных и жилых зонах» [59, 82, с. 15].

Как отмечено в отчётах Комитета ООС РТ «В 2014 году Комитетом ООС была приобретена мобильная лаборатория мониторинга загрязнения атмосферы. Это было осуществлено по проекту «Усовершенствование гидрометеорологического обслуживания стран ЦА», благодаря чему в Душанбе и периодически в Турсунзаде, Яване и в Худжанде проводится маршрутный мониторинг по определению уровня загрязнения атмосферы. В 2015 году был приобретен и установлен на территории Агентства по гидрометеорологии автоматический наблюдательный пункт, который в соответствии с задачами проекта поддержки и развития Агентства по гидрометеорологии «Фин-Тадж», осуществляет круглосуточный мониторинг состояния атмосферы. При нем образован отдел информации окружающей среды, в задачу которого входит регулирование подготовки сбора и передачи экологических данных пользователям. Данный отдел также ответственен за подготовку и публикацию ежегодных обзоров о состоянии атмосферного воздуха. В северном Таджикистане функционирует лаборатория по мониторингу загрязнения атмосферного воздуха и речных вод региона. Анализ атмосферного воздуха проводится на двух НПЗ в г. Гулистон и в г. Худжанде» [59, с. 27-28].

Таким образом, в Таджикистане мониторинг качества атмосферного воздуха осуществляется в г. Душанбе, Худжанде, Бохтаре, Гулистоне и Турсунзаде (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Измерения качества воздуха, 2013–2014 гг., количество замеров в год

Город	2013	2014
Душанбе	1796	1943
Худжанд	965	969
Бохтар	2431	2230
Спитамен	142	17
Турсунзаде	1530	1240

В настоящее время мониторинг атмосферного воздуха в столице республики ведется с помощью двух мобильных лабораторий и двух автоматизированных стационарных станций. Данные станции функционируют круглосуточно и определяют объемы таких загрязнителей как: диоксид серы, формальдегид, окись углерода, ТЧ, оксиды азота.

В Худжанде имеются определенные сложности по мониторингу качества воздуха. Причинами нерегулярного и несистемного мониторинга качества воздуха можно назвать недостаточное финансирование, дефицит квалифицированных кадров, отсутствие технических возможностей.

В связи с тем, что посты мониторинга воздушного бассейна расположены в основном на территории самих центров гидрометеорологических служб, они не охватывают территории потенциальных загрязнителей воздуха - промышленных объектов. Таким образом, месторасположение постов мониторинга, их минимальное количество не обеспечивает надлежащего наблюдения за стационарными источниками производственных объектов. Мониторинг производится по следующим загрязнителям. (таблица3.4).

Таблица 3.4 – Контролируемые загрязняющие вещества и публикуемые данные о загрязнении атмосферного 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

Проблемы мониторинга состояния атмосферного воздуха

Систематическое определение и сбор данных по PM2,5 и приземному озону осуществляется преимущественно в г. Душанбе. В других наблюдательных пунктах такие возможности ограничены, а мониторинг загрязнения воздуха часто сводится к измерению оксидов азота, оксида углерода, диоксида серы и общего содержания твердых частиц [59, 82].

Из-за недостаточного технического потенциала, нехватки химических реактивов, оборудования и ГСМ для осуществления мобильного мониторинга наблюдения проводятся на ограниченном числе наблюдательных пунктов и охватывают неполный спектр загрязнителей атмосферного воздуха. В настоящее время центры аналитического контроля не способны в полном объеме

обеспечивать комплексный мониторинг загрязнения атмосферного воздуха промышленными объектами. Информация о соблюдении нормативов и требований по атмосферным выбросам во многих случаях основана преимущественно на расчетных данных.

Несмотря на вышеперечисленные пробелы, имеется ряд рекомендаций, отмеченных со стороны Комитета по охране окружающей среды. В частности, существует необходимость подготовки обзора соответствия национального законодательства требованиям Протокола о регистрах выбросов и переноса загрязнителей, разработки правил внедрения РВПЗ, утверждения методик оценки загрязнения от диффузных источников, повышения заинтересованности промышленных предприятий в соблюдении природоохранных требований, а также разработки структуры и создания базы данных по РВПЗ. Реализация этих мер может способствовать совершенствованию учета выбросов, повышению прозрачности экологической информации и расширению доступа общественности к данным о загрязнении окружающей среды [38, 74].

Ратификация Таджикистаном Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния создала бы дополнительные условия для доступа к международным базам данных, сопоставимым методикам инвентаризации выбросов и развитию системы управления качеством атмосферного воздуха. Это позволило бы расширить исследования в области трансграничного переноса загрязняющих веществ, инвентаризации выбросов и оценки качества атмосферного воздуха [39, 149].

Несмотря на существенные изменения нормативно-правовых документов в секторах сельского и лесного хозяйства, всё еще имеются определенные пробелы, связанные с механизмами и методами учета атмосферных выбросов. В связи с этим сохраняется необходимость обновления законодательной базы и приведения методологии исследований в соответствие с международными экологическими документами и программами, включая Орхусскую конвенцию, Венскую конвенцию, Рамочную конвенцию ООН об изменении климата и Конвенцию ООН по борьбе с опустыниванием [38, 39, 124, 149].

Выводы:

В настоящее время уровень развития экологического мониторинга атмосферного воздуха в Республике Таджикистан не в полной мере соответствует современным экологическим требованиям. Государственный мониторинг осуществляется на ограниченном уровне из-за финансовых, технических и кадровых проблем.

Для повышения эффективности мониторинга необходимо развивать единую государственную систему экологического мониторинга на основе геоинформационных систем, включающую государственный, ведомственный, производственный и общественный мониторинг. Требуется модернизация материально-технической базы, расширение сети автоматизированных пунктов наблюдений и принятие нормативных актов для координации заинтересованных государственных органов [23, 25, 27, 124].

3.3. Основные источники выбросов в атмосферу города

С учетом характера формирования загрязнения атмосферного воздуха источники выбросов в городской среде подразделяются на стационарные, мобильные, площадные и бытовые. Каждый тип источников имеет собственные особенности распределения загрязняющих веществ во времени и пространстве, а также различный характер рассеивания в атмосферном воздухе. Стационарные источники связаны преимущественно с промышленными предприятиями, котельными, энергетическими и производственными объектами. Мобильные источники представлены автотранспортом и дорожной инфраструктурой. Площадные и бытовые источники включают частный сектор, отопление, строительные площадки, открытые пылеобразующие поверхности и сжигание топлива [124].

Как отмечено в статистическом сборнике ООС в РТ «Государственным уполномоченным органом, предоставляющим статистические данные о выбросах загрязняющих веществ в атмосферный воздух, является Агентство по статистике при Президенте Республики Таджикистан. Данные предоставляются в агрегированном формате и включают сведения по отдельным загрязнителям, в

том числе по оксидам азота, диоксиду серы, оксиду углерода, углеводородам, летучим органическим соединениям и твердым веществам. Информация по выбросам промышленных предприятий отражается в статистической форме 2-ТП (воздух), предоставляемой хозяйствующими субъектами и обобщаемой уполномоченными органами» [61, с. 64].

В Республике Таджикистан атмосферные выбросы загрязнителей определяются по трём источникам:

- от стационарных источников по данным отчёта 2-ТП воздух;
- от автотранспорта, рассчитываемые по методике природоохранных ведомств;
- выбросы парниковых газов по экспертным оценкам;
- бытовые и площадные источники.

Исходя из отчетов государственных природоохранных и статистических органов, основными источниками загрязнения атмосферного воздуха в Согдийской области и г. Худжанде являются промышленные объекты, автотранспорт, частный сектор, сельское хозяйство, строительная активность, сжигание топлива и локальный либо трансграничный перенос загрязняющих веществ [61, 62].

Для актуализации характеристики стационарных источников в работе дополнительно использованы материалы государственной статистической отчётности по форме 2-ТП (воздух) по г. Худжанду за 2023–2025 гг. [46]. Они дополняют многолетний ряд данных и используются при оценке современной структуры промышленных источников выбросов.

3.3.1. Промышленность

Данные фиксируются уполномоченными лицами предприятий, а также сотрудниками природоохранных органов на местах. При этом необходимо учитывать, что отчетность 2-ТП воздух предоставляется не всеми промышленными объектами и не всегда позволяет детально оценить выбросы по отдельным отраслям и малым источникам загрязнения [61, 62].

В таблице 3.5. автор приводит суммарные объемы атмосферных выбросов стационарных источников республики, вклад Согдийской области и г. Худжанд за период с 2014 по 2018 гг. по сравнению с 1991 годом.

Таблица 3.5 – Выбросы загрязнителей в воздух от стационарных источников, (тыс. тонн)

	1991	2014	2015	2016	2017	2018
Республика Таджикистан	100.6	34.5	27.1	36.9	46.8	48.1
в том числе:						
г. Душанбе	20,6	5,0	4,5	6,9	14,6	16,1
Согдийская область	22,8	10,9	8,9	10,3	11,0	11,6
г. Худжанд	9,2	0,7	0,6	0,6	0,6	0,8

Рисунки 3.4, 3.5 и 3.6 отражают объемы выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников по видам, ингредиентам и соотношению твердых и газообразных выбросов. Ингредиенты, представленные на рисунке 3.5, соответствуют структуре статистической отчетности 2-ТП воздух.

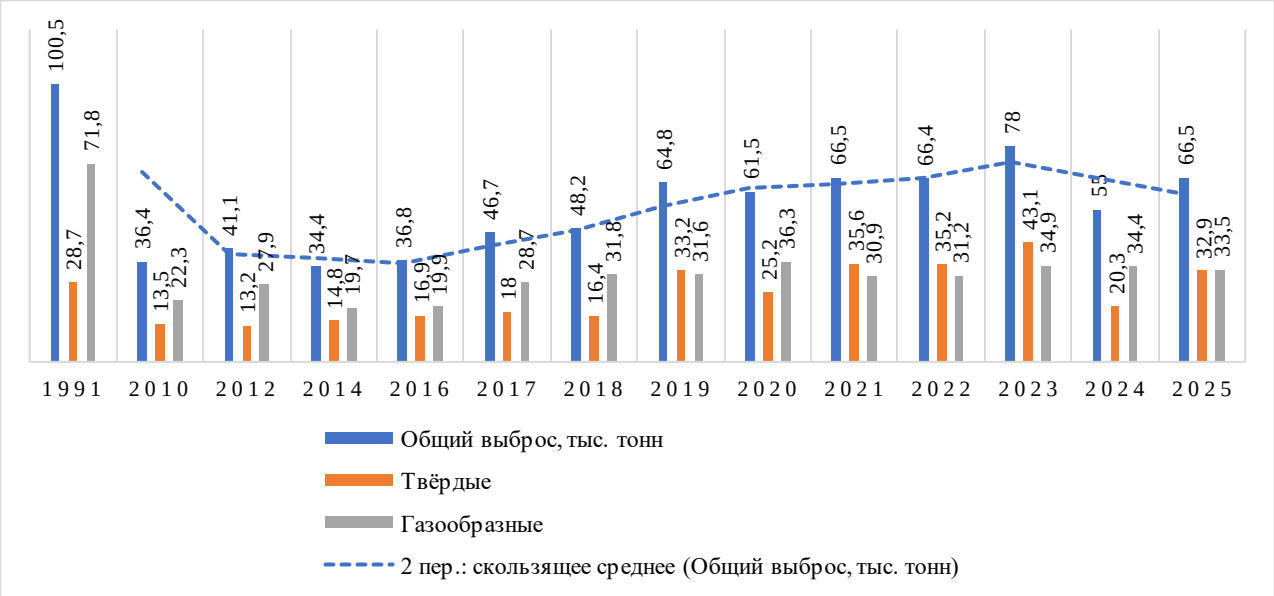


Рисунок 3.4 – Выбросы загрязнителей в атмосферу от стационарных источников, по виду. (тыс. тонн).

Анализ динамики выбросов от стационарных источников показывает существенную межгодовую изменчивость их объёма и структуры. В 2023 году общий объём выбросов составил 78,0 тыс. тонн, в том числе 43,1 тыс. тонн твёрдых и 34,9 тыс. тонн газообразных веществ. В 2024 году общий объём снизился до 55,0 тыс. тонн, причём снижение преимущественно связано с

сокращением учтённых выбросов твёрдых веществ. Расчётная оценка на 2025 год составляет около 66,5 тыс. тонн. Полученные изменения необходимо рассматривать с учётом особенностей промышленной деятельности и статистического учёта выбросов.

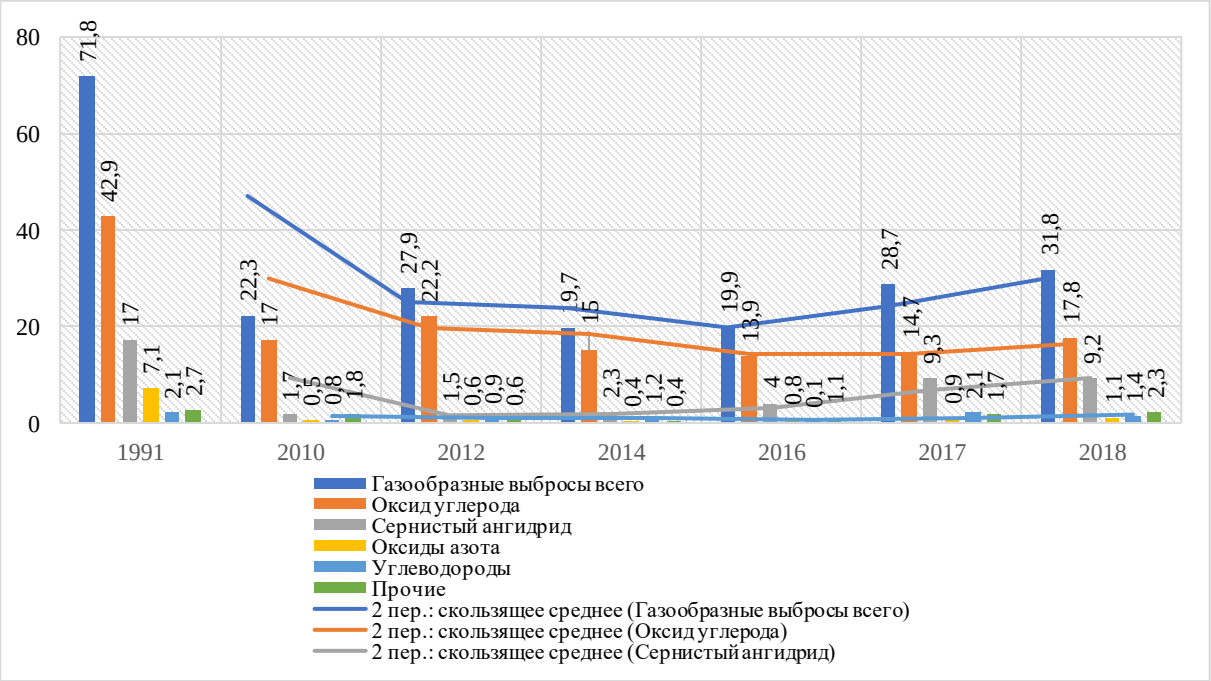


Рисунок 3.5 – Выбросы загрязнителей в атмосферу от стационарных источников, по ингредиентам, (тыс. тонн)

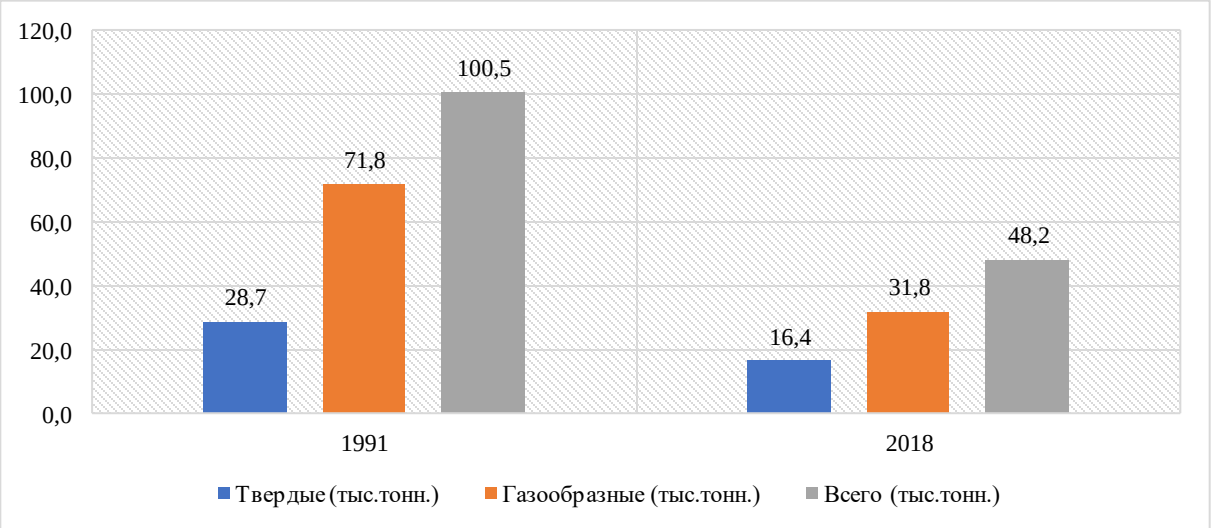


Рисунок 3.6 – Соотношение выбросов загрязнителей от стационарных источников за 1991 и 2018 гг., (тыс.тонн) Источник: Агентство по статистике, 2015г, 2020 г.

В 2018 году структура выбросов в Таджикистане значительно изменилась по сравнению с 1991 годом. Особенно заметно увеличение доли твёрдых веществ, которые составляют теперь 35% (против 28,7% в 1991 году). В

результате таких изменений доля сернистого ангидрида в выбросах увеличилась с 23,8% до 28,8%, а оксида углерода снизилась с 59,8% до 55%.

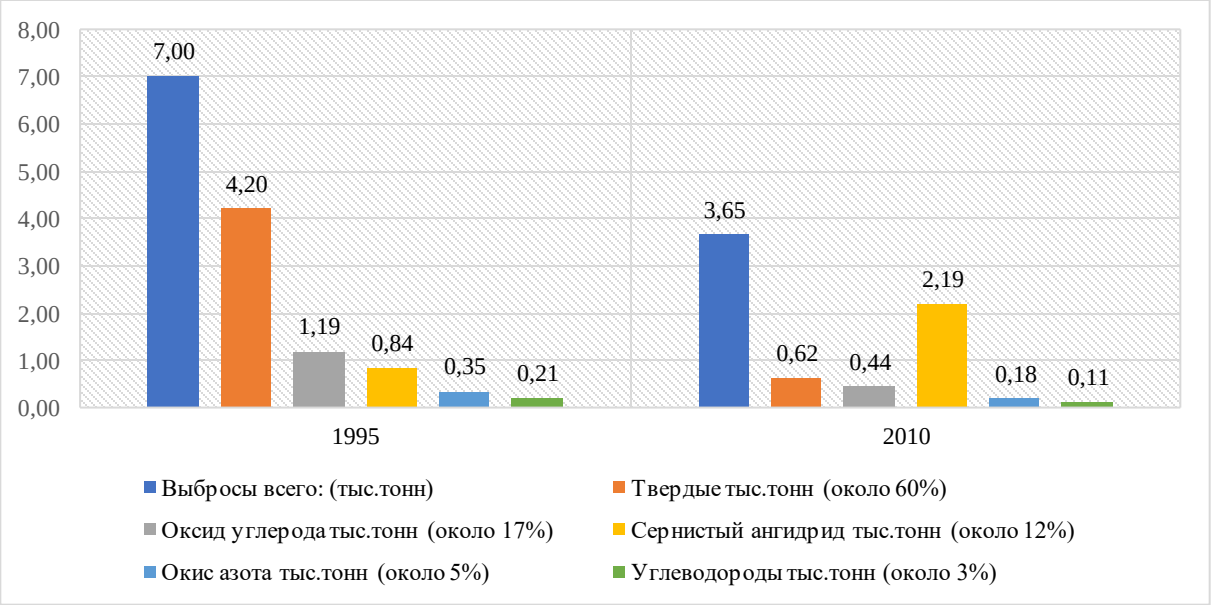


Рисунок 3.7 – Выбросы от промышленных объектов в Согдийской области в 1995 году и 2010 году по видам выбросов (тыс. тонн).

Выбросы промышленности выступают вторым источником по объему на уровне Согдийской области. (рисунок 3.7) Этот вид выбросов колеблется от 7 тыс. тонн в 1995 году до 3,66 тыс. тонн. в 2010 году.

Как отмечено в отчётах Агентства ООС в РТ «В промышленных выбросах преобладают твердые выбросы - пыль, сажа, которые составляют около 62% от общего объема твердых выбросов, оксида углерода - 18%, сернистого ангидрида - 13%, окислов азота - 4%, углеводородов – 2,5%. Последнее десятилетие наблюдается увеличение объемов выбросов в среднем на 0,8 тыс.тонн в год, но тем не менее, в 2019 году выбросы составили всего 60% от уровня 1991 года. В 2011 году Узбекистан прекратил поставки природного газа и это вынудило промпредприятия использовать твердое топливо и резко увеличились объемы добычи угля на территории северного Таджикистана и его использование в быту и на производстве. В результате использование угля выросло более чем в два раза и соответственно привело к увеличению выбросов оксида углерода и сернистого ангидрида» [99, с. 69-70].

В таблице 3.6 приведены данные выбросов от стационарных источников по ингредиентам.

Таблица 3.6 – Выбросы загрязнителей от стационарных источников по ингредиентам

№	год	Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу по Согдийской области, т/год							
		всего	твёрдые	SO_2	CO	NO_2	CH	ЛОС	другие газы
1	2019	12546,2	7591,3	673,5	2212,1	292,0	1617,0	56,7	88,5
2	2018	11236,6	8494,3	1430,9	1842,5	368,2	674,1	21,5	115,0
3	2017	10698,3	6572,5	733,9	2013,1	462,9	657,0	40,0	217,8
4	2016	10181,6	6748,0	659,0	1712,2	301,8	571,4	46,7	142,1
5	2015	8330,1	5174,2	574,9	1515,7	249,2	491,8	26,2	294,3
6	2014	10991,2	6651,3	995,7	2296,1	307,2	427,3	86,2	224,1
7	2013	7159,1	4284,5	587,2	1492,2	287,6	325,9	3,1	173,8
8	2012	7669,1	4957,3	553,8	1507,1	217,9	171,7	11,8	241,3
9	2011	5992,5	3264,1	560,8	1284,7	254,7	205,1	9,3	409,9
10	2010	4559,1	2037,8	537,5	1035,7	192,2	351,4	11,7	388,9

В анализе выбросов от стационарных источников в городах и районах области наибольший вклад вносят горнорудные предприятия, расположенные в Пенджикенте, Худжанде, Гулистоне и в Айнинском, Мастчинском и Б.Гафуровском районах. Основными источниками выбросов загрязнителей в г. Худжанде являются промышленные предприятия, автозаправочные станции, а также котельные, работающие для производств, отопления социальных объектов и жилого сектора (таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Выбросы вредных веществ в атмосферный воздух от стационарных источников в разрезе городов и районов т/год по Согдийской области 2005-2019гг.

№	районы и города области	1991	2005	2010	2011	2012	2014	2015	2016	2017	2018	2019
1	Айни	-	291,4	115,5	826,0	777,4	576,0	524,9	835,6	1379,7	1139,2	1578,2
2	Ашт		64,9	35,3	35,8	51,5	52,5	47,6	59,9	625,5	95,3	62,4
3	Б.Гафуров		938,6	745,8	768,5	705,4	995,7	1059,8	863,6	778,5	833,0	1205,0
4	Девештич		26,8	32,8	48,2	48,3	82,1	79,5	195,6	204,7	197,3	224,8
5	Зафаробод		165,0	226,5	219,7	90,3	83,8	96,5	87,7	75,9	93,1	80,4
6	Исфара		261,7	721,7	927,6	999,3	843,6	873,5	805,3	700,4	684,0	709,6
7	Истаравшан		24,0	51,9	53,4	19,4	18,5	23,1	46,9	113,2	325,8	297,4
8	Конибодом		142,6	317,7	255,7	297,7	233,3	121,5	140,7	134,9	167,0	188,1
9	к.Мастчох		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,2
10	Гулистон		173,5	746,4	1013,0	1817,7	2330,3	813,5	990,0	1213,0	1127,7	906,9
11	Матчинский		263,9	123,4	160,5	971,8	181,9	758,6	1394,1	1985,3	2000,0	2132,8
12	Пенджикент		561,1	269,2	623,7	836,2	4363,2	2775,6	3549,0	1895,3	2860,1	2954,9
13	Спитамен		200,0	190,1	117,4	47,1	149,1	152,4	139,3	382,5	151,0	203,0
14	Худжанд		279,3	560,0	578,3	455,3	619,0	538,9	524,2	656,5	972,0	1146,24
15	Бустон		14,4	29,6	39,3	39,9	60,8	74,5	110,5	78,8	147,6	160,1
16	Дж. Расулов		203,2	284,3	315,1	498,9	389,2	378,2	426,9	439,9	435,2	631,0
17	Шахристон		-	-	0,0		0,0	0,0	0,5	17,4	12,9	6,3
18	Истиклол		250,0	0,0	0,1	1,0	1,7	1,7	1,7	6,7	6,0	11,3
	Всего область	22700	3860,5	4450,3	5982,3	7657,2	10980,9	8319,9	10171,6	10688,3	11247,3	12545,11

В соответствии с инвестиционными программами развития Республики Таджикистан и наращиванием мощностей действующих предприятий антропогенная нагрузка может возрастать. При этом приведенные выше республиканские показатели и данные по Согдийской области относятся к разным территориальным уровням и не должны интерпретироваться как единая структура выбросов. По данным таблицы 3.6, в Согдийской области в 2019 году твердые вещества составили 7591,3 т из 12546,2 т суммарных выбросов стационарных источников, то есть около 60,5 %. Доля оксида углерода (CO) составила около 17,6 %, диоксида серы (SO_2) — около 5,4 %, оксидов азота (NO_2) — около 2,3 %.

В 2019 году плотность атмосферных выбросов из расчёта т/км² в разрезе городов и районов Согдийской области составила в среднем 0,55 т/км², в том числе твердых выбросов - 0,36 т/км² и газообразных - 0,22 т/км². В 2012 году общий объем выбросов загрязнителей составил: 0,29 т/км², в том числе газообразных - 0,18 т/км² и твердых - 0,12 т/км². На рисунке 3.8 продемонстрирована плотность выбросов на 1 км² в разрезе городов Худжанд, Бустон и районов Б.Гафуров и Аштза 2019 год.

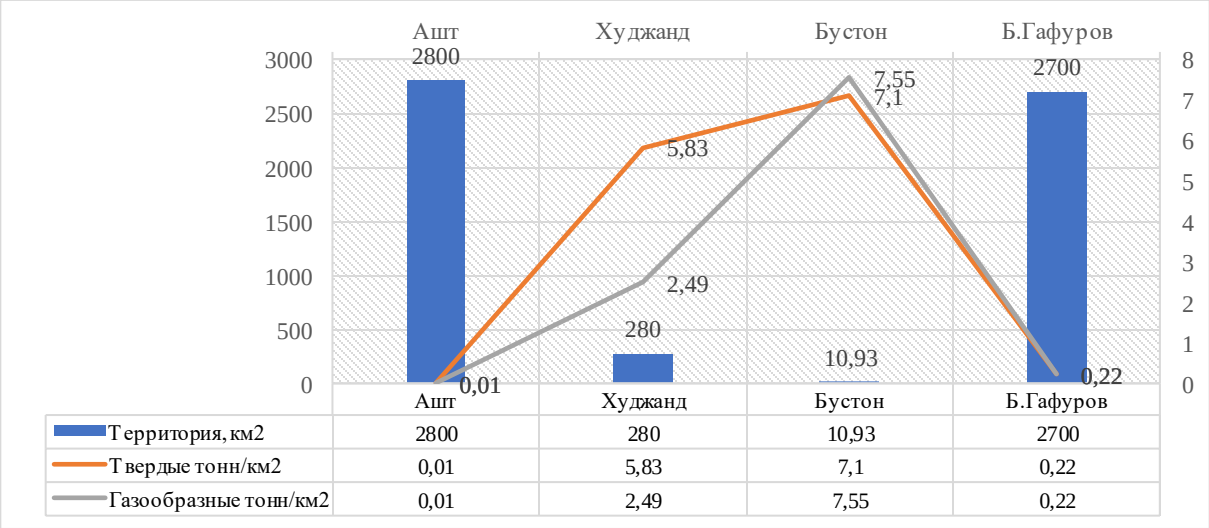


Рисунок 3.8 – Плотность выбросов на 1 км2 территории Согдийской области в 2019 г.

Рисунок 3.8 показывает, что наибольшие концентрации промышленных источников зафиксированы в городах Худжанд и Бустон. Аштский и Б. Гафуровский районы имеют большие территории и оказываемая нагрузка по концентрации атмосферных выбросов на км² составляет меньший объем.

Результаты сравнения атмосферных выбросов от стационарных и передвижных источников свидетельствуют, что около 94% (по данным 2018 года) от общего объема выбросов загрязнителей приходится на долю передвижных источников.

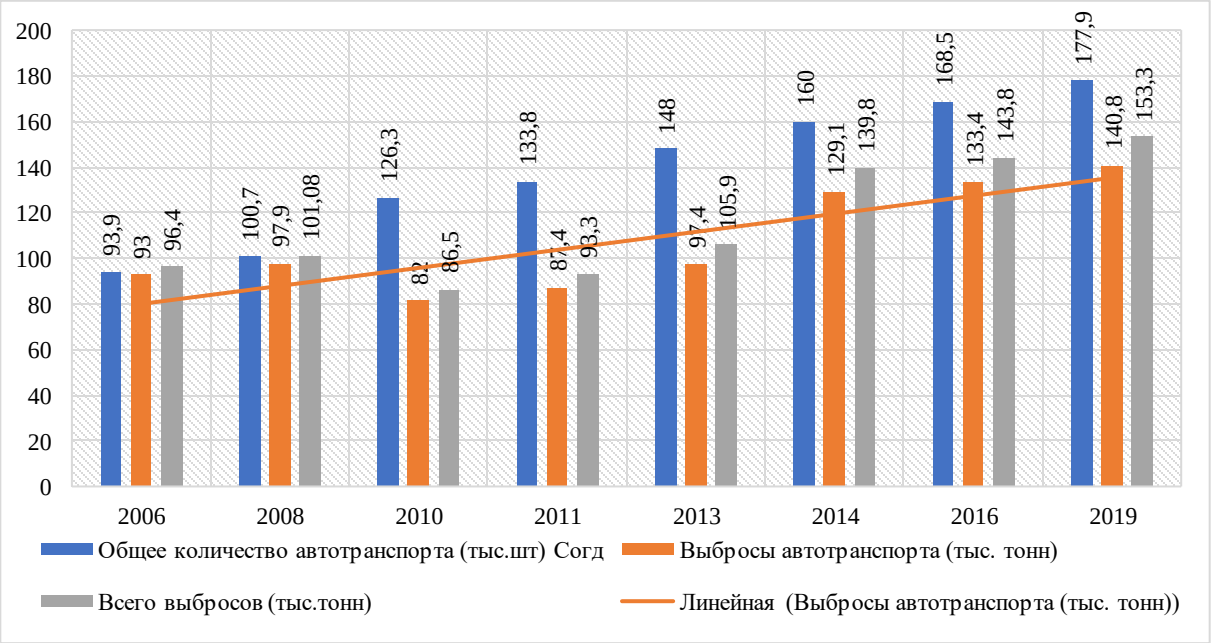


Рисунок 3.9. – Количество зарегистрированного автотранспорта и объемы их выбросов по сравнению с общими выбросами в атмосферу

Прогнозируемое увеличение числа автотранспорта округленно от 179 тыс. зарегистрированных в Согдийской области автомобилей в 2019 г. (рисунок 3.9) ориентировочно до 222 тыс. машин в 2025 году, приведет к перегрузке дорог и возникновению всё большего количества автомобильных пробок. Это, в свою очередь, будет стимулировать ухудшение качества атмосферы, и приведет к его несоответствию принятым стандартам. Как положительный фактор, здесь можно отметить только то, что всё большее использование сжиженного газа и электроэнергии в качестве топлива позволит снизить объемы загрязнителей.

Как подчеркивалось выше, после автотранспорта другим основным источником выбросов загрязнителей в г. Худжанд, являются промышленные и иные объекты. Число стационарных источников, производящих выбросы загрязнителей в атмосферу будет расти в результате развития экономики города, строительства и ввода в эксплуатацию новых промпредприятий как в черте города, так и вблизи его. Об этом свидетельствуют и статистические данные. Так

в 2014 году в Худжанде было зарегистрировано 155 единиц промышленных объектов, что на 48 единиц больше, чем годом ранее.

На территории г. Худжанд имеются северо-восточная и юго-западная промышленные зоны на правом берегу и промзона на левом берегу реки Сырдарьи. Отличительной стороной промышленных зон на правом берегу является наличие санитарных зон, которые отсутствуют в промзоне левого берега, что отрицательно влияет на формирование здесь воздушного бассейна.

В постсоветский период предприятия, расположенные в трех указанных промышленных зонах Худжанда либо значительно сократили производство и, следовательно, объемы выбросов загрязнителей, либо полностью прекратили свою деятельность. В 2018 году годовые выбросы от стационарных источников города не превышали 10% от уровня 1991 года. Однако, экономика области, включая промышленность в последние годы имеет тенденцию роста. Это подтверждается тем, что в 2019 году атмосферные выбросы загрязнителей от стационарных источников составили уже 25% от показателей 1991 года. Хотя они пока далеки от уровня конца советского периода, но явная тенденция к их увеличению наблюдается (рисунок 3.10).

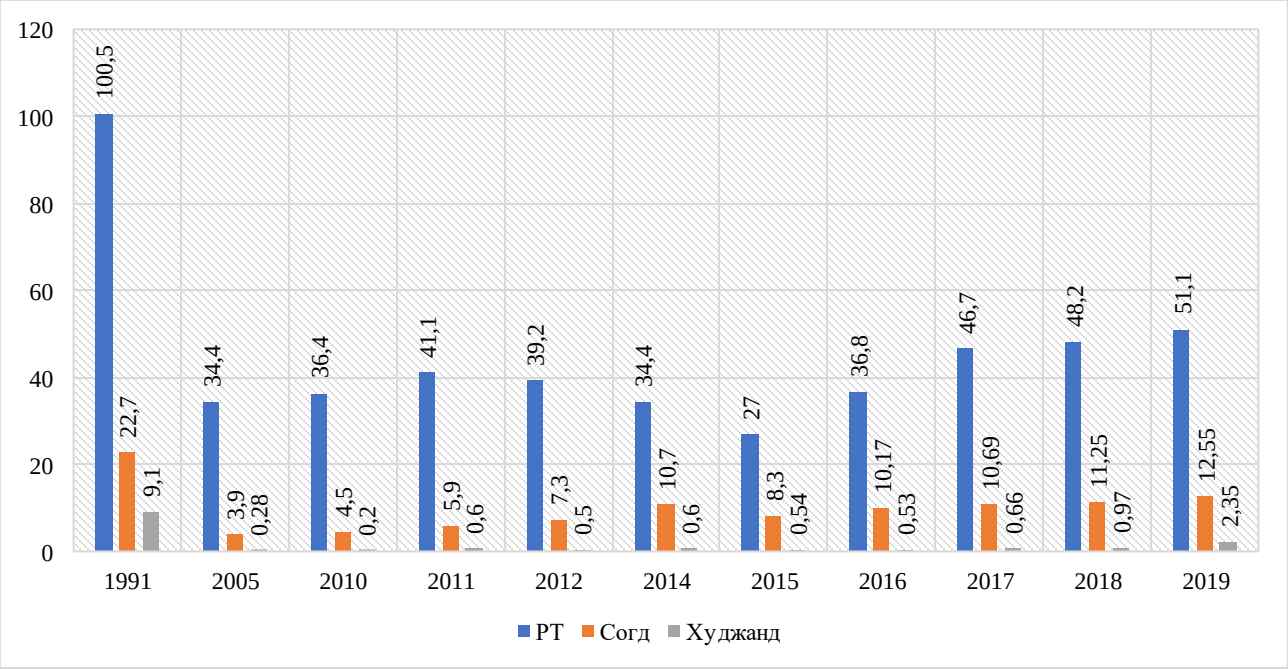


Рисунок 3.10 – Выбросы от стационарных источников г. Худжанд по сравнению с выбросами на уровне Согдийской области и РТ (тыс. тонн).

Из анализа динамики выбросов загрязнителей от стационарных источников за период с 2010 по 2019 годы (см. таблица 3.8) видно, что начиная с 2011 года происходит резкий рост выбросов. Это связано с переходом городских котельных на работу с природного газа на твёрдое топливо.

Таблица 3.8 – Выбросы загрязнителей в атмосферу г. Худжанд, тонн/год

№	год	Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу по г. Худжанд, т/год							
		в том числе:							
		всего	твёрдые	SO_2	CO	NO_2	CH	ЛОС	другие газы
1	2019	1146,2	450,2	158,0	387,4	39,8	86,5	22,4	1,9
2	2018	972,0	322,8	161,8	375,3	39,4	68,0	1,0	3,9
3	2017	656,5	128,8	127,3	315,3	35,0	38,4	1,4	10,2
4	2016	524,3	124,7	108,4	250,5	27,6	8,9	0,5	3,6
5	2015	538,8	147,1	94,4	222,8	25,9	36,1	6,1	6,5
6	2014	619,0	158,4	115,5	291,1	29,8	13,5	2,7	7,9
7	2013	550,3	119,6	115,2	268,2	33,9	6,6	0,7	6,5
8	2012	455,3	119,3	87,3	217,8	22,1	2,5	0,1	6,0
9	2011	578,3	196,1	95,0	253,4	28,8	1,1	0,1	3,7
10	2010	202,6	80,6	37,2	59,1	20,0	4,0		1,7

Из отчетов прослеживается, что основной объем выбросов составляют твердые выбросы - пыль, сажа и др. – 450,2 тонн, оксид углерода - 387,4 тонн., сернистый ангидрид, – 158,1 тонн, углеводороды – 86,5 тонн, в год. Начиная с 2015 года наблюдается тенденция роста объёмов углеводородов в выбросах газообразных загрязнителей. Значительный их рост фиксируется с 2018 года. Это обусловлено ростом числа заправочных станций, занимающихся импортом, хранением и реализацией ГСМ.

Важно учесть, что анализ приведённых данных на таблицах осуществлен на основании официальных данных Агентства статистики при Президенте Республики Таджикистан или отраслевых ведомств. Как отмечено в разделе 3.2. «Мониторинг качества атмосферного воздуха», в Республике Таджикистан существует большой пробел по сбору и обработке данных. В результате этого показания по выбросам или долям выбросов в атмосферу полученные от передвижных, стационарных источников или переносимых загрязнений могут отличаться от реальной ситуации.

Современная динамика промышленного развития города усиливает актуальность контроля стационарных источников. Согласно Программе

социально-экономического развития г. Худжанд на 2026–2030 годы, объём промышленного производства увеличился примерно с 1,5 млрд сомони в 2021 году до 2,1 млрд сомони в 2025 году, или приблизительно на 40 %, а число действующих промышленных предприятий достигло 325 [71]. Указанные показатели учитываются в настоящем исследовании как характеристика возрастающей производственной активности и необходимости регулярного контроля выбросов в воздушный бассейн города.

3.3.2. Транспорт

В Республике Таджикистан автомобильный транспорт играет ведущую роль в грузовых и пассажирских перевозках. По данным Министерства транспорта, в 2025 году на него приходилось более 94% объёма грузоперевозок. Развитие экономики, расширение транспортной инфраструктуры и увеличение международных перевозок способствуют росту автомобильного парка, в том числе в Согдийской области. Вместе с тем природно-климатические условия региона, включая высокие летние температуры, осложняют эксплуатацию дорожной инфраструктуры и могут потребовать введения временных ограничений движения большегрузного транспорта.

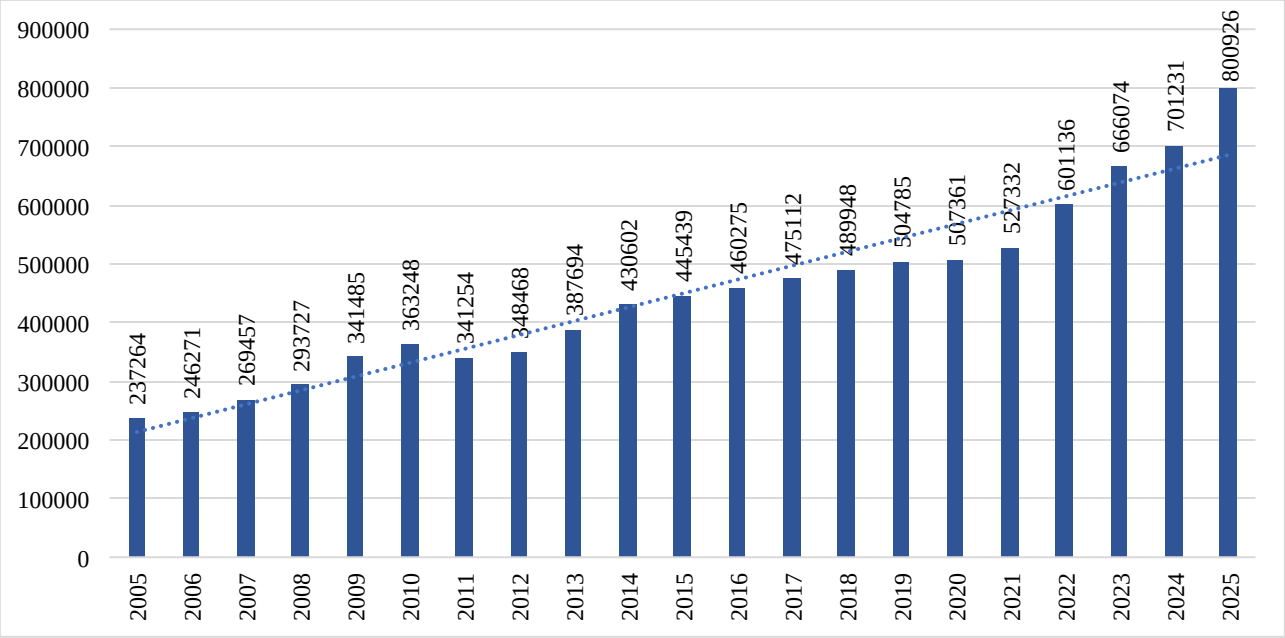


Рисунок 3.11 – Динамика количества зарегистрированных транспортных средств в Республике Таджикистан за 2005–2025 гг.

Источник: Министерство внутренних дел, 2026 г.

За 2005–2025 годы количество зарегистрированных транспортных средств в стране увеличилось более чем в три раза (рисунок 3.11).

В 2019 году их насчитывалось 504 785, в 2024 году — 701 231, а по состоянию на 1 января 2026 года — 800 926 единиц. Таким образом, за 2019–2025 годы прирост составил 58,7%, или в среднем около 49 тыс. транспортных средств ежегодно. Рост численности автотранспортных средств повышает потенциальную нагрузку на атмосферный воздух. Динамика выбросов от передвижных источников представлена на рисунке 3.12; их фактические объёмы зависят также от топливной структуры автопарка, технического состояния транспорта и интенсивности эксплуатации (рисунок 3.12).

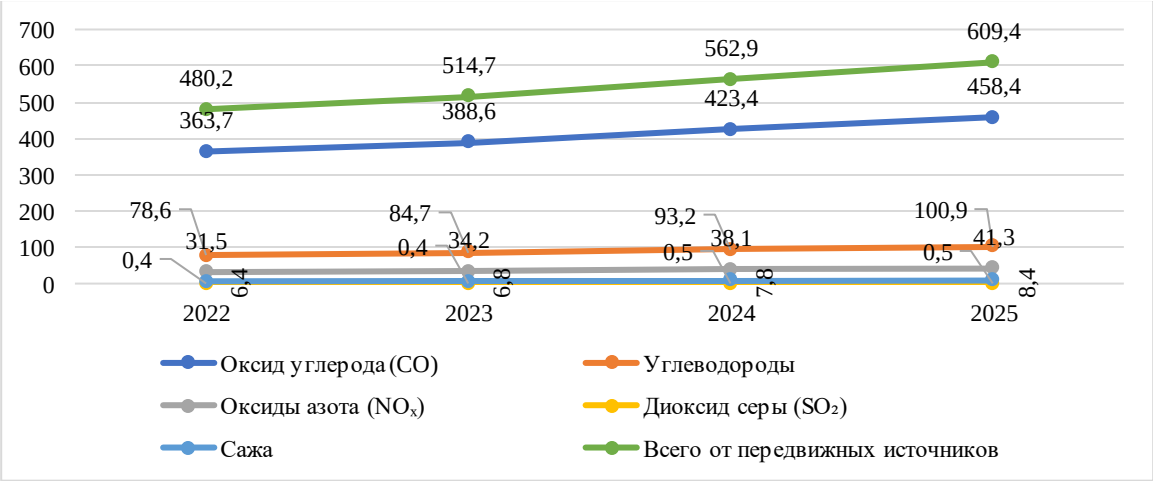


Рисунок 3.12 – Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух от мобильных источников, (тыс. тонн). Источник: Агентство по статистике, 2025 г.

Автотранспорт – это главный источник выбросов выхлопных газов в атмосферу области. Такие газы как оксиды азота и углеводороды, оказывают значительное воздействие на качество воздуха и здоровье людей. Внедрение экологически чистого топлива и развитие общественного транспорта являются важными шагами для снижения негативного воздействия автотранспорта на атмосферный воздух (таблица 3.9).

Таблица 3.9 – Количество автотранспорта (Согдийская область) (тыс.) по годам.

Год	2006	2008	2010	2011	2013	2016	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Всего	94.1	101.9	127.2	134	149	169.1	178.1	179	186.1	212.1	235	247.4	282.6
Бензин и дизель	51.1	56.2	74.2	82.3	71.9	76.1	75.8	76.2	79.2	90.3	100.1	105.4	120.3
Газ	44.3	46.2	53.1	53.4	77.9	94.4	102.2	102.8	106.9	121.8	134.9	142	162.3

Выхлопные газы содержат более 200 ингредиентов. Наиболее опасными из них для здоровья человека являются CH (углеводороды), CO (оксид углерода), NOx (окислы азота), свинец, альдегиды, ЛОЗ и другие канцерогенные вещества. (таблица 3.10)

Таблица 3.10 – Количество автотранспорта и их выбросы по Согдийской области.

Годы	2006	2008	2010	2011	2013	2016	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Общее количество автотранспорта (тыс. шт.), Согдийская область	94,1	101,9	127,2	134,0	149	169,1	178,1	179,01	186,1	212,1	235,0	247,4	282,6
Выбросы от автотранспорта, тыс. тонн	93,6	98,2	82,5	88,2	98,3	134,2	218,8	200,3	181,7	163,2	175	185,8	198,2

Согласно данным госавтоинспекции, на 1 января 2026 года в стране зарегистрировано 800926 транспортных средств. Одновременно развивается электротранспорт, численность которого на 1 июня 2025 года составляла 34354 единицы. Согласно опубликованным научным данным, на 1 января 2025 года в Худжанде учтено 22376 автомобилей. При условии сохранения темпа роста расчётная численность городского автопарка по итогам 2025 года может составить около 25,6 тыс. единиц. (таблица 3.11) [49].

Таблица 3.11 – Динамика численности автотранспорта и выбросов загрязняющих веществ от передвижных источников в городе Худжанде за 2006–2025 годы. (тыс.тонн)

Годы	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2013	2014	2016	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Худжанд, всего тыс.шт.	11,9	13,4	14,3	16,1	16,8	17,2	18,1	18,6	19,2	20,9	21,2	21,5	21,8	22,1	22,4	25,6
В том числе на бензине и дизтопливе	7,3	8,2	8.7	9,6	9,9	9,4	9,5	9,5	8,1	8,1	8,2	8,3	8,4	8,6	8,7	8,9
На газе	4,6	5,2	5,6	6,5	6,9	7,8	8,6	9,1	11,1	12,4	12,6	12,8	12,9	13,1	13,3	15,2
Выброс от автотранспорта тыс.тонн.	9,4	10,6	11,6	12,5	13,3	13,5	14,3	14,5	15,1	15,2	13,4	11,6	11,3	12,2	12,9	13,8

Техническое состояние автотранспорта, вид и качество топлива являются главными причинами выбросов загрязнителей в атмосферный воздух.

В рамках усиления требований к качеству топлива в стране запрещено использование этилированного бензина в качестве автомобильного топлива. Качество горюче-смазочных материалов (ГСМ) проверяется при их ввозе, хранении и реализации на автозаправочных станциях. Контроль за соблюдением установленных требований осуществляется уполномоченными государственными органами в пределах их компетенции.

Технический регламент, утвержденный «Постановлением Правительства Республики Таджикистан от 3 января 2014 года № 30, устанавливает требования к безопасности автомобильного бензина, дизельного топлива, мазута и топлива для реактивных двигателей, а также регулирует вопросы обращения, идентификации, оценки соответствия и сертификации топлива, ввозимого или производимого в РТ» [69, с. 24]. С целью регулирования вопросов безопасности сжиженных углеводородных газов постановлением Правительства Республики Таджикистан от 4 марта 2015 года № 136 был утвержден технический регламент «Безопасность сжиженных углеводородных газов» [70].

Требования к автомобильному топливу в РТ установлены с учетом показателей экологических классов топлива, применяемых в региональной практике технического регулирования. В таблице 3.12 приведены основные параметры бензинового топлива по экологическим классам [69].

Таблица 3.12 – Основные параметры требований для бензинового топлива

Параметр	**Единица измерения**	**Требование к классам топлива**			
		Класс 2	**Класс 3**	**Класс 4**	**Класс 5**
Содержание серы, макс.	Мг/кг	500	150	50	10
Содержание свинца, макс.	Мг/л	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует
Содержание кислорода, макс.	%		2,7	2,7	2,7
Содержание углеводородов, макс.					
Бензол	Объёмная доля	5,0	1,0	1,0	1,0
Ароматические углеводороды	Объёмная доля	-	42,0	35,0	35,0
Олефины	Объёмная доля	-	18,0	18,0	18,0

В Таджикистане с 2000 года запрещено производство и импорт этилированного бензина. С 2015 года дизельное топливо в странах ЕАЭС и в странах импортерах должно соответствовать «Экологическому классу К5, в котором по сравнению с предыдущим классом К4 ужесточены нормативные параметры по содержанию серы на уровне 10 ppm. Благодаря этому достигнуто полное соответствие дизельного топлива класса К5 требованиям евростандарта EN590, 2009 г. Евро-5. Стандарты качества бензина, производимого в странах ЕАЭС с содержанием серы на уровне 50 ppm» [24, с. 12].

Как ранее было отмечено «В Республике Таджикистан к настоящему времени нет разработанных стандартов выбросов загрязнителей для автотранспорта. Есть лишь требования к содержанию ограниченных загрязнителей в выхлопных газах автотранспорта. Они измеряются в ходе ежегодного техосмотра автомобилей. В то же время Закон Республики Таджикистан «Об обеспечении экологической безопасности автомобильного транспорта», принятый 8 августа 2015 года № 1214, предусматривает меры по снижению вредного воздействия автомобильного транспорта на окружающую среду и здоровье населения, а также введение экологической классификации автотранспортных средств» [24].

Можно констатировать, что тенденция роста атмосферных выбросов от транспорта в г. Худжанд, находится на уровне республиканских показателей. Тем не менее, растущая нагрузка, увеличение количества автотранспорта, слабый контроль технического состояния автотранспорта и ухудшение дорожных покрытий приводят к увеличению выбросов.

Развитие и экономический рост страны в будущем будут способствовать увеличению объемов выбросов CO2. В этом плане повышение эффективности работы транспортного сектора можно достигнуть за счет увеличения транспорта, работающего на газе и электричестве и тем самым ослабить воздействие данного сектора на загрязнение воздуха.

Дополнительным показателем интенсивности транспортной деятельности являются данные городской программы развития: объём пассажирских

перевозок в 2025 году увеличился примерно в 1,5 раза по сравнению с 2021 годом, а объём грузовых перевозок — в 2,3 раза [71]. Рост транспортной активности подтверждает необходимость сохранения автотранспорта в числе приоритетных источников при оценке качества воздушного бассейна Худжанда.

3.3.3. Выбросы парниковых газов

Таджикистан не является стороной Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния и, соответственно, не предоставляет регулярные данные в систему EMEP в том же формате, что и страны — участники данной Конвенции. Вместе с тем «Международные оценки, данные EMEP/CEIP и национальные сообщения Республики Таджикистан в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата позволяют анализировать динамику выбросов парниковых газов и отдельных загрязнителей атмосферного воздуха» [39, 123, 127].

Данные о загрязнении атмосферного воздуха, представляемые Агентством по статистике при Президенте Республики Таджикистан, рассчитываются на основе суммарных атмосферных выбросов от стационарных и передвижных источников. В Республике Таджикистан доля выбросов от мобильных источников является значительной, что подтверждает важность учета транспортного сектора при анализе формирования воздушной среды городов, включая г. Худжанд.

Особенностью Республики Таджикистан является сравнительно низкий уровень выбросов CO_2 на душу населения по сравнению со многими странами региона и мира. Это связано с высокой долей гидроэнергетики в структуре производства электроэнергии и относительно ограниченным использованием ископаемого топлива. Однако отдельные сектора экономики, включая транспорт, промышленность, сельское хозяйство, отходы и бытовое использование топлива, сохраняют значимость как источники выбросов парниковых газов и загрязнителей атмосферного воздуха [94, 127].

Инвентаризация парниковых газов (ПГ), представленная в Третьем и Четвёртом национальных сообщениях Республики Таджикистан, охватывала исторические периоды до 2016 года. В 2024 году подготовлен Первый

двухгодичный доклад о транспарентности с обновлённой национальной инвентаризацией за 1990–2022 годы. Выбросы выражаются в гигаграммах CO_2-эквивалента (1 Гг = 1000 т). При сопоставлении данных необходимо учитывать пересмотр методологии и коэффициентов расчёта [94, 127].

На рисунке 3.13 представлены оценки выбросов ПГ в Республике Таджикистан на период с 2005 по 2022 гг.

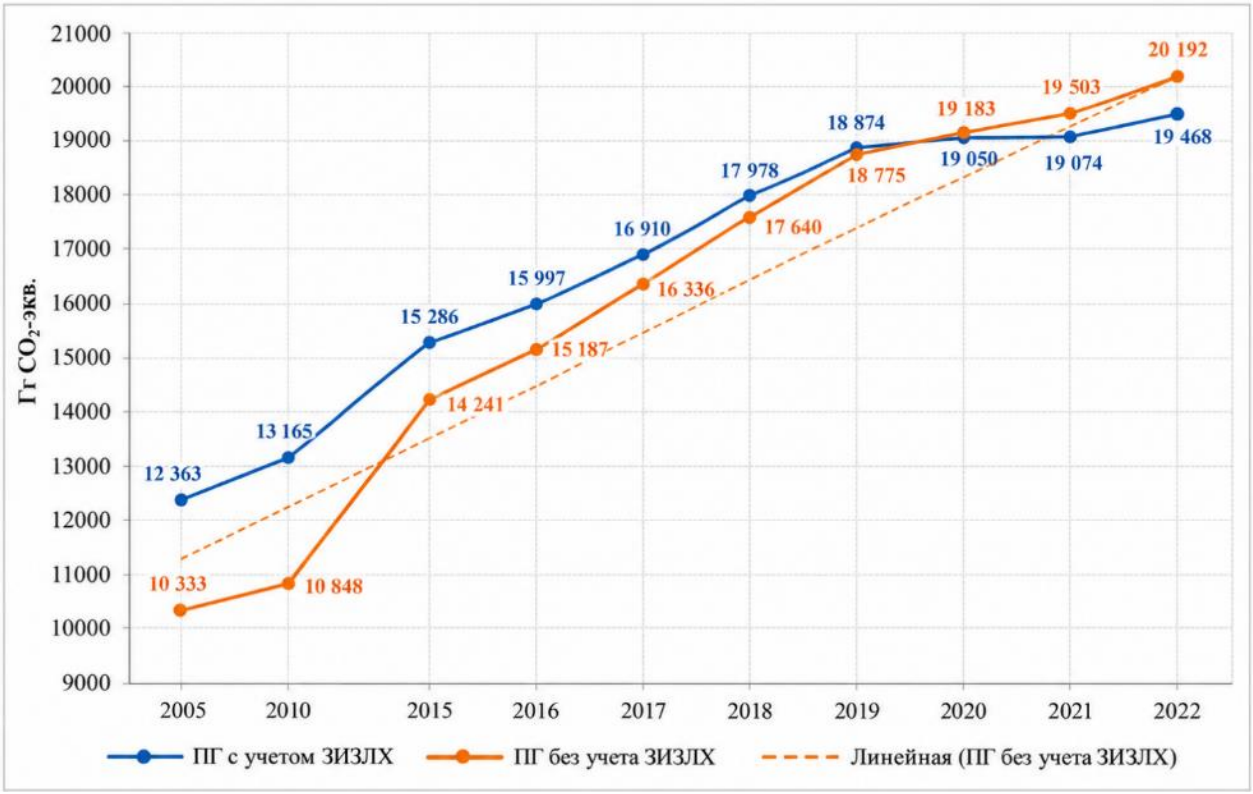


Рисунок 3.13. – Динамика выбросов парниковых газов за 2005–2022 гг., Гг в CO2 экв. (ЗИЗЛХ-Землепользование, изменения в землепользовании и лесном хозяйстве)

Как указано в отчёте Конвенции об изменении климата в РТ «В 2014 году общий объем выбросов парниковых газов в РТ составил около 7650 Гг CO_2-экв. Сектор землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства обеспечивал поглощение части выбросов. Суммарный объем выбросов без учета данного сектора был выше, чем показатель с учетом поглощения. Согласно данным Четвертого национального сообщения, в 2016 году суммарные выбросы парниковых газов без учета сектора ЗИЗЛХ составили 15 572,98 Гг CO_2-экв., а с учетом ЗИЗЛХ — 13 974,56 Гг CO_2-экв» [127, с. 114].

Согласно историческим оценкам EMEP/CEIP, в 2000–2013 годах наблюдалась тенденция увеличения выбросов SO_2, NO_x, NH_3, ЛОС, CO, PM2,5 и

PM10 [123]. По оценкам Всемирного банка, в 2020 году выбросы SO_2 составляли 50,1 Гг, NO_x — 59,5 Гг, NH_3 — 55,5 Гг и PM2,5 — 54,6 Гг. В таблице 3.13 представлены исторические и обновлённые оценки, дополненные расчётными значениями за 2015 и 2025 годы. Различия в методиках учёта и моделирования необходимо учитывать при анализе динамики выбросов. [123].

Таблица 3.13 – Динамика и расчётные оценки выбросов основных загрязняющих веществ в Республике Таджикистан за 2000–2025 гг., Гг

	2000	2005	2010	2015	2020	2025
SO_2	20,5	31	43	46,6	50,1	53,7
NO_x	30,5	49	68	63,8	59,5	55,3
NH_3	19	30	41	48,3	55,5	62,8
ЛОС	15	23	32	43,7	55,3	67,0
CO	360	575	791	1106	1421	1736,0
$ТЧ_{2,5}$	12	19	26	40,3	54,6	68,9
$ТЧ_{10}$	23	37	51	71,0	91,0	111,0

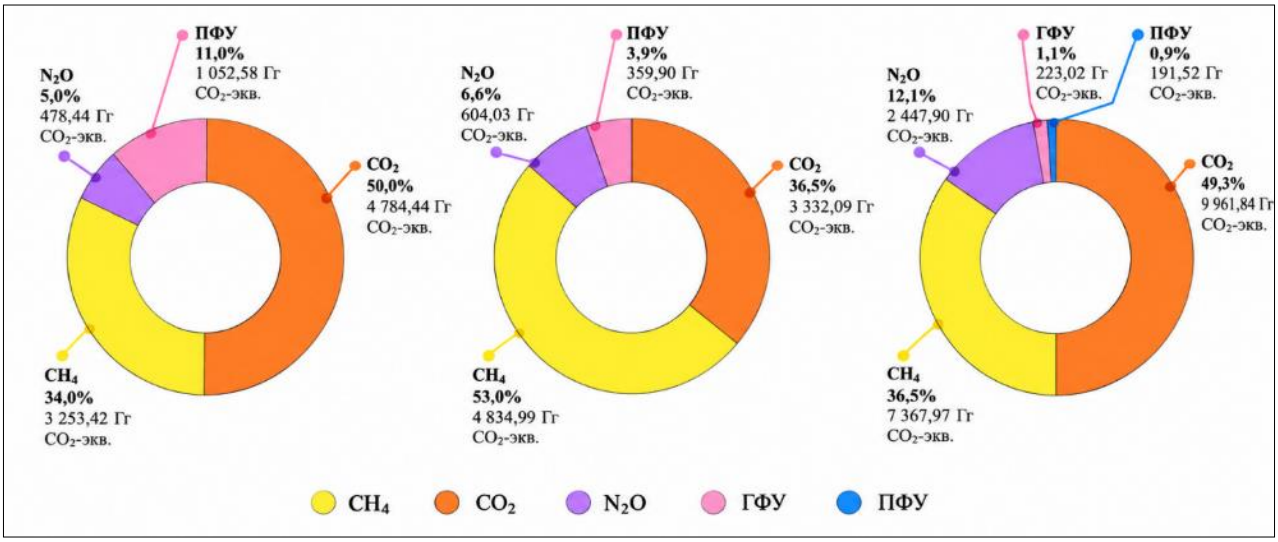


Рисунок 3.14 – Процентные соотношения выбросов ПГ в РТ (2004, 2014, 2022 гг).

В 2014 году значительную долю в структуре выбросов парниковых газов составляли CH_4, CO_2 и N_2O. Наибольший вклад в выбросы метана и закиси азота был связан с сельскохозяйственным сектором, тогда как сектор отходов также вносил вклад в выбросы метана. На сектор промышленности приходилась значительная часть выбросов CO_2.

В соответствии с данными таблицы 3.14, сектор «Сельское хозяйство» являлся основным источником выбросов парниковых газов в 2014 году.

Наибольший объем выбросов CH_4 и N_2O был связан с сельским хозяйством, прежде всего с животноводством, управлением навозом и использованием азотных удобрений. Сектор отходов внес существенный вклад в выбросы метана, тогда как сектор промышленности и энергетики был связан главным образом с выбросами CO_2.

Таблица 3.14 – Выбросы ПГ по отраслям и видам за 2014 год в РТ. (Гг в CO2 экв.)

	CO_2	CH4	N2O	PFC	Итого CO2 экв.
Энергетика	2475,46	56,02	12,12	-	2543,60
ППИП	798,75	-	-	359,90	1158,65
Сельское хозяйство	57,89	3988,75	509,51	-	4556,15
Отходы	-	790,22	82,39	-	872,62
Общие эмиссии (без учета сектора ЗИЗЛХ)	**3332,09**	**4834,99**	**604,03**	**359,90**	**9131,01**
ЗИЗЛХ	-1576,60	-	-	-	-1576,60
Эмиссии с учетом поглощения (с учетом сектора ЗИЗЛХ)	**1755,50**	**4834,99**	**604,03**	**359,90**	**7554,42**

Четвертое национальное сообщение Республики Таджикистан уточняет структуру выбросов за более поздний период. В 2016 году сельское хозяйство оставалось ключевым сектором выбросов парниковых газов и составляло 44,7 % от всех национальных выбросов в CO_2-экв.; энергетический сектор занимал второе место и составлял около 42 %. Основная доля CO_2 приходилась на энергетический сектор, тогда как основная доля CH_4 и N_2O была связана с сельским хозяйством [127].

Правительство Республики Таджикистан в обновленном национально определяемом вкладе определило целевой ориентир по ограничению выбросов парниковых газов к 2030 году. Безусловный вклад предусматривает, что выбросы не должны превышать 60–70 % от уровня 1990 года, а при наличии международной финансовой и технической поддержки — 50–60 % от уровня 1990 года [150]. Реализация этих целей требует привлечения инвестиций, модернизации энергетической и транспортной инфраструктуры, повышения энергоэффективности, расширения использования возобновляемых источников энергии и совершенствования системы учета выбросов.

3.3.4. Бытовые выбросы

В прежние годы многоэтажные дома во многих городах республики обогревались за счет функционирования централизованных систем теплоснабжения, которые использовали газ. С прекращением поставок газа с территории соседнего государства и приходом систем централизированного теплоснабжения в негодность, они прекратили своё функционирование и здания в городах в настоящее время отапливаются в основном за счет использования электрической энергии и твердого топлива.

Всё больше в настоящее время в Республике Таджикистан системы индивидуального и централизованного отопления производят возрастающий объем загрязняющих веществ атмосферного воздуха, тем самым нанося ущерб состоянию воздушного бассейна городов и райцентров.

В Согдийской области природный газ, по причине его отсутствия, практически не используется для отопления социальных объектов, жилых домов, функционирования промышленных предприятий. Только в последние годы, осуществляется подача природного газа некоторым стратегическим промышленным объектам, которые расположены недалеко от центральных линий подачи газа. Население области и республики в основном использует электроэнергию как основной источник для обогрева помещений и приготовления пищи. Этот вид топлива составляет 50% от общего объема используемой для этих нужд энергии. Далее идет древесное топливо (22%) и сжиженный газ.

Дальнейшая урбанизация страны, происходящая за счет миграции сельского населения в города и общего роста численности населения страны, влечет за собой дальнейшее повышение объемов загрязнителей воздуха особенно в осенне-зимний период из-за использования твердого и биотоплива.

Вклад от сжигания топлива населением является третьим по объему в общих выбросах и составляет 2,5–3,0 тыс.тонн в год. Прослеживается тенденция увеличения использования населением твердого топлива для приготовления пищи и обогрева помещений. В связи с изменением климата, маловодием и

недостаточной для нужд республики выработкой электроэнергии, использование видов топлива, производящих выбросы парниковых газов будет сохраняться на высоком уровне. Соответственно будет сохраняться и даже увеличиваться объемы выбросов в атмосферу.

При оценке площадных источников следует также учитывать строительную активность. По данным Программы социально-экономического развития города, объём капитальных вложений в строительную отрасль в 2025 году по сравнению с 2021 годом увеличился в 4,5 раза [71]. Строительные площадки, земляные работы, движение грузового транспорта и открытые поверхности являются дополнительными источниками пылевой нагрузки, особенно в сухой период года.

3.3.5. Трансграничные выбросы

Трансграничные выбросы представляют собой перенос загрязняющих веществ, сформированных на территории одного государства или региона, на территорию другого государства или соседней территории. Такой перенос может происходить через атмосферный воздух, водные объекты и почвенно-пылевые процессы. В отношении качества атмосферного воздуха особое значение имеют дальний перенос пыли, вторичных аэрозолей, оксидов серы, оксидов азота, аммиака и других загрязнителей [39, 149].

Проблема трансграничного загрязнения является актуальной для регионов, где атмосферные процессы, пылевые бури, промышленная активность, сельскохозяйственные работы и дорожно-строительные мероприятия могут приводить к переносу загрязняющих веществ на значительные расстояния. Одной из сложностей регулирования данного вопроса является различие национальных стандартов, методик учета выбросов и механизмов экологического контроля в разных странах.

Трансграничный перенос загрязняющих веществ может оказывать воздействие на качество атмосферного воздуха, состояние почв, водных объектов, экосистем и здоровье населения. В Центральной Азии данный вопрос имеет особую актуальность в связи с пылевыми бурями, аридным климатом,

деградацией земель, трансграничным переносом аэрозолей и расположением промышленных и сельскохозяйственных источников загрязнения вблизи государственных границ.

Для решения проблемы трансграничного загрязнения необходимо международное сотрудничество, обмен данными, развитие систем мониторинга, применение сопоставимых методик инвентаризации выбросов и участие в международных механизмах экологической отчетности. Важное значение имеют также развитие региональных баз данных, гармонизация подходов к оценке выбросов и расширение доступа к экологической информации.

В контексте г. Худжанд трансграничное загрязнение воздуха следует рассматривать как дополнительный фактор, который может усиливать локальное загрязнение в отдельные периоды. С учетом географического положения города и характерной для данной территории розы ветров основной вклад в загрязнение воздуха формируется локальными источниками — автотранспортом, промышленными объектами, строительством, бытовым сектором и пылеобразующими поверхностями. Однако в периоды пахотных работ, дорожно-строительных мероприятий, пыльных бурь и активного строительства на сопредельных территориях вклад переносимых частиц может возрастать.

Значимость природного и регионального переноса для Худжанда подтверждается исследованиями сильной пылевой бури 3–4 ноября 2021 года, когда пылевой шлейф достиг города и сопровождался резким снижением видимости. Эти данные показывают, что при анализе высоких концентраций взвешенных частиц наряду с локальными источниками необходимо учитывать эпизодическое поступление пылевого аэрозоля воздушными массами [112].

Выводы по главе 3

1. Антропогенные источники загрязнения воздуха не являются единственным фактором, определяющим состояние воздушной среды г. Худжанд. Метеорологические и топографические факторы оказывают значительное влияние на концентрацию, перенос и рассеивание загрязняющих веществ в атмосферном воздухе города.

2. Климатологические и метеорологические особенности г. Худжанд включают ряд показателей, влияющих на формирование воздушной среды и уровень загрязнения атмосферного воздуха. Среди положительных факторов следует выделить высокую степень турбулентности в приземном слое атмосферы и низкую частоту температурных инверсий, что способствует рассеиванию загрязняющих веществ.
3. Анализ температурных показателей и осадков показывает наличие тенденции к изменению климатических условий. В частности, в жаркий период года наблюдается снижение количества осадков, а средняя летняя температура повышается на 1,67 °C по сравнению с многолетней нормой. За период с 1936 по 2020 год количество осадков отклонялось от установленных норм, особенно за последние 20 лет. Максимальные среднемесячные значения осадков составляют 29,44 мм в апреле, а минимальные — 3,99 мм в сентябре.
4. Несмотря на общее увеличение годового количества осадков в отдельные годы, в летний период при высоких температурах атмосферного воздуха наблюдается снижение количества осадков. Это способствует формированию условий экстремальной жары, резких температурных перепадов и порывистых западных и юго-западных ветров со скоростью 4–6 м/с.
5. За последние 100 лет средняя высокая температура по месяцам составила +28,25 °C, а средняя низкая — –0,94 °C. С 1981 года наблюдается стабильное повышение зимних температур, а с 2011 года — более резкий скачок потепления. В самый жаркий месяц — июль — за последние 10 лет средняя температура составила 29,34 °C, а в самый холодный месяц — январь — 1,59 °C. Эти показатели свидетельствуют о тенденции к изменению температурного режима.
6. Сравнение атмосферных выбросов 2018 года с 1991 годом показывает, что доля твердых веществ в общих выбросах увеличилась с 28,6 % до 34 %, что связано с увеличением использования твердого топлива и ограничением доступа к природному газу. Доля диоксида серы возросла с 23,7 % до 28,9 %, а доля оксида углерода уменьшилась с 59,7 % до 56 %. Выбросы

углеводородов и прочих веществ увеличились в 1,5–2, тогда как выбросы оксидов азота уменьшились почти в 3 раза. Материалы 2-ТП (воздух) за 2023–2025 гг. использованы для актуализации характеристики стационарных источников города и подтверждают необходимость продолжения системного контроля промышленных выбросов [46].

7. Наибольший вклад в загрязнение атмосферного воздуха вносят выбросы от автотранспорта. Общее количество автотранспортных средств по Согдийской области составило около 178 тыс. единиц по данным 2019 года. По данным Министерства транспорта, на 1 марта 2024 года в стране было зарегистрировано более 650 тыс. единиц автотранспорта, в том числе электромобили. В выхлопных газах содержится более 200 компонентов, среди которых наиболее опасными являются CO, CH, NOx, альдегиды, свинец и другие токсичные и канцерогенные вещества. Выбросы от автотранспорта составляют основную долю загрязнения атмосферного воздуха по Согдийской области. Дополнительным подтверждением высокой транспортной нагрузки являются данные о росте пассажирских перевозок примерно в 1,5 раза и грузовых перевозок в 2,3 раза за 2021–2025 гг. [71]. Наряду с транспортом существенное значение имеют стационарные промышленные, коммунально-бытовые и площадные источники, а в отдельные периоды — природный и трансграничный перенос пыли.

ГЛАВА 4. АНАЛИЗ, ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В г. ХУДЖАНД

4.1. Обоснование и выбор метода определения качества воздуха

В рамках настоящего исследования автоматизированный мониторинг осуществлялся по трём фракциям взвешенных частиц: PM1,0, PM2,5 и PM10. При этом в качестве основного показателя для углублённого статистического анализа, оценки пространственно-временной изменчивости и математического моделирования выбрана массовая концентрация PM2,5. Такой выбор обусловлен высокой экологической и санитарно-гигиенической значимостью мелкодисперсных частиц, их способностью проникать в глубокие отделы дыхательной системы, а также наличием международных рекомендаций ВОЗ по допустимым среднегодовым и среднесуточным уровням концентраций. Данный подход обеспечивает соответствие методов анализа поставленным задачам исследования и позволяет сосредоточить внимание на наиболее значимом для оценки качества городской воздушной среды показателе.

Одним из основных методов анализа качества атмосферного воздуха является мониторинг, который предполагает систематический сбор, измерение, обработку и интерпретацию данных о состоянии воздушной среды. Современные технологии позволяют использовать автоматизированные станции и оптические датчики для непрерывного измерения концентраций мелкодисперсных частиц и сопутствующих метеорологических параметров. Такой подход особенно важен для городов, где государственная сеть наблюдений имеет ограниченный пространственный охват и не обеспечивает достаточного объема данных по PM1,0, PM2,5 и PM10 [116, 120].

Альтернативным или дополнительным методом анализа данных качества атмосферного воздуха выступает математическое моделирование. Данный метод позволяет оценивать распространение загрязняющих веществ на основе информации об источниках выбросов, метеорологических условиях, характеристиках городской застройки и исторических данных наблюдений. Моделирование может применяться для оценки вклада различных источников

загрязнения, выявления зон повышенного риска и разработки практических рекомендаций по снижению загрязнения воздуха [124, 153].

Важное значение имеет статистический анализ, который позволяет выявлять связи между концентрациями загрязняющих веществ и метеорологическими параметрами, анализировать временные ряды, определять сезонные, месячные, недельные и суточные изменения, а также проводить сравнительный анализ данных по различным точкам наблюдений. Для настоящего исследования данный подход является одним из ключевых, поскольку обработка данных охватывает многолетний период наблюдений и включает сопоставление концентраций PM2,5 с температурой, влажностью, атмосферным давлением, осадками и ветровым режимом [110, 153].

С учетом развития цифровых технологий и расширения сетей автоматизированного мониторинга качества воздуха возрастает значение методов обработки больших данных, геоинформационного анализа, искусственного интеллекта и машинного обучения. Эти методы позволяют обрабатывать крупные массивы данных, выявлять скрытые закономерности, классифицировать периоды загрязнения, обнаруживать аномальные значения и формировать прогнозные оценки качества воздуха. В рамках настоящего исследования данные подходы рассматриваются как перспективное направление для дальнейшего развития системы мониторинга качества воздуха в г. Худжанде и других городах РТ [119, 133, 139].

Таким образом, методы анализа качества атмосферного воздуха включают комплекс взаимодополняющих подходов, позволяющих оценить уровень загрязнения воздуха, выявить закономерности его сезонного изменения, установить связь с метеорологическими факторами и обосновать практические меры по улучшению качества воздушной среды.

В соответствии с целью и задачами исследования для оценки качества воздуха г. Худжанд применён комплекс взаимодополняющих методов:

1. Инструментальный мониторинг — регистрация массовых концентраций PM1,0, PM2,5 и PM10 с использованием оптических сенсоров Plantower

PMS5003 и сопутствующих метеорологических параметров с использованием датчиков BME280.

2. Анализ временных рядов — определение межгодовой, сезонной, месячной и суточной изменчивости концентраций PM2,5, выявление периодов повышенного загрязнения и оценка повторяемости превышений выбранных пороговых значений.

3. Статистический и корреляционно-регрессионный анализ — количественная оценка взаимосвязей концентраций PM2,5 с температурой воздуха, относительной влажностью и атмосферным давлением, а также сравнительный анализ изменений концентраций при различных условиях атмосферного рассеивания.

4. Физико-математическое моделирование — расчёт распространения загрязняющих веществ от стационарного источника с использованием гауссовой модели рассеивания, анализ изменения приземных концентраций в зависимости от расстояния и метеорологических условий, сопоставление расчётных результатов с контрольными измерениями.

Пространственная привязка пунктов наблюдений и картографическая визуализация использовались для представления территориальных особенностей загрязнения атмосферного воздуха.

Применение указанных методов позволяет объединить результаты инструментальных наблюдений, статистической обработки и расчётного моделирования в единую систему оценки качества атмосферного воздуха г.Худжанд. Использование алгоритмов машинного обучения, расширенного геоинформационного моделирования и автоматизированного прогнозирования рассматривается как перспективное направление дальнейшего развития предложенного подхода.

4.2. Результаты мониторинга качества атмосферного воздуха в г. Худжанде

На фоне принятия государственных стратегических программ «зеленого» развития Республики Таджикистан данные экологического мониторинга пока недостаточно используются при принятии управленческих решений, разработке

политики и информировании общественности. Действующая законодательная база устанавливает обязательства по мониторингу и контролю состояния окружающей среды, однако в настоящее время отсутствует единый национальный документ, специально регулирующий организацию мониторинга качества атмосферного воздуха, включая применение автоматизированных станций и недорогих сенсорных систем [23, 25, 27].

Мониторинг качества атмосферного воздуха в г. Худжанде был организован с учетом принципов построения сети наблюдений, пространственного охвата территории города, расположения основных транспортных коридоров, жилых массивов и зон потенциального загрязнения. При выборе точек установки датчиков учитывались необходимость получения сопоставимых данных по различным частям города, техническая возможность размещения оборудования, доступ к электропитанию и возможность передачи данных на онлайн-платформы.

Датчики были настроены на анализ качества атмосферного воздуха 24 часа в сутки, с интервалом измерения каждые 5 минут, и выводом данных на онлайн платформах www.airkaz.org, www.ygpe.tj и в других глобальных ресурсах по качеству воздуха. Система мониторинга качества атмосферного воздуха фиксировала показатели, усредненные за каждый час и за 24 часа.

Структура записи данных включает такие данные как: (рисунок 4.1)

1. ID – номер записи данных;
2. HOUR – время записи данных;
3. DATE – дата записи данных;
4. SENSORID – идентификационный номер сенсора;
5. PM10 – данные по концентрации PM10 на кубический метр;
6. PM2,5 – данные по концентрации PM2,5 на кубический метр;
7. PM1 – данные по концентрации PM1 на кубический метр;
8. TEMP – данные по температуре воздуха;
9. HUMID – данные по влажности воздуха;
10. PRESS – данные по атмосферному давлению;

Необходимо отметить, что использованные датчики имеют возможность расширения сбора регистрируемых параметров через подключения дополнительных сенсоров.

1	id	hour	date	sensorid	pm10	pm25	pm1	temp	humid	press	error
65727	801726	1	20.02.2021 1:00	31794593	34.93	30.74	18.33	8.96	61.17	983	0
65782	801781	2	20.02.2021 2:00	31794593	17.79	15.82	9.68	8.97	58.26	983	0
65838	801837	3	20.02.2021 3:00	31794593	18.28	16.14	10.34	8.72	60.82	983	0
65895	801894	4	20.02.2021 4:00	31794593	26.81	23.47	14.4	7.96	68.3	983	0
65949	801948	5	20.02.2021 5:00	31794593	29.48	25.95	15.76	7.58	74.55	984	0
66003	802002	6	20.02.2021 6:00	31794593	26.05	23.04	13.86	7.37	73.22	984	0
66058	802057	7	20.02.2021 7:00	31794593	37.29	33.31	19.12	7.2	72.32	984	0
66113	802112	8	20.02.2021 8:00	31794593	41.3	36.37	20.58	7.23	71.52	984	0
66169	802168	9	20.02.2021 9:00	31794593	50.31	42.1	24.6	7.25	71.45	984	0
66226	802225	10	20.02.2021 10:00	31794593	56.42	46.26	28.26	7.61	70.39	984	0
66283	802282	11	20.02.2021 11:00	31794593	65.96	53.43	31.75	8.38	67.52	984	0
66340	802339	12	20.02.2021 12:00	31794593	80.46	67.44	36.63	9.16	64.18	984	0
66398	802397	13	20.02.2021 13:00	31794593	79.91	66.16	34.83	9.87	61.9	984	0
66456	802455	14	20.02.2021 14:00	31794593	79.7	66.49	34.79	10.34	61.07	983	0
66514	802513	15	20.02.2021 15:00	31794593	81.29	68.45	35.78	10.33	60.52	983	0

Рисунок 4.1 – Пример регистрации данных, передаваемых сенсором 31794593 (Шелкокомбинат) г. Худжанд на ежечасной основе.

За период сбора данных по таким показателям как PM10, PM2,5, PM1, Temp (температура атмосферного воздуха), Humid (влажность), Press (атмосферное давление), который охватывал период с января 2019 года по март 2024 года, общее количество зарегистрированных показателей с 4-х датчиков, установленных в г. Худжанде составило более 735 840 в ежечасном формате и 30 660 записей в среднесуточном формате.

С учетом национальных нормативов по PM2,5, используемых в РТ, а также международных рекомендаций ВОЗ «Обработка данных была сосредоточена на анализе концентраций PM2,5 и сопутствующих метеорологических параметров: температуры воздуха, относительной влажности, атмосферного давления, осадков и ветрового режима» [109, 152]. Важно учитывать, что рекомендации ВОЗ 2021 года устанавливают более строгие ориентиры для PM2,5 по сравнению с ранее использовавшимися значениями: среднегодовой уровень — 5 мкг/м³, среднесуточный уровень — 15 мкг/м³ [152]. Для оценки повторяемости повышенных концентраций в настоящем исследовании дополнительно использован среднесуточный порог 35 мкг/м³, принятый в используемой национальной нормативной базе. Раздельное применение указанных критериев

позволяет сопоставлять результаты мониторинга с национальными требованиями и международными рекомендациями.

Для оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха использовано среднесуточное допустимое значение концентрации PM2,5, применяемое в Республике Таджикистан, — 35 мкг/м³ (0,035 мг/м³). Данный показатель используется в национальной практике мониторинга качества атмосферного воздуха. Превышение указанного значения рассматривается в исследовании как превышение принятого среднесуточного норматива PM2,5.

С учетом технических характеристик использованных датчиков PMS5003 и собранных данных за период исследования была проведена первичная обработка массива данных для исключения ошибочных записей. Из 30 660 среднесуточных записей было выявлено около 120 ошибочных или некорректных значений, что составляет менее 0,4 % общего массива данных. Такие записи были исключены из анализа.

При обработке массива измерений PM2,5 использован единый поправочный коэффициент 0,90, соответствующий уменьшению зарегистрированных концентраций на 10%. Данный коэффициент принят в качестве расчётного допущения с учётом технических ограничений применяемых оптических сенсоров PMS5003 [141]. Указанная корректировка не меняет общей логики исследования, поскольку основная задача работы заключалась не в сертифицированном нормативном контроле, а в выявлении сезонных закономерностей, динамики концентраций PM2,5 и влияния метеорологических факторов — осадков, влажности, температуры и ветра — на содержание ТЧ в атмосферном воздухе г. Худжанд.

Вместе с тем для повышения точности дальнейших исследований необходимо продолжить сбор данных с использованием эталонных или референтных станций измерения концентраций взвешенных частиц. Это позволит провести полноценную калибровку недорогих сенсоров, определить их применимость в климатических условиях Республики Таджикистан и повысить надежность данных автоматизированного мониторинга.

Таким образом, количество дней с определенными показателями концентрации мелкодисперсных частиц PM2,5 в течение 5 лет зафиксированы следующим образом (таблица 4.1):

Таблица 4.1 – Распределение количество дней по концентрациям мкг/м³ в год с учетом локации сенсоров в г. Худжанд, (19 – 19 микрорайон, В – Ватан, 31 – 31 микрорайон, Ш – Шёлкокомбинат)

Показатели PM2,5	2019	2020	2021				2022				2023			
	19	19	19	В	31	Ш	19	В	31	Ш	19	В	31	Ш
с 0 до 15 мкг/м³	0	2	8	20	14	1	24	0	0	1	2	0	0	5
с 15 до 35 мкг/м³	183	181	174	172	194	126	152	153	191	166	189	202	181	101
с 35 до 50 мкг/м³	53	51	46	42	39	80	64	104	70	81	47	54	52	114
с 50 до 150 мкг/м³	117	124	107	118	93	110	109	102	91	105	103	98	110	117
выше 150 мкг/м³	12	8	30	13	25	48	16	6	13	12	24	11	22	28

Анализ распределения среднесуточных концентраций PM2,5 показал значительную повторяемость повышенных уровней загрязнения атмосферного воздуха г. Худжанд. По данным пункта «19-й микрорайон», в 2019 году концентрации выше 35 мкг/м³ зарегистрированы в течение 182 дней, что составляет 49,9% календарного года, а в 2020 году — в течение 183 дней, или 50,0%. В 2021–2023 годах, когда анализ охватывал четыре пункта мониторинга, доля суточных наблюдений с концентрациями выше 35 мкг/м³ составила соответственно 51,4%, 52,9% и 53,4%.

Полученные результаты свидетельствуют о сохранении высокой повторяемости повышенных концентраций мелкодисперсных частиц. Вместе с тем при интерпретации межгодовой динамики необходимо учитывать изменение количества пунктов наблюдений, поскольку расширение сети влияет на пространственную представительность результатов. Среднегодовые концентрации PM2,5 по данным пункта «19-й микрорайон» изменялись неравномерно: 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 приведённые значения существенно превышают рекомендуемый ВОЗ среднегодовой уровень 5 мкг/м³

[152]. При интерпретации данных необходимо учитывать, что приведённые среднегодовые показатели относятся к одному пункту наблюдений, тогда как распределение концентраций по диапазонам за 2021–2023 годы рассчитано по совокупности четырёх пунктов сети. Полученные результаты свидетельствуют о сохранении высокого уровня аэрозольного загрязнения с выраженными сезонными и межгодовыми колебаниями.

Таблица 4.2 – Распределение количество дней по концентрациям мкг/м³ в год с учетом локации сенсоров в г. Худжанд в % соотношений

Показатели PM2,5	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**
с 0 до 15 мкг/м³	0,0%	0,5%	2,9%	1,7%	0,5%
с 15 до 35 мкг/м³	50,1%	49,5%	45,6%	45,3%	46,1%
с 35 до 50 мкг/м³	14,5%	13,9%	14,2%	21,8%	18,3%
с 50 до 150 мкг/м³	32,1%	33,9%	27,9%	29,5%	29,3%
выше 150 мкг/м³	3,3%	2,2%	7,9%	3,2%	5,8%

За 2019–2020 годы распределение рассчитано по данным пункта «19-й микрорайон», за 2021–2023 годы — по совокупности наблюдений на четырёх пунктах мониторинга. При расчёте процентов учитывалось общее количество суточных наблюдений по всем представленным пунктам. Поэтому показатели за 2021–2023 годы характеризуют долю наблюдений на пунктах сети, а не долю календарных дней города.

Это указывает на тенденцию увеличения среднегодовой концентрации мелкодисперсных частиц PM2,5. (таблица 4.2 и рис.4.2) На увеличение дней, превышающих установленные нормы, могут влиять многие факторы природного и антропогенного характера такие как количество осадков, ветра, температура, влажность, а также демографические показатели, увеличение количества транспорта и промышленных объектов, объемы использования путем сжигания твердого топлива, энерголимиты и другие факторы.

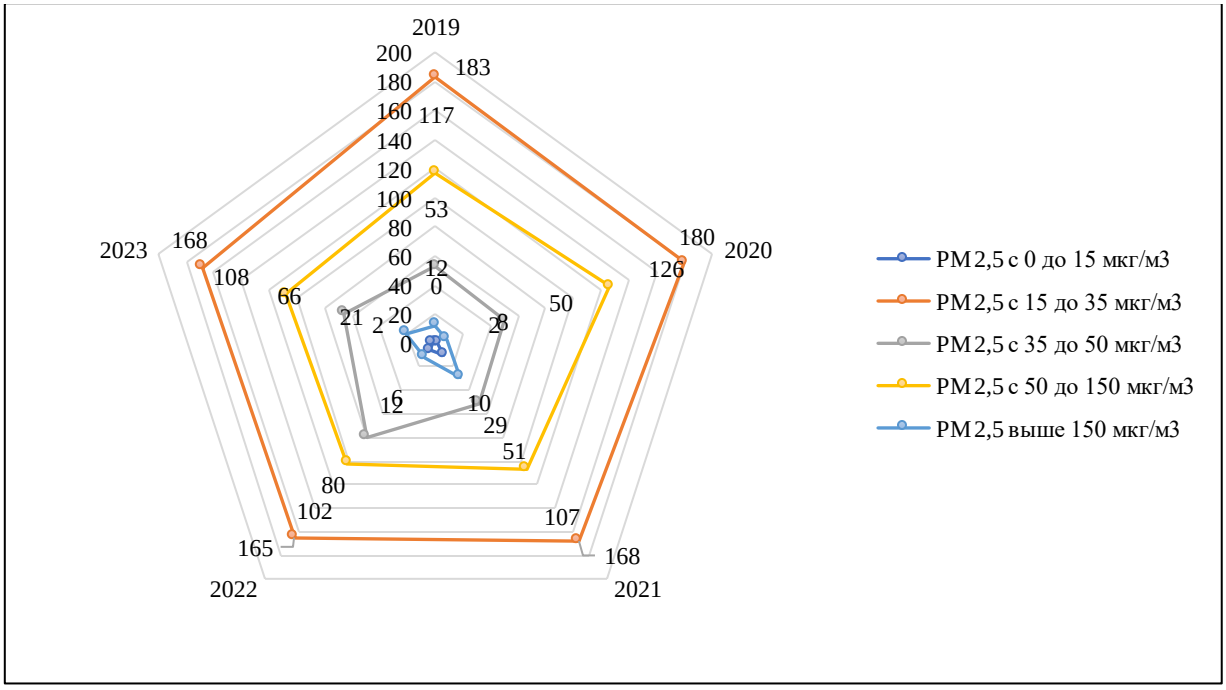


Рисунок 4.2 – Пентаграмма тенденции изменений уровня концентрации PM2,5 в атмосферном воздухе с 2019 по 2023 гг. в г. Худжанд

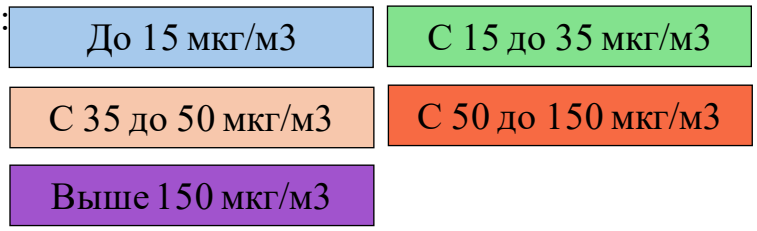
Полученные результаты подтверждают практическую применимость автоматизированных сенсорных систем для выявления временных и пространственных особенностей загрязнения атмосферного воздуха г. Худжанд. Использование относительно недорогих оптических датчиков позволяет расширять территориальный охват наблюдений и получать оперативную информацию о концентрациях мелкодисперсных частиц. Вместе с тем для повышения сопоставимости и достоверности результатов необходимо совершенствовать процедуры контроля качества данных, проводить сравнительные измерения с референтными приборами и развивать интеграцию сенсорных систем с государственной сетью экологического мониторинга.

4.3. Результаты анализа данных по итогам наблюдения

Для выявления закономерностей изменения концентраций PM2,5 проведён анализ результатов автоматизированного мониторинга за 2019–2023 годы. Детальный анализ среднесуточных значений за 2019–2022 годы представлен в таблицах 4.3–4.6 на основе временных рядов пункта наблюдения «19-й микрорайон». Дополнительно использованы результаты наблюдений других пунктов сети и сопутствующие метеорологические данные. Такой подход

позволяет оценить внутригодовую изменчивость концентраций, определить периоды повышенного загрязнения и выявить взаимосвязи между содержанием мелкодисперсных частиц и температурой воздуха, относительной влажностью, атмосферным давлением, осадками и ветровым режимом [110, 153]. Ниже идут таблицы 4.3–4.6 по PM2,5.

Цветовые обозначения:



Визуализация данных является одним из эффективных подходов представления данных, что даёт возможность визуально воспринимать и анализировать ситуацию. В таблицах приведенных ниже представлены данные, где все дни, имеющие среднесуточный показатель мелкодисперсных частиц выше 35 мкг/м³ (PM2,5) обозначены как светло красный, красный и фиолетовый.

Анализ среднесуточных концентраций PM2,5 за 2019 год (таблица 4.3) показал выраженную сезонную изменчивость загрязнения атмосферного воздуха. В январе и феврале все зарегистрированные среднесуточные значения превышали 35 мкг/м³. Снижение концентраций наблюдалось начиная с марта, когда зафиксировано пять дней с показателями ниже указанного порога. В апреле количество таких дней увеличилось до 23, а в мае и июне концентрации не превышали 35 мкг/м³ на протяжении всех дней наблюдений. В октябре количество дней с концентрациями ниже 35 мкг/м³ сократилось до шести.

Выявленная сезонная изменчивость может быть связана со снижением отопительной нагрузки, повышением температуры воздуха, изменением условий атмосферного перемешивания и режимом осадков. В холодные месяцы наблюдалось увеличение концентраций, что свидетельствует о повышенной вероятности накопления аэрозольных частиц при сочетании антропогенных выбросов и неблагоприятных метеорологических условий. В течение 2019 года не зарегистрированы среднесуточные концентрации PM2,5 ниже 15 мкг/м³. Среднегодовой показатель, рассчитанный в исследовании, составил 53,5 мкг/м³.

Важно отметить, что в 2019 году не зарегистрированы дни с показателями среднесуточной концентрации ниже PM2,5 - 15мкг/м³. Данный показатель рекомендован ВОЗ. Средний годовой показатель в 2019 году составил PM2,5 - 53,5 мкг/м³.

Таблица 4.3. – Среднесуточные концентрации PM2,5 на пункте «19-й микрорайон» г.Худжанд за 2019 год, мкг/м³

Худжанд - PM2,5 - 2019													
	янв	фев	мар	апр	май	июн	июл	авг	сен	окт	ноя	дек	
1	118,7	143,3	55,0	32,9	33,5	29,3	26,8	16,7	24,4	30,6	48,5	76,1	
2	157,0	143,6	53,2	35,1	32,7	27,8	37,0	16,8	31,4	24,0	48,7	84,5	
3	153,7	116,4	63,0	35,5	28,5	29,3	32,3	19,7	30,7	33,0	54,0	103,9	
4	121,6	58,5	65,7	43,0	27,8	24,1	34,7	21,8	29,6	31,9	52,6	86,0	
5	67,9	50,7	56,3	32,3	25,0	26,4	23,4	19,9	33,0	37,7	48,9	43,3	
6	88,3	66,7	60,4	30,3	27,6	25,3	25,6	20,9	28,9	27,1	65,5	102,4	
7	83,9	76,8	29,2	33,9	27,6	27,8	25,6	19,5	28,0	34,6	81,6	165,0	
8	94,5	63,8	49,3	34,6	31,8	32,5	28,0	23,9	33,5	53,1	79,4	123,5	
9	80,8	59,2	41,3	35,2	32,0	25,9	25,9	25,9	29,6	40,4	72,0	122,4	
10	60,9	42,7	40,3	33,8	28,3	23,2	22,2	23,0	24,6	35,9	67,9	76,5	
11	68,5	53,2	38,1	32,1	28,7	25,0	22,7	21,0	25,6	41,8	89,5	110,7	
12	75,3	54,2	28,6	29,8	29,2	24,8	31,7	24,1	28,3	43,9	103,4	132,2	
13	100,5	60,1	40,1	35,9	25,2	23,1	30,2	25,3	29,4	46,7	93,1	202,9	
14	114,2	63,2	40,2	25,1	26,0	24,3	28,9	20,1	33,7	55,5	94,0	94,9	
15	112,4	41,1	44,9	23,1	28,8	22,7	26,9	26,7	39,1	65,2	73,2	93,4	
16	132,0	55,6	48,2	29,5	33,4	26,6	26,0	27,2	32,8	74,7	57,6	123,6	**53,5**
17	94,0	66,6	46,6	29,7	25,8	23,9	22,0	29,1	30,3	66,4	65,9	151,9	
18	108,5	44,3	44,0	21,2	27,7	26,0	26,9	30,3	30,3	60,7	85,7	159,7	
19	98,2	61,5	34,9	28,6	28,5	23,4	26,9	26,3	33,9	56,8	84,5	169,3	
20	136,7	66,3	58,9	37,7	24,9	24,1	22,8	23,8	29,5	71,6	78,2	140,5	
21	156,8	63,4	42,4	34,3	24,9	22,8	20,2	25,9	28,8	48,7	114,6	79,4	
22	149,8	70,0	45,5	27,3	27,4	24,0	24,8	28,9	26,4	47,7	120,9	78,4	
23	137,2	71,5	35,4	34,2	27,2	31,0	22,5	21,5	31,4	37,5	99,9	101,6	
24	145,6	54,0	42,3	37,8	23,3	30,9	22,1	21,0	32,9	40,5	110,0	96,2	
25	160,1	37,6	39,4	28,7	24,5	29,7	20,6	22,4	40,3	48,9	144,5	119,2	
26	160,0	71,1	40,8	29,6	25,6	28,8	21,7	24,3	39,0	53,1	90,6	114,0	
27	151,0	77,4	40,4	31,6	24,6	33,6	17,6	27,0	29,2	55,6	111,3	73,9	
28	130,5	68,6	42,3	28,6	26,9	28,1	15,4	23,6	32,5	37,9	129,8	115,2	
29	166,1		33,4	24,9	29,2	25,6	19,0	23,0	33,7	45,4	139,0	120,9	
30	129,4		31,8	25,0	26,0	27,6	15,1	29,9	32,8	40,5	101,6	123,8	
31	148,6		37,2		28,7		15,5	25,6		37,5		119,9	
Среднее	119,4	67,9	44,2	31,4	27,8	26,6	24,5	23,7	31,1	46,0	86,9	113,1	

В 2020 году среднегодовая концентрация PM2,5 составила 51,6 мкг/м³, что на 1,9 мкг/м³ ниже показателя 2019 года. При этом зарегистрированы два дня с концентрациями менее 15 мкг/м³ и восемь дней с концентрациями выше 150 мкг/м³. В 2019 году количество дней с концентрациями выше 150 мкг/м³ составляло 12. Несмотря на некоторое снижение среднегодового показателя, загрязнение атмосферного воздуха оставалось значительным, особенно в холодный период года.

Таблица 4.4 – Среднесуточные концентрации PM2,5 на пункте «19-й микрорайон» г.Худжанд за 2020 год, мкг/м³

Худжанд - PM2,5 - 2020													
	янв	фев	мар	апр	май	июн	июл	авг	сен	окт	ноя	дек	
1	136,9	122,9	47,8	35,6	29,2	31,2	24,3	23,9	25,8	36,4	52,8	85,2	
2	166,9	167,0	53,0	33,5	31,6	25,2	25,9	25,1	33,4	25,5	53,7	87,9	
3	170,1	102,9	63,3	34,3	29,2	27,4	25,8	25,2	30,9	31,8	55,7	103,3	
4	135,8	61,1	55,7	42,0	29,0	26,7	27,3	25,9	29,3	34,2	54,0	63,3	
5	73,1	50,2	55,0	32,1	23,9	28,6	25,8	23,9	30,4	35,9	50,4	59,1	
6	84,6	57,9	55,6	33,8	31,1	28,0	29,4	14,3	29,7	30,4	64,2	105,8	
7	77,2	60,3	25,8	38,6	31,0	28,7	26,3	24,4	29,5	35,5	76,0	155,8	
8	95,5	59,7	33,2	37,0	35,2	29,6	30,4	26,5	26,4	41,7	70,7	114,2	
9	88,0	52,4	35,2	36,4	30,0	28,5	27,6	15,8	23,5	38,7	57,4	111,2	
10	61,3	41,1	28,9	38,2	28,8	26,8	28,9	21,3	24,1	37,8	60,8	76,7	
11	81,7	51,8	34,4	32,3	30,8	26,6	27,0	24,9	24,6	43,2	80,8	107,3	
12	96,7	52,4	25,8	28,5	29,9	28,4	26,7	20,2	25,5	38,7	92,2	121,0	
13	128,0	54,8	32,0	32,6	28,2	25,4	27,1	21,2	25,0	45,5	76,4	180,1	
14	115,0	68,2	36,4	28,9	31,1	24,6	26,8	23,2	32,2	50,0	76,4	74,0	
15	108,0	44,7	36,7	25,2	30,6	26,6	29,2	30,9	33,5	61,6	57,8	77,7	
16	134,3	53,6	53,3	30,5	31,6	23,8	33,0	25,8	30,5	68,5	53,0	101,5	
17	92,2	63,3	51,7	29,7	29,3	21,2	31,7	27,8	32,6	59,1	49,9	167,2	
18	101,4	48,3	46,3	25,8	30,8	23,9	30,6	24,3	31,6	56,0	63,5	147,6	**51,6**
19	98,0	57,3	38,8	29,4	30,4	21,4	26,7	24,7	33,0	52,3	67,1	155,3	
20	107,4	61,6	47,0	33,1	28,2	24,5	24,5	24,5	25,7	64,3	61,9	123,9	
21	118,4	65,2	40,9	33,6	26,7	13,0	27,2	24,6	25,2	49,0	93,7	74,5	
22	122,0	74,9	42,6	37,1	25,8	24,0	31,0	24,8	25,9	44,2	102,3	78,6	
23	118,2	67,7	36,9	35,9	27,2	24,0	30,4	22,9	29,6	33,3	78,1	108,5	
24	119,5	53,5	41,5	35,9	23,7	28,4	29,3	23,1	34,3	41,1	88,0	94,4	
25	135,2	42,4	40,0	29,5	25,9	28,9	31,7	24,1	36,5	51,0	112,7	128,4	
26	138,4	73,9	41,3	34,1	26,9	28,4	29,9	25,1	36,7	56,6	69,8	102,3	
27	137,1	66,8	43,3	36,7	27,4	30,2	27,7	27,8	29,0	63,3	89,2	67,1	
28	117,4	64,0	45,3	32,2	28,5	30,5	23,7	24,8	27,8	39,4	99,8	100,5	
29	200,2	62,0	34,6	29,4	30,1	22,9	22,3	25,7	30,5	42,3	103,1	104,3	
30	127,2		29,6	30,9	27,6	24,3	26,1	30,2	26,5	45,8	85,4	112,5	
31	136,1		42,3		28,9		24,7	29,6		45,3		121,2	
Среднее	116,8	65,6	41,7	33,1	29,0	26,0	27,7	24,4	29,3	45,1	73,2	106,8	

В 2021 году наблюдалось увеличение среднегодовой концентрации PM2,5 до 57,7 мкг/м³. Количество дней с концентрациями ниже 15 мкг/м³ составило восемь, тогда как число дней с концентрациями выше 150 мкг/м³ достигло 30. Наиболее высокие значения регистрировались преимущественно в январе, ноябре и декабре. Это свидетельствует об усилении сезонных эпизодов загрязнения, при которых сочетание интенсивности выбросов и условий атмосферного рассеивания способствует накоплению мелкодисперсных частиц.

Таблица 4.5 – Среднесуточные концентрации PM2,5 на пункте «19-й микрорайон» г.Худжанд за 2021 год, мкг/м³

Худжанд - PM2,5 - 2021													
	янв	фев	мар	апр	май	июн	июл	авг	сен	окт	ноя	дек	
1	131,9	159,2	57,9	16,6	25,3	24,2	19,3	17,0	20,6	20,3	97,0	129,3	
2	174,4	159,6	56,2	28,6	31,6	14,7	26,8	16,4	28,5	21,6	78,3	130,3	
3	170,8	129,3	64,2	19,4	30,6	43,6	24,8	24,0	29,1	32,0	81,7	152,9	
4	135,1	65,0	69,2	36,7	32,2	26,5	23,8	32,3	31,5	23,7	64,0	110,6	
5	75,5	56,3	59,3	26,1	19,6	27,3	22,4	25,6	39,6	42,4	48,9	47,0	
6	101,2	74,1	63,6	41,8	28,8	23,1	26,0	31,8	27,3	30,1	70,3	135,6	
7	93,2	85,4	25,7	47,4	30,2	17,8	28,5	25,1	26,2	32,8	107,4	210,3	
8	105,0	70,9	64,8	38,6	41,2	19,8	30,0	32,0	34,4	41,6	107,7	151,1	
9	89,8	65,7	59,3	39,5	21,5	19,4	19,9	32,0	27,2	38,0	148,6	205,7	
10	67,7	47,5	44,4	32,4	30,8	20,8	20,0	22,7	26,9	28,3	131,9	91,3	
11	76,1	59,1	34,9	29,9	24,3	21,1	21,0	28,6	33,1	36,9	167,4	124,4	
12	82,7	60,3	29,2	27,1	23,7	19,0	20,0	30,7	31,2	37,2	181,3	129,4	
13	111,7	66,8	46,2	43,4	19,9	12,0	20,2	36,4	34,1	51,6	108,0	240,5	
14	126,9	70,2	25,5	24,5	20,5	8,4	25,6	27,4	40,6	68,7	106,4	36,5	
15	118,7	45,7	51,0	20,9	25,4	19,4	24,0	33,8	45,0	86,1	53,1	46,0	
16	132,0	61,8	72,4	27,6	27,0	18,7	22,0	30,8	40,5	92,4	48,9	84,3	**57,7**
17	104,5	74,0	69,6	28,8	28,2	14,5	20,0	33,7	41,1	73,8	60,7	115,6	
18	120,6	49,2	57,7	19,5	21,3	21,8	20,0	31,5	42,2	67,4	56,1	156,5	
19	109,1	68,4	28,6	30,3	23,5	16,1	30,3	30,0	33,0	80,0	74,8	184,6	
20	154,3	73,7	34,7	35,2	13,7	14,5	24,0	30,1	23,7	88,1	61,0	170,2	
21	174,2	70,4	22,2	20,6	17,2	12,7	21,3	38,5	28,4	58,0	135,3	59,6	
22	166,4	77,8	35,3	27,2	20,8	17,5	26,1	35,9	26,5	28,4	186,4	105,7	
23	152,4	79,5	30,1	36,2	21,2	32,6	27,6	19,1	31,1	39,8	206,6	149,8	
24	161,8	60,0	36,8	32,4	22,3	34,0	26,5	20,0	34,1	39,4	166,1	107,9	
25	177,8	41,8	30,8	28,9	19,9	29,8	22,4	23,1	51,6	78,2	169,0	117,0	
26	177,8	79,0	28,9	32,0	21,5	16,3	24,9	25,2	46,0	95,1	48,4	98,1	
27	167,7	86,0	38,3	28,7	18,7	27,6	20,4	26,2	34,2	91,3	63,0	55,4	
28	145,0	76,3	31,6	37,1	24,3	26,4	17,3	23,9	35,7	29,9	114,9	62,9	
29	184,6		17,0	27,4	24,3	24,0	24,3	24,0	36,3	41,2	191,5	75,0	
30	143,7		26,3	17,5	21,7	22,2	18,0	29,1	30,5	52,9	150,7	99,0	
31	165,1		31,5		19,3		14,4	28,6		60,8		120,6	
Среднее	132,2	75,5	43,3	30,1	24,2	21,5	23,0	27,9	33,7	51,9	109,5	119,4	

В 2022 году среднегодовая концентрация PM2,5 снизилась до 51,5 мкг/м³. По данным анализируемого суточного ряда пункта «19-й микрорайон», количество дней с концентрациями ниже 15 мкг/м³ составило 24, что превышает соответствующий показатель 2021 года. Вместе с тем высокие концентрации сохранялись в холодные месяцы. Для анализа возможных метеорологических причин наблюдаемой изменчивости дополнительно рассмотрены показатели относительной влажности и температуры воздуха (таблицы 4.7–4.9).

Таблица 4.6 – Среднесуточные концентрации PM2,5 на пункте «19-й микрорайон» г.Худжанд за 2022 год, мкг/м³

Худжанд - PM2,5 - 2022													
	янв	фев	мар	апр	май	июн	июл	авг	сен	окт	ноя	дек	
1	180,1	150,5	54,3	47,9	44,1	37,8	29,9	9,0	24,1	14,4	28,3	22,9	
2	208,1	146,4	55,6	50,1	41,4	39,4	33,2	11,8	32,8	23,8	38,2	38,8	
3	211,4	103,8	64,4	51,8	35,0	19,8	42,4	11,8	32,0	24,0	34,5	54,9	
4	161,5	68,0	60,6	66,7	31,5	23,7	51,1	11,7	36,2	23,1	31,6	61,4	
5	94,8	43,4	43,1	46,8	30,8	27,7	30,4	9,2	30,8	16,3	26,4	39,7	
6	76,8	61,4	44,1	21,6	28,4	26,7	33,6	7,0	28,9	20,0	39,4	69,2	
7	60,8	66,6	24,7	29,4	25,7	35,5	33,5	10,2	23,2	35,3	42,7	119,8	
8	100,7	86,8	48,4	38,1	28,1	48,6	31,4	15,4	25,0	39,7	12,4	95,9	
9	89,9	65,2	25,1	34,2	43,1	25,6	30,0	21,3	27,3	30,6	29,6	39,1	
10	120,2	69,7	37,9	34,8	23,6	26,7	25,9	16,2	14,0	23,5	43,9	61,6	
11	129,5	59,3	40,8	43,0	35,4	28,9	28,0	12,3	11,1	41,9	67,4	97,0	
12	134,5	61,9	33,8	30,9	38,6	27,0	31,3	19,5	22,0	54,0	83,2	135,0	
13	155,2	62,1	45,6	42,1	28,7	29,6	27,1	17,8	24,0	60,6	117,4	165,2	
14	150,5	44,6	59,8	23,2	29,9	34,7	30,7	12,6	29,3	63,3	122,6	153,4	
15	138,9	39,6	33,3	32,1	36,1	21,9	36,9	21,1	45,1	64,8	99,9	140,8	
16	124,1	67,9	31,1	40,4	47,2	27,1	34,2	22,6	31,0	66,7	25,2	162,8	**51,5**
17	71,0	74,5	21,3	46,4	29,6	26,4	23,6	23,0	23,2	46,7	31,0	188,2	
18	97,5	54,7	28,8	27,4	33,7	26,1	34,7	24,6	20,0	33,0	60,2	162,9	
19	64,9	75,3	38,9	26,8	29,4	25,4	28,6	17,1	37,6	23,3	112,2	153,9	
20	74,9	85,4	112,8	44,4	33,9	25,9	25,1	11,4	38,2	22,6	55,9	110,9	
21	114,0	79,8	66,2	43,1	30,2	32,9	21,9	10,5	34,0	27,1	105,4	99,3	
22	61,4	92,1	63,0	20,5	36,8	35,9	23,3	26,2	29,0	55,5	114,8	51,0	
23	57,9	86,9	41,2	32,3	40,6	40,8	19,6	19,5	27,3	25,1	62,9	53,5	
24	77,9	61,3	53,2	42,3	25,5	40,4	14,2	18,7	24,0	41,8	98,6	84,6	
25	106,2	63,0	48,5	33,1	28,1	41,4	8,8	18,2	26,8	36,5	152,9	121,5	
26	107,2	106,9	52,5	34,6	30,3	42,0	10,2	19,7	27,7	24,6	97,0	130,0	
27	61,0	92,0	34,9	38,7	26,4	40,7	6,5	23,8	12,1	29,2	79,9	92,4	
28	60,1	75,5	54,5	22,6	31,4	31,7	5,6	21,6	19,5	41,8	73,7	167,4	
29	113,5		53,7	25,4	33,1	34,7	7,9	16,0	20,9	33,0	101,3	166,9	
30	127,5		52,8	27,1	22,5	41,4	5,6	22,5	18,8	29,6	114,3	148,5	
31	112,0		51,0		36,9		8,6	22,2		26,4		119,3	
Среднее	111,1	76,6	47,6	36,6	32,8	32,2	25,0	16,9	26,5	35,4	70,1	106,7	

В таблице 4.7 в зависимости от уровня влажности в процентах цветовое обозначение меняется. Дни с влажностью выше 50% обозначаются синим цветом, меньше 50% - цвет переходит в оранжевый. При этом, можно видеть резкие переходы цветов по днях, что связано с количеством осадков.

Для выявления сезонных закономерностей загрязнения атмосферного воздуха проведён сравнительный анализ среднемесячных концентраций PM2,5 за зимние и летние периоды 2019–2022 годов. В расчётах использованы средние значения за январь, февраль и декабрь для зимнего периода, июнь, июль и август — для летнего. Результаты сравнительного анализа представлены на рисунке 4.3.

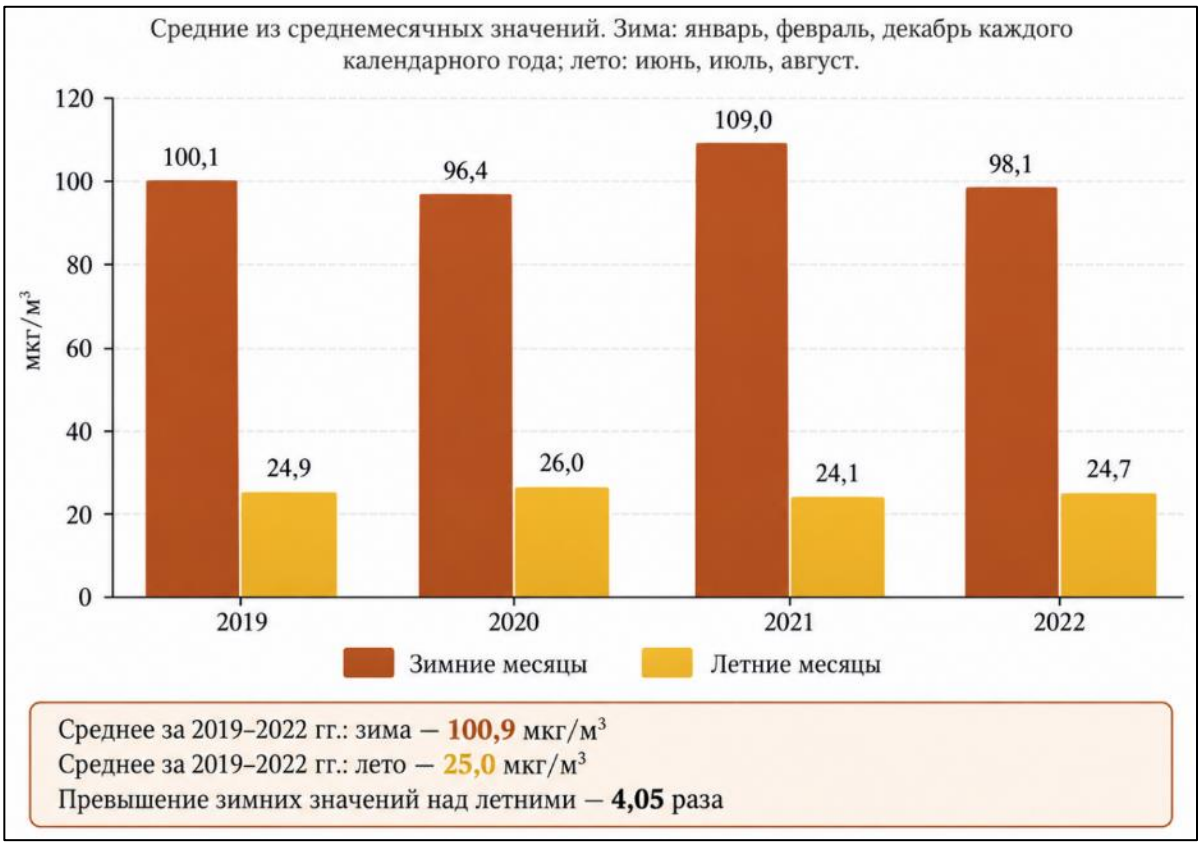


Рисунок 4.3 – Сравнительная динамика среднемесячных концентраций PM2,5 в зимний и летний периоды 2019–2022 гг. в г. Худжанде

Как видно из рисунка 4.3, на протяжении всего рассматриваемого периода наблюдается устойчивое превышение зимних концентраций PM2,5 над летними. Среднее значение за зимние месяцы составило 100,9 мкг/м³, тогда как за летние — около 25,0 мкг/м³, что соответствует различию приблизительно в 4,05 раза. Наибольшая зимняя концентрация отмечена в 2021 году — 109,0 мкг/м³, минимальная летняя — также в 2021 году (24,1 мкг/м³). Выявленная

закономерность согласуется с увеличением отопительной нагрузки, снижением температуры воздуха и возможным ослаблением атмосферного перемешивания в холодное время года. Таким образом, четырёхкратное различие между зимними и летними концентрациями PM2,5 характеризует выраженную сезонность аэрозольного загрязнения атмосферного воздуха г. Худжанд. Выявленная закономерность согласуется с изменением отопительной нагрузки и метеорологических условий, определяющих интенсивность накопления и рассеивания загрязняющих веществ.

Цветовые обозначения: Высокая влажность выше 50% - Низкая влажность ниже 50%

Таблица 4.7 – Среднесуточные показатели по влажности в % за 2021 год в г. Худжанд

Худжанд - Влажность в % - 2021													
	янв	фев	мар	апр	май	июн	июл	авг	сен	окт	ноя	дек	
1	66,3	66,1	49,7	48,8	53,5	27,3	28,7	27,3	38,1	35,6	59,1	47,2	
2	69,1	65,7	46,4	39,6	48,8	25,7	24,0	31,9	36,5	34,4	53,7	44,3	
3	72,9	72,1	46,5	42,1	41,7	26,5	27,6	29,1	32,6	38,6	51,2	42,5	
4	80,3	63,2	45,3	51,0	38,3	22,2	25,0	28,4	33,8	35,4	44,4	57,0	
5	74,6	53,7	48,9	60,7	46,6	26,4	27,0	28,8	33,7	40,6	37,9	58,6	
6	80,1	63,4	44,9	54,9	60,8	26,6	23,4	33,5	31,5	42,7	44,9	65,9	
7	80,6	74,6	47,3	50,4	53,6	27,5	25,8	25,9	33,4	42,8	53,6	66,4	
8	75,3	61,3	49,6	44,9	52,7	35,9	26,5	26,5	30,1	46,3	48,8	66,5	
9	80,5	70,6	43,0	39,8	47,9	34,2	26,8	30,1	30,8	65,1	50,6	68,1	
10	79,5	61,0	54,0	35,1	57,0	36,3	22,7	26,1	28,3	43,8	48,7	51,0	
11	69,7	52,0	54,0	40,3	45,9	26,8	23,6	28,7	36,2	49,8	52,8	50,5	
12	71,4	61,2	46,5	45,7	33,5	23,3	40,8	27,3	29,8	43,9	50,6	49,7	
13	65,1	64,4	59,1	51,9	29,7	22,4	31,7	26,9	32,9	45,4	61,2	56,3	
14	61,9	69,3	56,9	42,9	25,8	23,9	35,7	26,6	36,0	47,9	60,5	75,4	
15	56,8	74,3	62,5	33,7	27,8	23,6	30,3	31,8	36,1	48,1	54,9	75,2	
16	61,9	78,4	60,7	36,0	29,3	21,9	51,9	28,8	35,2	50,1	42,5	60,4	**45,3**
17	68,3	76,8	68,2	33,0	33,0	23,9	56,2	36,6	35,6	47,8	60,6	63,6	
18	67,7	64,3	54,3	30,3	28,6	25,3	49,4	36,8	36,1	45,4	59,9	57,9	
19	62,3	53,7	52,1	39,6	30,0	19,5	38,3	32,6	31,6	46,3	57,5	49,9	
20	66,2	55,2	50,0	43,7	28,7	24,3	28,4	34,9	29,6	45,1	38,7	71,5	
21	60,9	51,5	59,1	65,5	31,0	20,0	31,3	36,0	33,9	52,3	47,3	61,0	
22	74,3	50,7	43,0	52,1	32,9	19,2	34,9	28,5	28,4	65,2	49,7	54,1	
23	70,9	49,5	49,7	45,2	33,7	21,1	31,1	23,9	31,1	48,8	45,3	65,7	
24	66,1	47,7	54,4	37,1	37,6	23,8	28,5	24,5	31,0	34,3	44,8	67,4	
25	69,4	48,5	53,1	33,0	33,6	25,5	34,9	28,1	41,1	45,4	47,3	74,8	
26	69,7	44,5	53,3	35,0	31,3	19,7	19,3	28,8	36,7	52,9	68,4	82,3	
27	51,4	52,2	71,4	31,9	32,7	36,6	21,7	27,9	37,2	50,2	58,9	78,1	
28	45,7	40,3	74,9	34,1	31,7	22,6	27,3	29,2	43,4	51,6	63,6	63,8	
29	67,4		70,3	32,0	28,1	16,3	21,1	29,7	42,8	61,5	61,6	57,5	
30	65,9		54,2	37,8	25,0	19,3	23,8	31,5	40,9	52,4	51,7	62,3	
31	68,4		50,7		26,8		36,0	35,3		57,0		60,1	
Среднее	68,4	60,2	54,0	42,3	37,3	24,9	30,8	29,7	34,5	47,3	52,4	61,4	

Выявленная сезонная изменчивость концентраций PM2,5 свидетельствует о необходимости дополнительного анализа метеорологических параметров. В частности, относительная влажность может влиять на процессы формирования и осаждения аэрозольных частиц, однако её воздействие необходимо рассматривать совместно с температурой воздуха, атмосферными осадками и ветровым режимом. Для уточнения данной взаимосвязи проанализированы показатели влажности за 2021–2022 годы (таблицы 4.7 и 4.8).

Таблица 4.8 – Среднесуточные показатели по влажности в % за 2022 год в г. Худжанд

Худжанд - Влажность в % - 2022													
	янв	фев	мар	апр	май	июн	июл	авг	сен	окт	ноя	дек	
1	56,0	75,9	81,3	44,6	39,2	36,3	21,9	31,6	32,2	33,0	54,8	78,5	
2	55,8	74,8	64,5	46,2	40,7	36,6	21,7	36,2	39,7	32,8	69,0	70,5	
3	55,1	60,6	57,0	44,9	43,6	31,5	31,4	43,3	35,7	36,8	75,1	74,1	
4	76,8	64,9	37,9	46,8	62,0	33,2	33,2	31,7	36,3	37,1	91,4	77,0	
5	84,3	45,9	40,1	40,7	58,2	33,4	23,9	31,2	35,1	29,1	85,4	80,3	
6	82,0	47,4	66,6	32,8	50,5	28,6	28,0	31,1	31,8	37,5	82,2	76,0	
7	81,8	52,8	64,6	36,5	40,7	32,4	26,5	34,4	32,5	39,8	85,8	78,0	
8	75,0	75,1	70,3	48,0	37,1	35,1	30,5	31,2	33,4	40,3	91,2	84,8	
9	79,2	73,0	72,4	46,6	42,4	26,2	26,0	31,3	38,3	37,6	71,8	76,4	
10	77,4	66,4	63,4	44,9	51,8	30,2	26,9	34,8	39,6	36,5	57,4	67,2	
11	74,9	56,5	63,0	49,5	56,8	35,2	25,8	28,3	29,4	47,2	71,9	76,1	
12	67,1	42,6	82,4	41,0	51,6	44,9	25,6	32,1	44,3	44,7	78,0	76,0	
13	61,6	71,3	84,0	48,0	46,8	40,5	33,3	34,3	47,9	39,4	76,6	80,3	
14	55,5	80,2	85,4	40,7	81,1	36,8	33,4	38,4	51,8	43,1	73,5	88,4	
15	49,3	73,9	90,2	41,8	63,1	27,9	30,2	36,6	39,4	46,1	65,8	80,4	
16	50,9	61,7	87,2	38,7	58,8	32,9	27,4	28,6	34,2	46,7	71,5	69,6	**52,2**
17	84,3	66,4	83,8	40,8	41,2	36,1	29,7	33,8	35,4	47,2	67,2	69,4	
18	84,2	57,7	86,2	42,7	42,7	32,1	23,6	22,2	35,2	60,0	55,5	78,3	
19	75,1	43,0	68,2	48,2	44,0	30,8	26,6	28,5	37,6	86,0	81,2	84,2	
20	69,7	41,9	69,7	66,0	40,4	37,8	30,4	24,5	36,9	63,0	75,6	87,1	
21	54,3	39,5	65,1	62,7	44,2	40,8	36,1	24,8	33,9	52,8	80,8	84,8	
22	75,5	40,0	62,8	47,5	72,2	42,5	36,2	30,6	40,8	59,1	82,4	79,0	
23	72,3	47,4	81,3	46,8	61,1	40,5	29,4	32,0	31,4	67,3	67,8	72,6	
24	63,0	49,1	77,2	57,2	38,5	38,8	29,4	27,8	33,2	92,5	71,5	72,7	
25	68,5	48,1	65,2	53,6	42,4	34,6	27,0	27,6	31,7	81,8	80,8	81,8	
26	73,4	47,9	61,5	51,4	41,7	35,3	26,9	28,2	36,3	73,4	90,4	85,9	
27	39,8	50,7	55,5	52,9	45,3	31,1	30,2	37,2	36,0	67,5	92,5	79,9	
28	34,1	46,7	52,9	35,7	70,2	22,8	26,3	29,5	30,9	69,2	86,8	84,0	
29	71,7	46,2	69,7	31,8	50,6	28,5	27,6	28,0	36,5	54,7	75,3	88,1	
30	75,9		46,7	44,1	38,8	36,0	30,4	29,2	35,7	72,8	73,4	78,5	
31			43,8		43,3		27,4	36,1		71,2		80,6	
Среднее	67,5	56,8	67,7	45,8	49,7	34,3	28,5	31,5	36,4	53,1	76,1	78,7	

Сопоставление показателей относительной влажности за 2021 и 2022 годы (таблицы 4.7 и 4.8) показало увеличение среднегодового значения с 45,3 до

52,2%, или на 6,9 процентного пункта. Для количественной оценки взаимосвязи влажности и концентраций PM2,5 проведён корреляционный анализ среднемесячных значений. В 2021 году коэффициент корреляции Пирсона составил r = +0,866 (R^2 = 0,751), в 2022 году — r = +0,823 (R^2= 0,677). Полученные результаты свидетельствуют о выраженной положительной статистической взаимосвязи исследуемых показателей на месячном масштабе усреднения.

Выявленная положительная корреляция между влажностью воздуха и концентрациями PM2,5 отражает статистическую взаимосвязь, но не доказывает причинную зависимость. Она может быть обусловлена совместным влиянием температуры, отопительной нагрузки и условий атмосферного рассеивания. При этом осадки способствуют удалению аэрозольных частиц, а повышенная влажность может влиять на показания оптических сенсоров PMS5003. На рисунке 4.4 представлена зависимость PM2,5 от влажности на пункте «Шелкокомбинат». Значительный разброс значений указывает на ограниченность однофакторного анализа и необходимость комплексного учёта метеорологических условий. Дополнительная количественная оценка сезонных закономерностей выполнена по среднемесячным данным за 2021–2022 годы.

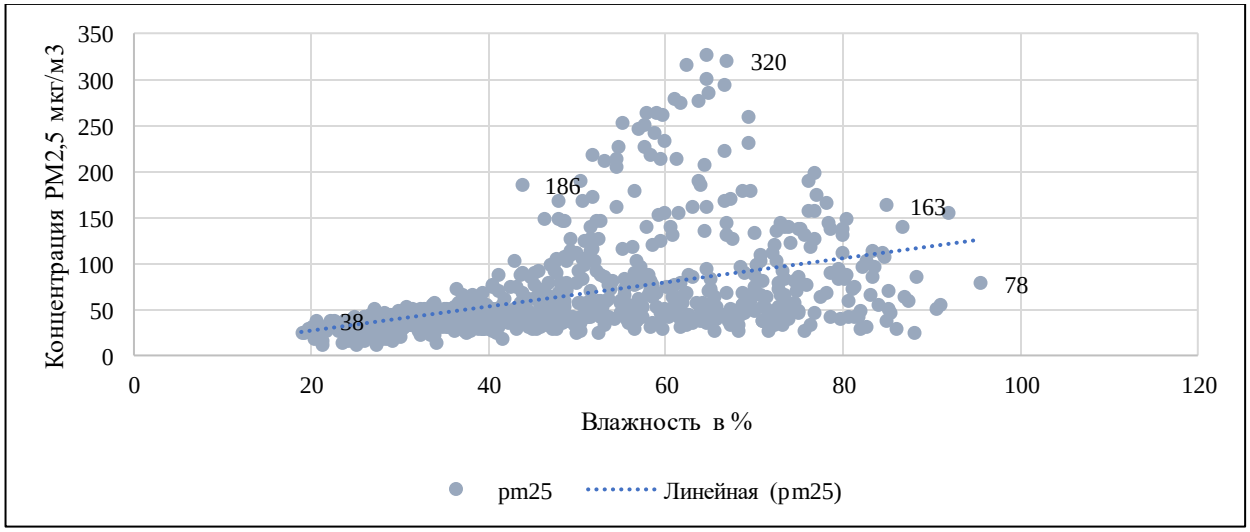


Рисунок 4.4 – Распределение концентраций PM2,5 в зависимости от относительной влажности воздуха на пункте мониторинга «Шелкокомбинат» г. Худжанд.

Для определения влияния температуры атмосферного воздуха на концентрацию PM2,5, произведен анализ зафиксированных данных по температуре. (таблица 4.9)

Цветовые обозначения: (ниже +10) Низкая температура–Высокая температура (выше +25)

В таблице 4.9 в зависимости от уровня температуры атмосферного воздуха цветовое обозначение меняется. Среднесуточные показатели ниже +10 C° градуса обозначены синим, выше +25 C° обозначены желтым цветом.

Таблица 4.9 – Среднесуточные показатели по температуре за 2022 год в г. Худжанд

Худжанд – температура атмосферного воздуха - 2022													
	янв	фев	мар	апр	май	июн	июл	авг	сен	окт	ноя	дек	
1	5,7	3,6	12,1	18,6	27,6	28,8	33,4	31,5	27,7	20,8	16,1	4,9	
2	5,9	5,9	12,0	18,4	27,3	28,5	33,5	30,3	27,5	19,0	15,1	2,4	
3	6,3	5,7	13,0	20,4	25,9	28,7	32,7	29,8	29,2	19,3	15,2	2,3	
4	6,9	7,2	15,1	21,1	23,2	28,4	32,7	31,9	30,6	20,7	13,8	2,2	
5	5,6	8,4	17,1	22,5	23,3	29,9	29,5	31,9	30,3	19,1	14,7	-1,1	
6	5,3	8,1	15,2	25,1	26,6	31,3	31,5	33,0	30,9	17,2	14,3	-0,3	
7	5,3	6,0	11,8	25,1	28,8	31,1	30,8	31,3	30,2	18,7	13,1	2,0	
8	6,4	6,1	10,2	24,0	30,4	31,1	30,2	32,9	28,0	19,9	7,6	1,1	
9	5,0	6,7	11,8	26,1	28,3	33,3	30,5	32,6	26,6	19,0	7,2	-3,4	
10	4,2	7,3	12,2	25,6	23,5	32,6	30,4	30,0	28,0	18,3	9,1	-0,6	
11	4,3	8,2	13,7	24,9	24,5	30,7	31,4	29,9	25,0	18,2	7,6	-0,2	
12	5,3	6,8	13,1	24,9	25,1	26,4	32,5	29,8	19,5	18,8	7,4	0,0	
13	5,7	6,6	13,3	22,8	24,2	29,5	31,2	31,1	22,3	20,6	8,3	-0,5	
14	7,1	6,6	13,7	24,2	19,1	30,8	32,4	31,8	22,8	19,2	8,4	-0,2	
15	9,9	5,1	7,8	23,3	21,4	34,4	34,4	31,5	27,1	18,8	11,1	2,9	
16	11,1	4,0	9,5	24,1	23,4	31,5	36,0	33,3	26,2	19,9	9,6	5,0	**18,7**
17	8,3	5,7	11,4	24,6	28,4	29,8	33,4	31,5	24,9	18,2	7,9	4,9	
18	8,2	7,6	4,4	25,4	27,0	31,7	36,1	31,0	25,8	17,3	10,7	2,8	
19	7,3	9,0	6,5	23,1	26,9	30,3	34,7	28,5	27,3	10,7	10,3	2,0	
20	5,5	10,3	6,9	19,9	26,7	27,8	34,1	27,7	27,6	12,4	10,1	1,6	
21	6,4	11,1	9,3	19,7	26,9	26,5	33,5	25,1	27,2	16,1	9,8	2,1	
22	4,6	10,1	12,1	23,4	17,2	27,4	33,9	26,7	26,4	17,0	10,2	2,8	
23	3,9	12,2	7,5	24,5	18,8	29,2	36,8	27,6	28,0	14,3	12,0	3,1	
24	5,1	12,3	7,1	22,6	24,1	32,0	36,0	27,8	26,2	13,2	11,4	3,2	
25	3,5	12,4	10,7	22,4	27,3	32,9	36,6	27,6	26,9	15,6	9,8	1,5	
26	3,1	12,2	13,7	22,3	29,2	34,1	36,6	28,7	26,0	16,0	6,9	0,2	
27	6,0	13,1	13,7	23,3	25,4	36,6	35,7	27,6	23,7	15,5	7,1	0,3	
28	6,6	13,6	13,9	24,3	19,4	37,4	34,5	28,4	22,1	14,8	7,3	0,5	
29	5,6		10,2	25,4	22,2	34,2	33,3	29,0	21,6	17,5	10,8	1,6	
30	4,8		12,0	26,7	24,0	33,7	32,9	29,6	21,6	15,0	11,6	4,0	
31	4,6		16,0		23,6		33,1	26,7		14,6		4,4	
Среднее	5,9	8,3	11,5	23,3	24,8	31,0	33,4	29,9	26,2	17,3	10,5	1,7	

Анализ температурных показателей за 2022 год свидетельствует о выраженной сезонной изменчивости метеорологических условий г. Худжанд. Наиболее низкие среднемесячные температуры наблюдались в зимний период, а максимальные, в летние месяцы. Для определения взаимосвязи температурного режима с концентрациями PM2,5 выполнен корреляционно-регрессионный анализ сопоставленных данных, результаты которого представлены на рис. 4.6.

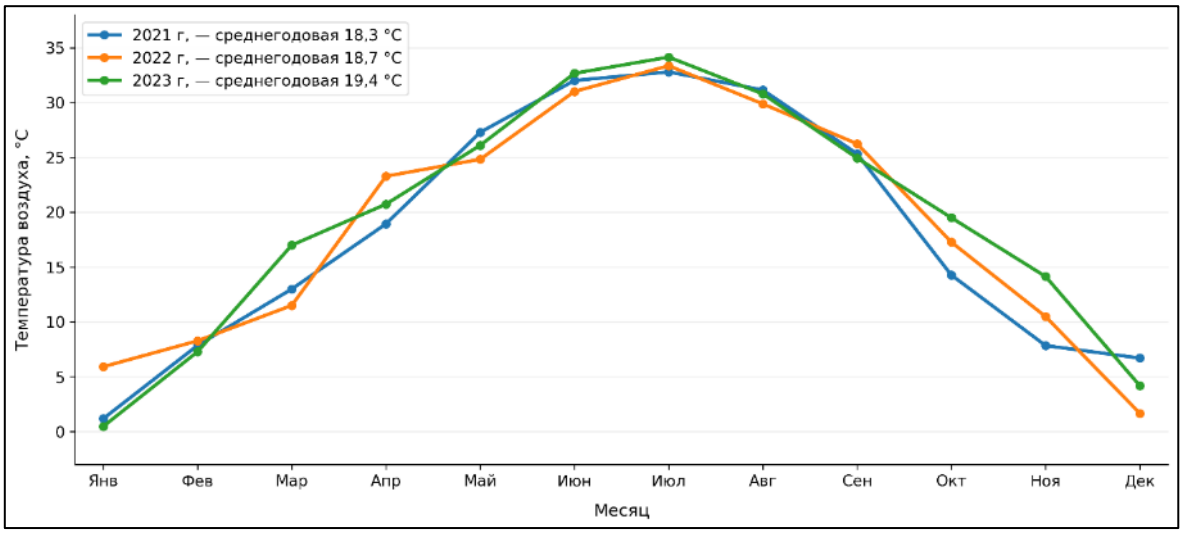


Рисунок 4.5 – Динамика среднемесячной температуры атмосферного воздуха на пункте мониторинга «19-й микрорайон» г. Худжанд за 2021–2023 годы.

Для более точного определения влияния температуры произведена корреляция концентрации PM2,5 с температурными показателями рисунка 4.6.

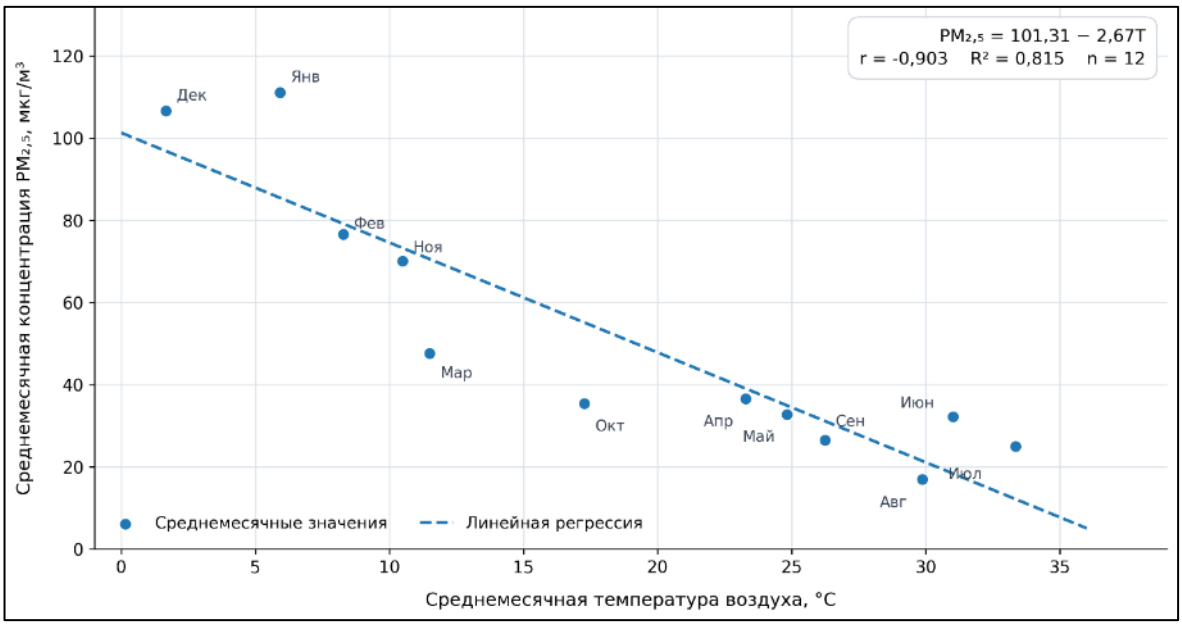


Рисунок 4.6 – Корреляционная зависимость среднемесячных концентраций PM2,5 от температуры атмосферного воздуха на пункте мониторинга «19-й микрорайон» г.Худжанд за 2022 год.

Корреляционно-регрессионный анализ среднемесячных концентраций PM2,5 и температуры атмосферного воздуха за 2022 год выявил выраженную отрицательную статистическую взаимосвязь исследуемых показателей (рисунок 4.6). Коэффициент корреляции Пирсона составил $r = -0{,}903$, коэффициент детерминации $R^2 = 0{,}815$. Полученное уравнение линейной регрессии PM2,5 =

101,31–2,67T, где T — среднемесячная температура воздуха (°C), характеризует сезонную изменчивость концентраций мелкодисперсных частиц. Согласно полученной модели, увеличению температуры на 1 °C соответствует расчётное снижение концентрации PM2,5 в среднем на 2,67 мкг/м³ в пределах исследованной выборки. Выявленную зависимость необходимо рассматривать с учётом сезонных изменений отопительной нагрузки, атмосферной устойчивости и условий рассеивания загрязняющих веществ, поскольку статистическая корреляция не устанавливает непосредственную причинно-следственную связь.

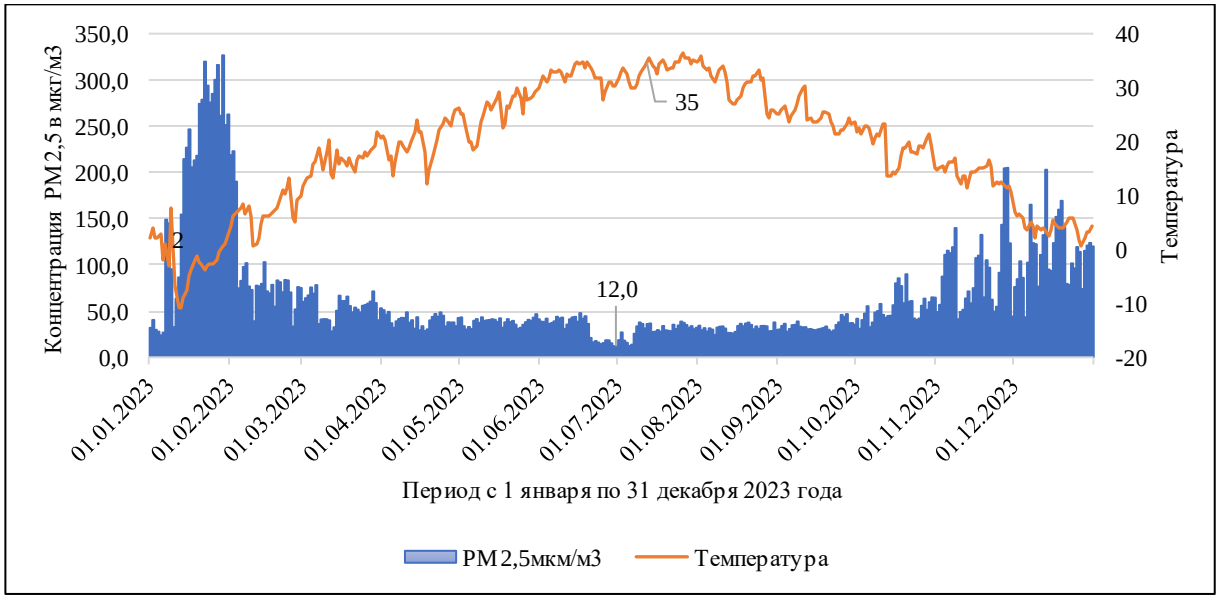


Рисунок 4.7 – Сравнение температурных показателей и концентрации PM2,5 с точки замера «Шелкокомбинат» г. Худжанд.

Для определения влияния температуры на увеличения концентрации PM2,5 в атмосфере подготовлена диаграмма, (рисунок 4.7) которая охватывает 2023 год с 1 января по 31 декабря. С первых чисел января наблюдается снижение температуры с +2C° (4/01/2023) до -11C° (13/01/2023), в результате происходит резкое увеличение концентрации PM2,5 до 319,8 мкг/м³ (22/01/2023), что почти в 10 раз выше среднесуточной нормы 35мкг/м³. Также наблюдается, что увеличение концентрации происходит постепенно, с 10 по 29 января с показателя 32,7мкг/м³ до 326,6мкг/м³, при температуре +1C°.

Увеличение концентрации можно связать с природными и антропогенными факторами - температура, влажность, ветер и осадки, с одной стороны, и увеличение выбросов транспортом, промышленностью, населением

связанных с обогревом в холодное время года. Подобная динамика наблюдается в апреле, ноябре и в декабре 2023 г.

В период с 14 июля по 15 августа зафиксировано снижение концентрации PM2,5 с 36,6 до 24,2 мкг/м³ при изменении температуры воздуха с +36 до +27 °C и выпадении атмосферных осадков. Это подтверждает многофакторный характер изменения концентраций мелкодисперсных частиц. Дополнительно проведён анализ взаимосвязи PM2,5 с атмосферным давлением, результаты которого представлены на рисунке 4.8.

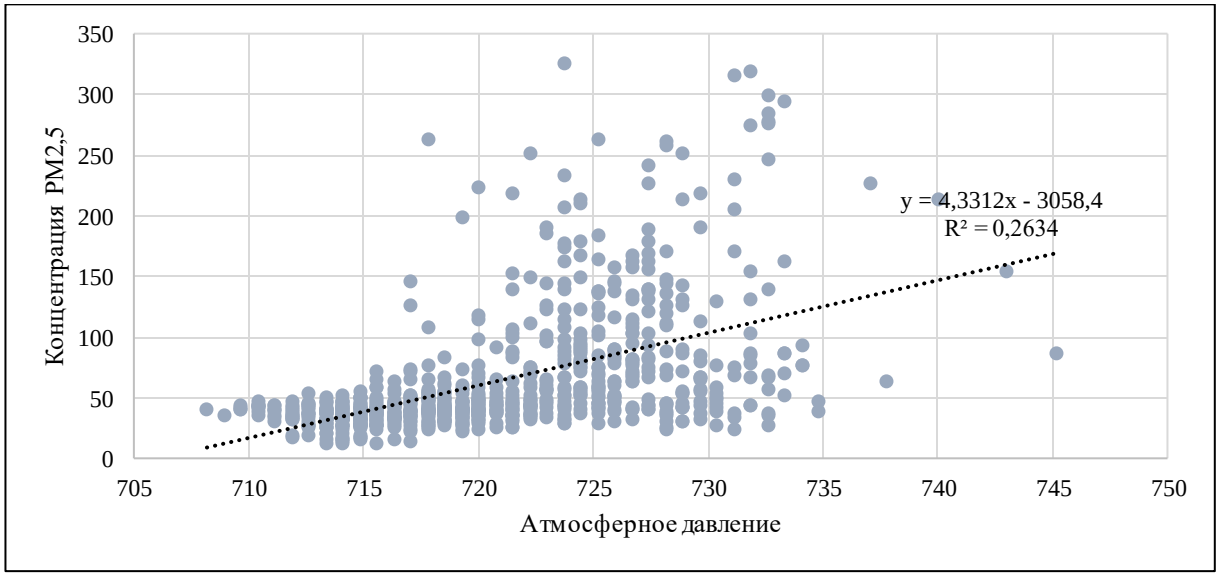


Рисунок 4.8 – Корреляция PM2,5 атмосферного давления с точки замера Шелкокомбинат г. Худжанд.

Корреляционный анализ выявил умеренную положительную взаимосвязь между атмосферным давлением и концентрацией PM2,5 ($r \approx +0,513$; $R^2 = 0,2634$). Это означает, что однофакторная линейная модель описывает около 26,3% изменчивости концентраций в рассматриваемой выборке. Значительный разброс значений указывает на влияние дополнительных факторов, включая температуру, ветровой режим и интенсивность выбросов. Повышенное атмосферное давление может сопровождаться устойчивыми синоптическими условиями, способствующими накоплению загрязняющих веществ. Следовательно, давление рассматривается как дополнительный метеорологический показатель при комплексной оценке качества атмосферного воздуха.

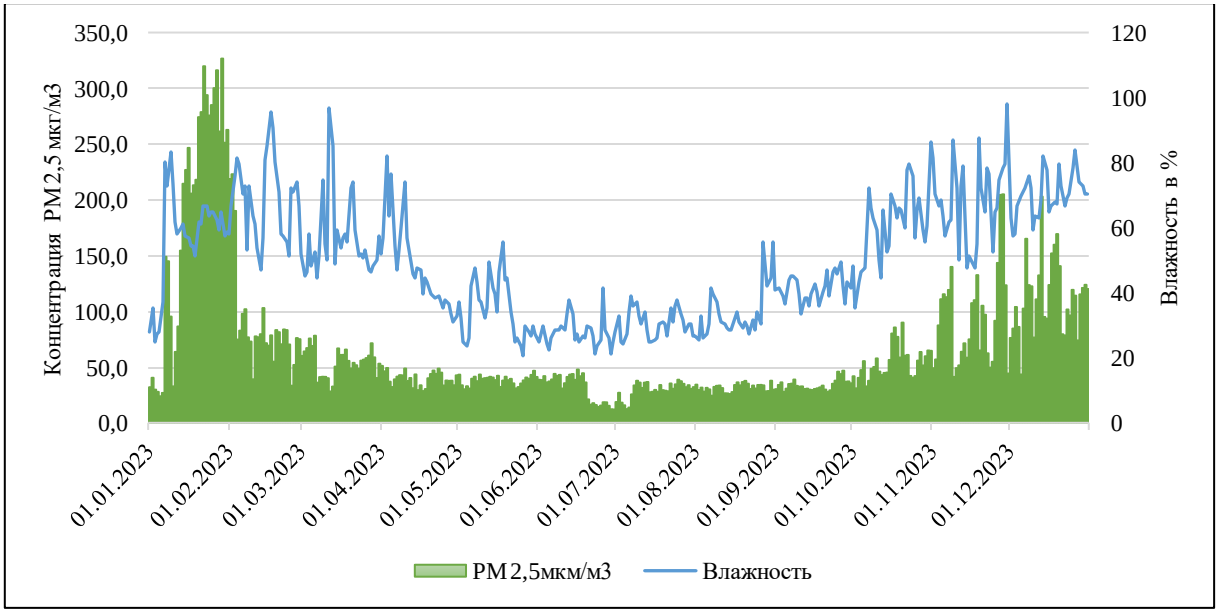


Рисунок 4.9 – Сравнение показателей по влажности и концентрации PM2,5 с точки замера «Шелкокомбинат» г. Худжанд.

Сопоставление временной динамики относительной влажности и концентраций PM2,5 (рисунок 4.9) показало неоднозначный характер изменения исследуемых показателей. В отдельные периоды увеличение влажности сопровождалось снижением концентраций, что может быть связано с атмосферными осадками и изменением условий рассеивания. Вместе с тем корреляционный анализ среднемесячных данных выявил положительную статистическую взаимосвязь влажности и PM2,5. Это свидетельствует о необходимости комплексного учёта температуры, осадков, отопительной нагрузки и других факторов, определяющих сезонную изменчивость аэрозольного загрязнения.

Влияние атмосферных осадок. Для сравнения показателей влажности и объема осадков проанализированы усредненные данные по количеству осадков за 30 летний период по месяцам.

Данные на рисунке 4.10 указывают, что максимальное количество осадков в г. Худжанде приходится на март и достигает около 60 мм. Увеличение количества осадков начинается с конца января и продолжается в весенний период. Это соответствует результатам анализа влажности и снижению концентраций PM2,5, представленным выше. Несмотря на снижение количества

осадков с июня по сентябрь, качество воздуха в летний период остается относительно более благоприятным за счет более активного перемешивания воздушных масс, ветрового режима и снижения отопительной антропогенной нагрузки [89, 93].

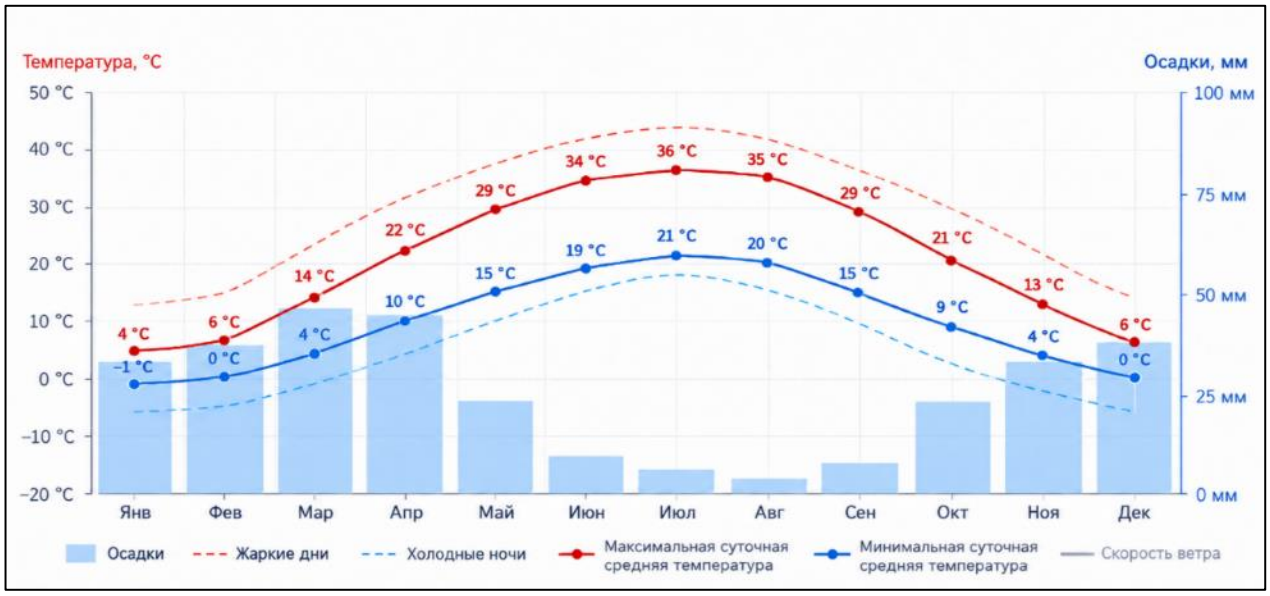


Рисунок 4.10 – Средние показатели температуры и осадки в г. Худжанд за 30 лет.

Для оценки возможной взаимосвязи атмосферных осадков и концентраций PM2,5 проведено сопоставление среднесуточных показателей за 2021 год. Результаты представлены на рисунке 4.11.

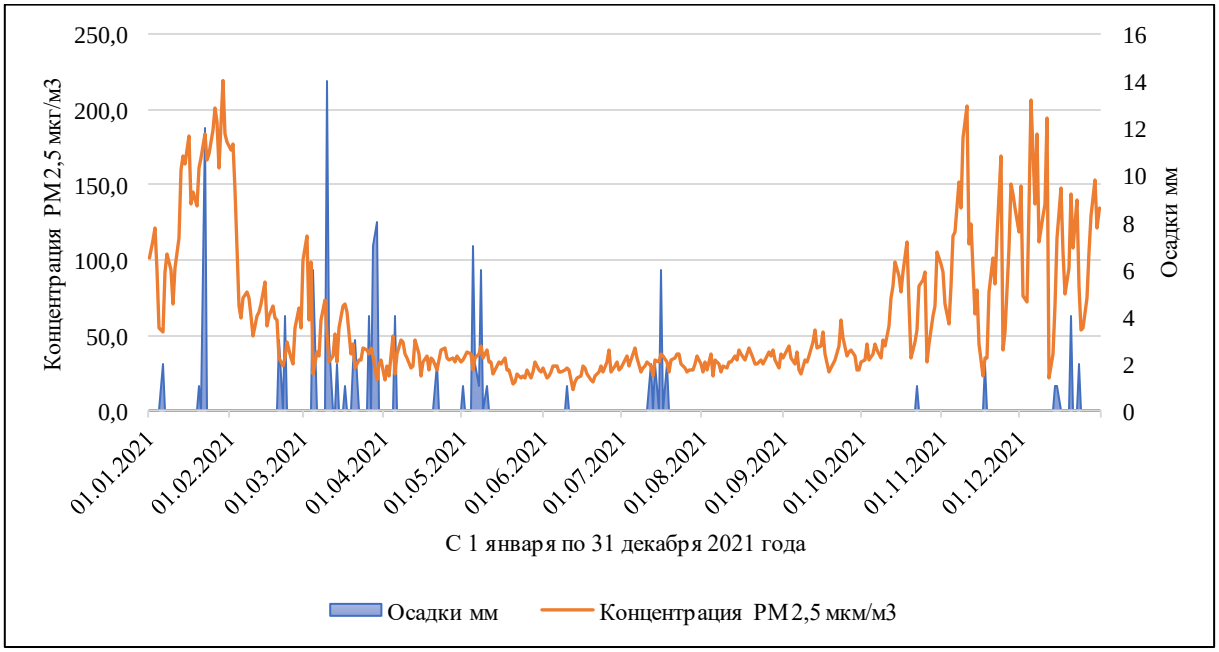


Рисунок 4.11 – Сравнение количество осадков (мм) и концентрации PM2,5 мкг/м³ с точки замера «Шелкокомбинат» г. Худжанд.

Анализ данных за 2021 год выявил отдельные эпизоды снижения концентраций PM2,5, совпадающие с периодами выпадения атмосферных осадков. В частности, с 11 по 16 ноября концентрация снизилась с 201,8 до 22,4 мкг/м³. Подобная динамика наблюдалась и в 2022 году (рисунок 4.12). Эти изменения согласуются с возможным влиянием влажного осаждения аэрозольных частиц, однако также зависят от ветрового режима, температуры и интенсивности выбросов.

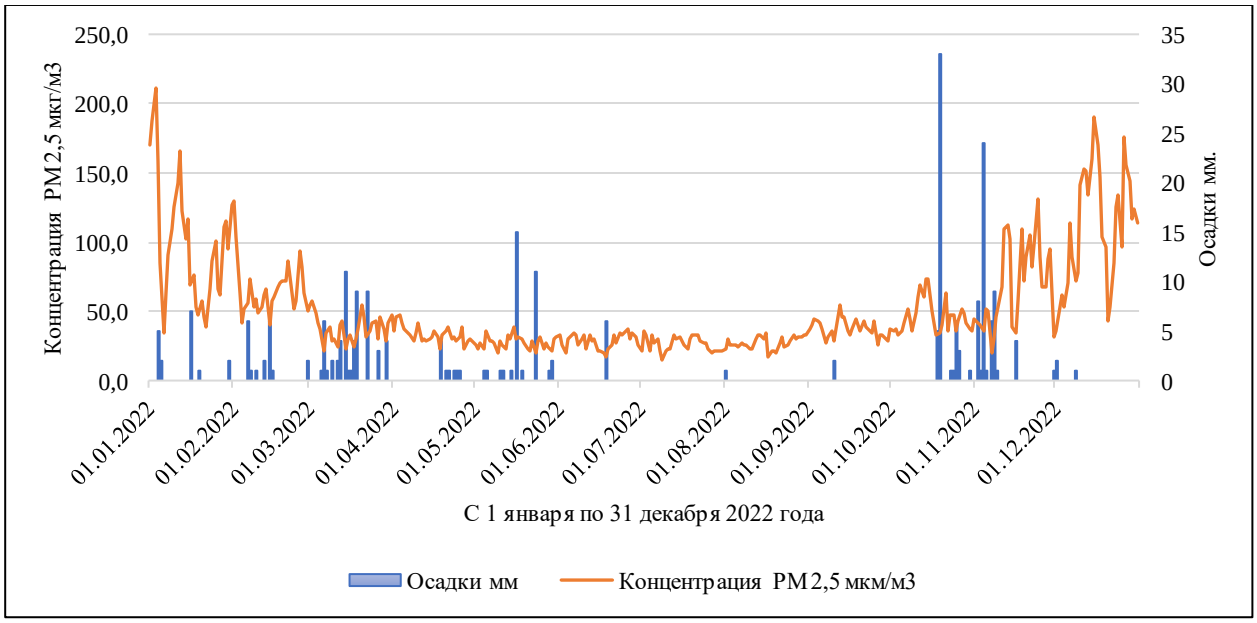


Рисунок 4.12 – Сравнение количество осадков (мм) и концентрации PM2,5 мкг/м³ с точки замера «Шелкокомбинат» г. Худжанд.

Таким образом, сопоставление данных за 2021–2022 годы свидетельствует о возможной роли атмосферных осадков в снижении концентраций PM2,5. Вместе с тем выявленные эпизоды не позволяют количественно определить самостоятельный вклад осадков без учёта других метеорологических факторов.

Анализ и сравнение ежечасных показателей концентрации PM2,5 в течение суток.

Для выявления суточных закономерностей изменения концентраций PM2,5 проведён анализ почасовых данных за период с декабря 2022 года по ноябрь 2023 года с последующим усреднением показателей по часам суток и месяцам.

Установлено, что наиболее высокие значения на усреднённых суточных профилях наблюдались в январе — более 120 мкг/м³, декабре — более 90 мкг/м³,

ноябре и феврале — выше 60 мкг/м³. В остальные месяцы показатели преимущественно не превышали 60 мкг/м³. Выявлена характерная суточная динамика: повышение концентраций с 6:00 до 10:00, последующее снижение до 17:00 и повторное увеличение в вечерние часы до 23:00 (рисунок 4.13).

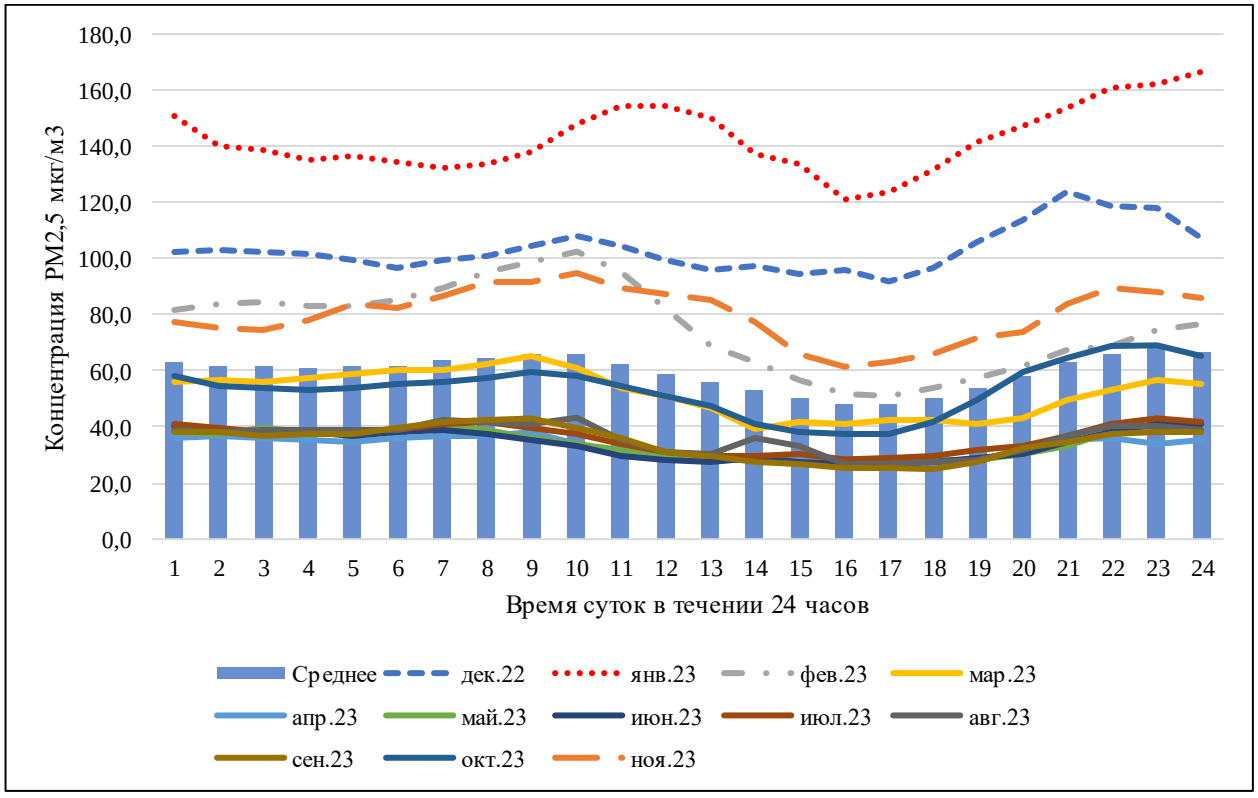
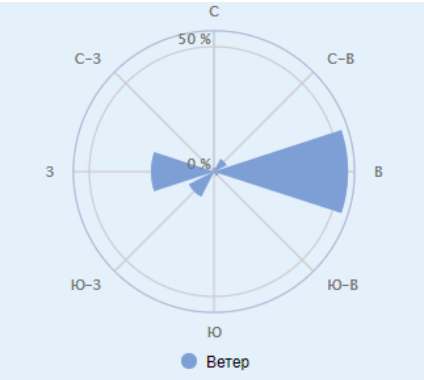


Рисунок 4.13 – Суточная изменчивость усреднённых почасовых концентраций PM2,5 по месяцам за декабрь 2022 – ноябрь 2023 года в г. Худжанд.

Выявленные суточные колебания могут быть связаны с изменением транспортной активности, интенсивности отопления жилых, административных и промышленных объектов, а также условий атмосферного перемешивания. Утренние и вечерние повышения концентраций совпадают с периодами повышенной транспортной и бытовой активности, однако количественное определение вклада отдельных источников требует дополнительного анализа.

Влияние розы ветров на концентрацию PM2,5 в атмосферном воздухе

Одним из важных климатических факторов, влияющих на концентрацию PM2,5 в атмосферном воздухе, помимо осадков, температуры, влажности, является роза ветров. Географическое расположение г. Худжанд в западной части Ферганской долины, создаёт особые условия для розы ветров, что показано на рисунке 4.14.



В - Восточный	З - Западный
53,7%	**25,2%**
Ю-З - Юго-западный	С-В - Северо-восточный
11,2%	**5,6%**
Ю-В - Юго-восточный	С - Северный
2%	**1,5%**
Ю - Южный	С-З - Северо-западный
0,4%	**0,4%**



Рисунок 4.14 – Роза ветров г. Худжанд по многолетним данным наблюдений.

По многолетним данным, представленным на рисунке 4.14, в г. Худжанд преобладают ветры восточного направления (53,7%), за которыми следуют западные (25,2%) и юго-западные (11,2%). Повторяемость остальных направлений значительно ниже. Ветровой режим определяется расположением города в западной части Ферганской долины, ограниченной отрогами Туркестанского хребта на юге и горами Моголтау на севере. Средняя скорость ветра в холодный период составляет 5,2–5,6 м/с, в тёплый — 4,4–5,2 м/с.

Преобладание восточных ветров создаёт условия для переноса загрязняющих веществ со стороны северо-восточной промышленной зоны Худжанда и прилегающих территорий Бободжон-Гафуровского района, где расположены массивы частной жилой застройки (рисунок 4.15). В холодный

период использование угля и древесного топлива для отопления может увеличивать выбросы мелкодисперсных частиц. При этом фактический перенос и накопление загрязняющих веществ зависят от скорости и направления ветра, интенсивности выбросов и условий атмосферного рассеивания.

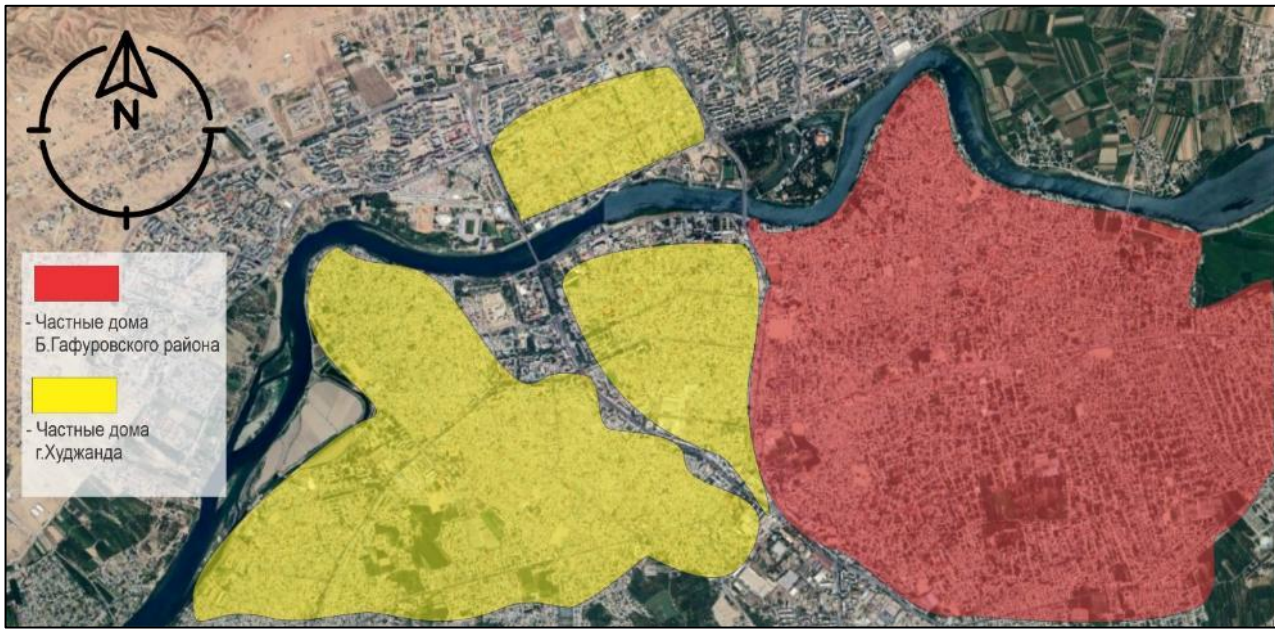


Рисунок 4.15. – Космический снимок г. Худжанд и прилегающих к нему территорий с обозначением зон расположения частных домов.

Дополнительным источником загрязнения атмосферного воздуха является бытовое отопление частного сектора г. Худжанд и прилегающих территорий Бободжон-Гафуровского района (рисунок 4.15). Использование угля и древесного топлива в холодный период сопровождается выбросами мелкодисперсных частиц PM2,5, диоксида серы (SO_2), оксидов азота (NO_x), угарного газа (CO) и других загрязняющих веществ.

Для предварительной оценки потенциальных выбросов PM2,5 рассмотрен расчётный сценарий с использованием методического подхода Tier 1 руководства EMEP/EEA по инвентаризации атмосферных выбросов [101]. По картографической оценке, площадь выделенной территории частной застройки Бободжон-Гафуровского района составляет около 1185 га. При условной площади участка 0,08 га расчётное количество участков составляет приблизительно 14,8 тыс. Если предположить, что 50% соответствующих домохозяйств используют в среднем 1,5 т угля за отопительный сезон, суммарный расход топлива может достигать 11,1 тыс. т.

При принятой теплоте сгорания угля 24 ГДж/т и нормативно-методическом коэффициенте эмиссии PM2,5, равном 398 г/ГДж [101], условный объём выбросов мелкодисперсных частиц составляет около 106 т за отопительный сезон. Данная оценка носит сценарный характер, поскольку фактическое количество домохозяйств, доля используемого угольного топлива и характеристики отопительных установок требуют дополнительного уточнения. Полученные результаты указывают на потенциально значительную аэрозольную нагрузку от бытового отопления, особенно в холодный период. При этом доля указанных выбросов, достигающая территории г. Худжанд, зависит от ветрового режима, расстояния до источников и условий атмосферного рассеивания.

Сопоставление скорости ветра и концентраций PM2,5 (рисунок 4.16) выявило неоднозначный характер их взаимосвязи. В отдельные периоды при слабом ветре, преимущественно до 3 м/с, наблюдалось повышение концентраций, тогда как усиление ветра свыше 5 м/с могло сопровождаться снижением загрязнения вследствие улучшения условий атмосферного рассеивания. Вместе с тем направление воздушных потоков может способствовать переносу загрязняющих веществ со стороны прилегающих промышленных и жилых территорий.

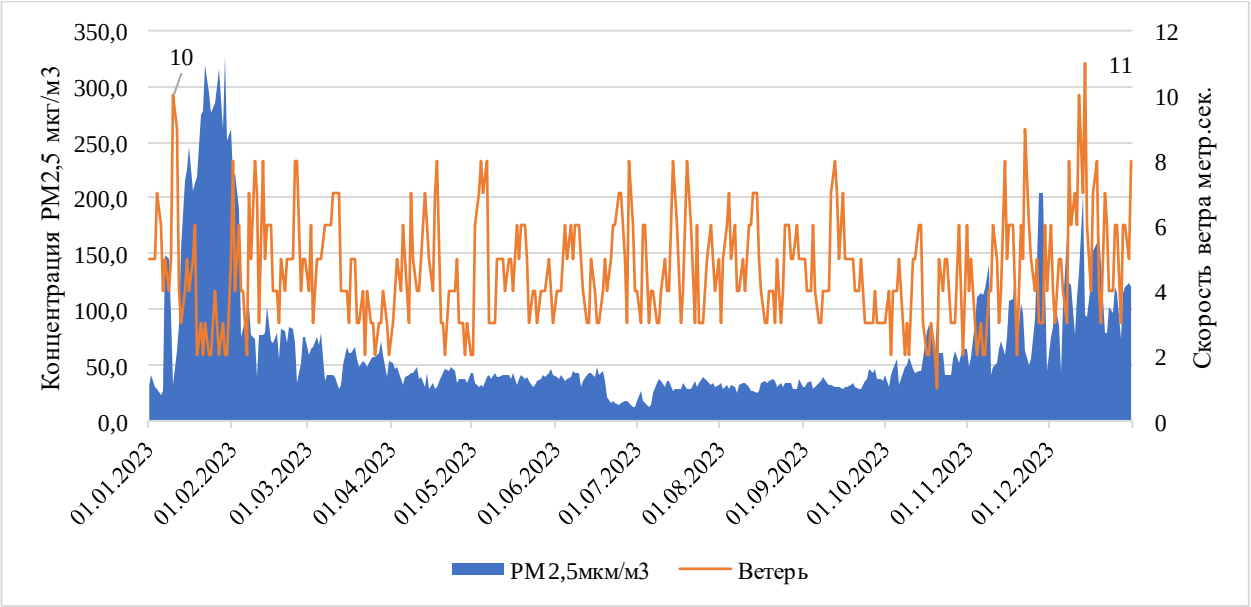


Рисунок 4.16 – Сопоставление суточных концентраций PM2,5 и скорости ветра на пункте мониторинга «Шелкокомбинат» г. Худжанд за 2023 год.

Для обобщения выявленных закономерностей проведён корреляционно-регрессионный анализ взаимосвязей концентраций PM2,5 с основными метеорологическими параметрами. Расчёты выполнены по соответствующим временным выборкам, включая среднемесячные значения за 2021–2022 годы. Для оценки направления и тесноты линейной связи использован коэффициент корреляции Пирсона (r), а для определения доли изменчивости показателя, описываемой регрессионной моделью, — коэффициент детерминации (R^2). Результаты представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – 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	$r \approx +0{,}513$; $R^2 = 0{,}2634$	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.

Корреляционно-регрессионный анализ выявил выраженную отрицательную взаимосвязь концентраций PM2,5 с температурой воздуха за 2022 год ($r = -0{,}903$; $R^2 = 0{,}815$) и положительную связь с относительной влажностью в 2021 году ($r = +0{,}866$; $R^2 = 0{,}751$) и 2022 году ($r = +0{,}823$; $R^2 = 0{,}677$). Связь с атмосферным давлением характеризовалась умеренной теснотой ($r \approx +0{,}513$; $R^2 = 0{,}2634$). Между температурой и влажностью установлена сильная отрицательная корреляция ($r = -0{,}942$), указывающая на согласованность их сезонных изменений.

Совместное включение температуры и влажности в линейную регрессионную модель увеличило коэффициент детерминации с $R^2 = 0{,}815$ до $R^2 = 0{,}822$, то есть на 0,7 процентного пункта. Незначительный прирост объясняется высокой взаимосвязью самих метеорологических параметров, что ограничивает возможность выделения их самостоятельного статистического вклада. Полученные результаты подтверждают значение комплексного учёта метеорологических условий при анализе сезонной изменчивости PM2,5, однако

не позволяют рассматривать установленные корреляции как доказательство непосредственных причинно-следственных зависимостей.

4.4. Математическое моделирование процесса загрязнения атмосферного воздуха в пределах г. Худжанд

Развитие промышленности, транспортной инфраструктуры и городской застройки повышает актуальность оценки воздействия антропогенных источников на качество атмосферного воздуха. Для г. Худжанд, характеризующегося сочетанием промышленных, транспортных и бытовых источников выбросов, особое значение имеет изучение процессов переноса и рассеивания загрязняющих веществ с учётом местных метеорологических условий.

Для оценки пространственного распространения загрязняющих веществ применён физико-математический подход, основанный на гауссовой модели рассеивания и использовании данных автоматизированного мониторинга. Такой подход позволяет рассчитывать концентрации загрязняющих веществ на различных расстояниях от источника, сопоставлять результаты с инструментальными измерениями PM2,5 и оценивать возможные сценарии изменения загрязнения при различных метеорологических условиях [28, 83].

Гауссова модель описывает распространение загрязняющих веществ от точечного источника при заданных условиях атмосферного переноса. Основными входными параметрами являются массовая интенсивность выброса, высота источника, скорость и направление ветра, класс устойчивости атмосферы и координаты расчётных точек. Модель позволяет определить распределение приземных концентраций и оценить влияние отдельных параметров на процессы атмосферного рассеивания [10, 48, 146, 147].

Преимуществом данного подхода является относительно небольшой объём необходимых исходных данных и возможность его совместного применения с результатами сенсорного мониторинга. Механизм распространения загрязняющих веществ в пространстве представлен на рисунке 4.17.

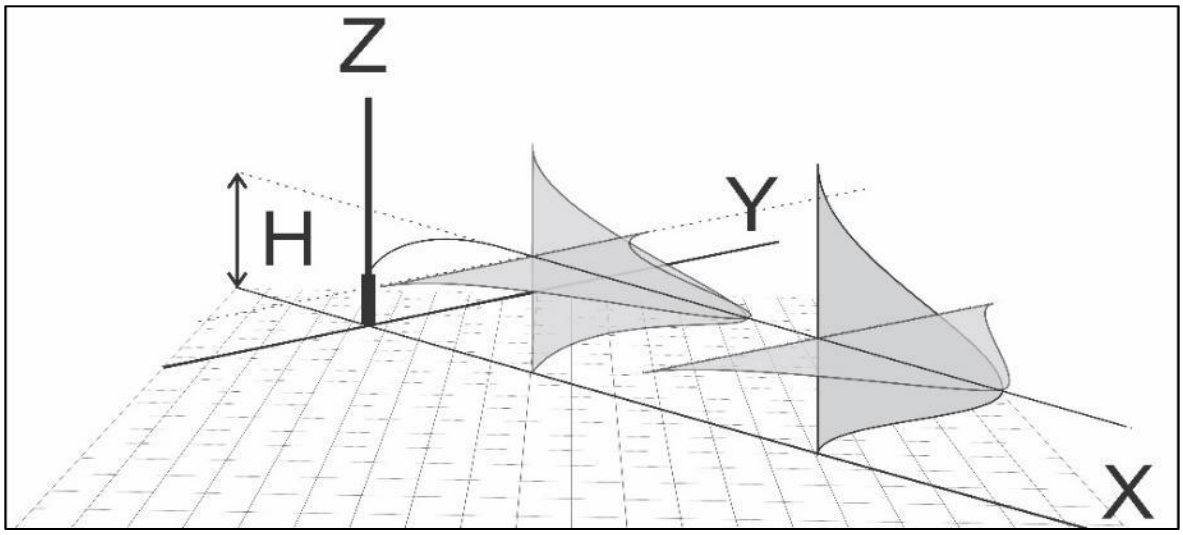


Рисунок 4.17 – Механизм действия модели рассеивания загрязнителей в воздухе.

На рисунках 4.17 и 4.18 представлены пространственная схема распространения загрязняющих веществ и основные входные и выходные параметры гауссовой модели. Интенсивность выброса обозначена ***Q*** (г/с), эффективная высота источника - ***H*** (м), скорость ветра – ***u***(м/с), направление ветра - углом φ относительно принятой системы координат. Дополнительно учитываются класс устойчивости и координаты расчётной точки (***x, y, z***).

Эффективная высота H определяется как сумма физической высоты источника и подъёма газовоздушного факела. Степень горизонтального и вертикального рассеивания характеризуется параметрами ***σy*** и ***σz***, зависящими от расстояния и атмосферной устойчивости. Результатом моделирования является расчётная концентрация загрязняющего вещества ***C(x,y,z)***, выраженная в мкг/м³ после соответствующего пересчёта единиц измерения.

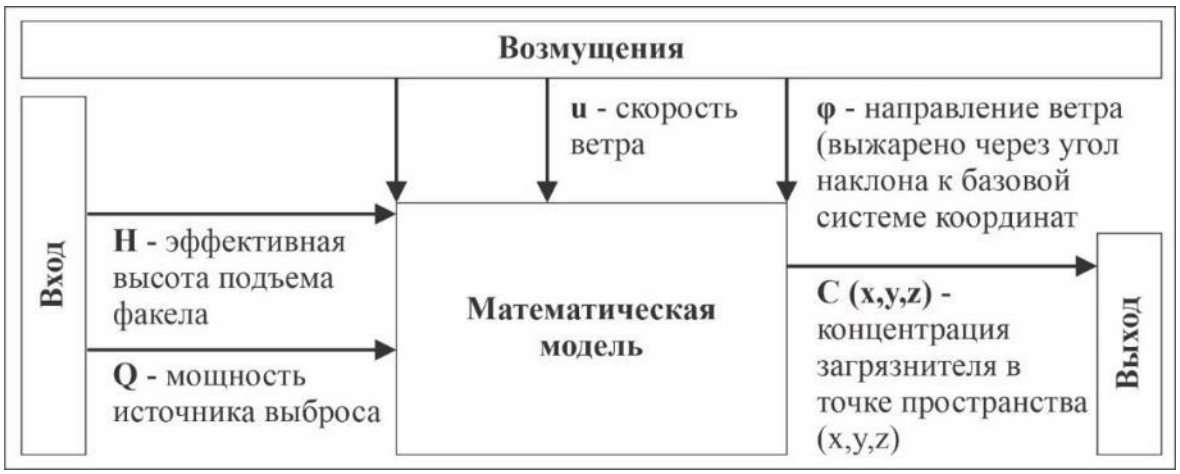


Рисунок 4.18 – Входные и выходные параметры физико-математической модели

Для моделирования распространения загрязняющих веществ от организованного точечного источника используется стационарная гауссова модель. Начало координат располагается у основания источника, ось OX направлена по ветру, OY — перпендикулярно направлению переноса, OZ — вертикально вверх. Распределение концентрации загрязняющего вещества определяется выражением:

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

где C(x,y,z) — расчётная концентрация загрязняющего вещества в точке с координатами x, y, z; Q — массовая интенсивность выброса загрязняющего вещества, г/с; u — скорость ветра на расчётной высоте, м/с; σy(x) и σz(x) — параметры горизонтального и вертикального рассеивания, м, зависящие от расстояния и класса устойчивости атмосферы; H — эффективная высота источника выброса, м; x — расстояние по направлению ветра; y — расстояние в поперечном направлении; z — высота расчётной точки над поверхностью земли.

Расчётная схема предполагает стационарный режим переноса, приближённо постоянную скорость и направление ветра, а также заданный класс устойчивости атмосферы. Применение модели позволяет получить распределение концентраций в зоне влияния источника и оценить их изменение с расстоянием. При использовании Q в г/с результат расчёта выражается в г/м³; для представления концентрации в мкг/м³ выполняется соответствующий пересчёт единиц измерения.

Данная формула учитывает перенос загрязняющего вещества в направлении ветра, поперечное и вертикальное рассеивание, а также отражение факела от поверхности земли. Это позволяет моделировать приземные концентрации загрязнителей на различных расстояниях от источника. При расчете концентраций PM2,5 в условиях г. Худжанд такая модель может использоваться для предварительной оценки влияния промышленных объектов, котельных, участков частного сектора и других источников выбросов.

При определении концентрации непосредственно у поверхности земли (z = 0) выражение (1) преобразуется к следующему виду:

$$C\ (x, y, 0) = \frac{Q}{\pi u \sigma_{y(x)\sigma_z(x)}} exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)}\right) exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_Z^2(x)}\right) \qquad (2)$$

Данное выражение используется для расчёта приземных концентраций загрязняющих веществ. При необходимости оценки на высоте дыхательной зоны применяется общая формула (1) с соответствующим значением координаты z.

Данная форма удобна для оценки концентрации загрязнителей в приземном слое, где непосредственно происходит воздействие на население.

Помимо гауссовой модели точечного источника, для оценки распространения загрязняющих веществ от протяжённых объектов могут применяться расчётные зависимости для линейных источников. В методике ОНД-86 [48] предусмотрены варианты определения концентраций при направлении ветра вдоль и поперёк линейного источника. Эти подходы представляют отдельные расчётные схемы и могут использоваться при оценке воздействия транспортных коридоров и других протяжённых источников при наличии необходимых исходных данных.

1. Распределение концентрации вредных веществ ***C*** на расстоянии ***X*** от центра линейного источника длиной ***L*** при ветре, направленном вдоль этого источника, в случае, когда скорость ветра равна $\boldsymbol{U_m}$ определяется по формуле

$$C = (S^{I}{}_{3} - S^{II}{}_{3}) \frac{X^{I}mC^{I}m}{L} \qquad (3)$$

где, L - длина линейного источника, м; x - расстояние от его центра, м; C′m и x′m - максимальная приземная концентрация и расстояние её достижения для соответствующего эквивалентного точечного источника; $S^{I}{}_{3}$ и $S^{II}{}_{3}$ безразмерные коэффициенты, определяемые по графику для $\boldsymbol{S_3}$ указанному на рис.4.18. в зависимости от отношений $\frac{2x+L}{2x^{I}m}$ и $\frac{2x-L}{2x^{I}m}$ соответственно, причем по пунктирной линии в случае тяжелой примеси [48]. При высотах источника ***H*** *(м)* меньше 10 метром безразмерный коэффициент $\boldsymbol{S_3}$ заменяется на безразмерный коэффициент:

$S^{II}_{3}(t) = 0.125\,(H-2) + 0.125\,(10-H)$ при $t \le 1$;

$S^{II}_{3}(t) = S_3(t) + 0.125\,(10-H)\,[1 - S_3(t)]$ при $t > 1$,

где S_3 определяется по тому же аргументу t с помощью рис.4.18.

В случаях, когда требуется оценить распространение загрязняющих веществ от протяжённых или площадных источников, таких как автомобильные дороги, транспортные коридоры, промышленные площадки и участки частной застройки, расчётная область может быть представлена совокупностью источников. Концентрация в расчётной точке определяется путём суммирования вкладов отдельных элементов при заданных метеорологических условиях.

Такой подход расширяет возможности применения гауссовой модели для предварительной оценки загрязнения воздушного бассейна городской территории. Вместе с тем в настоящем исследовании практический расчёт выполнен для организованного точечного источника, параметры которого представлены в подразделе 4.4.1. Моделирование линейных и площадных источников рассматривается как направление дальнейшего развития расчётной системы.

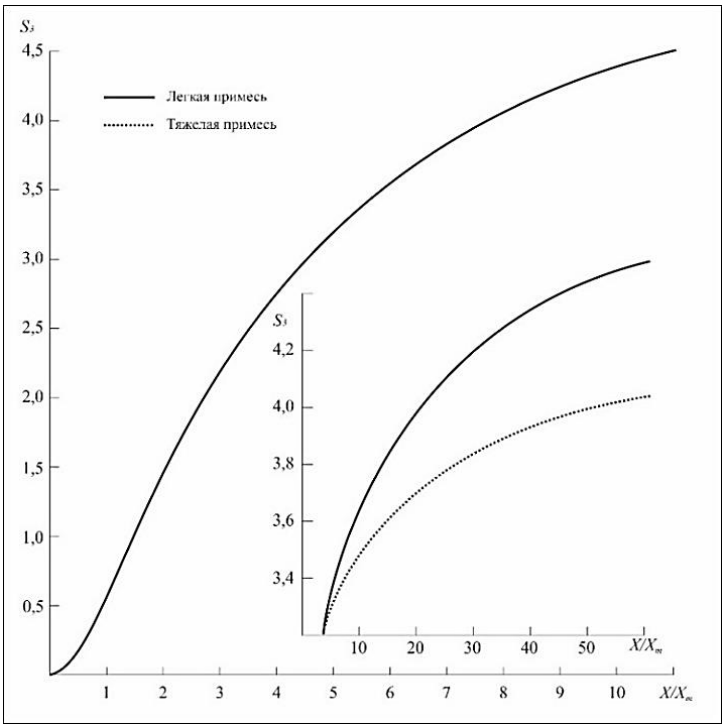


Рисунок 4.19 – Схема определения концентраций загрязняющих веществ от линейного источника длиной L с учётом направления ветра.

Представленные зависимости характеризуют альтернативные варианты расчёта приземных концентраций от линейных источников при различных направлениях и скоростях ветра. Их применение требует задания длины источника, мощности выброса и соответствующих поправочных коэффициентов. В настоящем исследовании они рассматриваются как методическая основа для возможного расширения моделирования на транспортные коридоры и другие протяжённые объекты. Практическая проверка выполнена для организованного точечного источника, рассмотренного в подразделе 4.4.1.

При скорости ветра $\boldsymbol{u \neq u_m}$ значение **C** определяется по формуле:

$$C = pr\,(S^{I}{}_{3} - S^{II}{}_{3})\frac{X^{I}m\;C^{I}m}{L} \qquad (4)$$

где ***r*** и ***p*** определяются в соответствии значениям u/$u^{I}{}_{m}{}^{I}$ а $S^{I}{}_{3}$ и $S^{II}{}_{3}$ соответственно по $\frac{2x+L}{2px^{I}{}_{m}}$ и $\frac{2x-L}{2px^{I}{}_{m}}$.

2. Расчёт концентраций при направлении ветра поперёк линейного источника. При поперечном направлении ветра максимальная приземная концентрация определяется с использованием поправочного коэффициента ε_1, учитывающего особенности распределения выбросов по длине источника [48]:

$$C_m = \varepsilon_1 C_m \qquad (5)$$

Здесь безразмерный коэффициент ε_1 определяется по формулам:

$$\varepsilon_1 = 0{,}923\alpha \text{ при } \alpha \leq 0{,}255; \qquad (6)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1{,}13\alpha^2}{(\alpha+0{,}3)^2} \text{ при } 0{,}255 < \alpha \leq 2{,}32;$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\alpha^2}{\alpha^2+0{,}7} \text{ при } \alpha > 2.32,$$

где

$$\alpha = \frac{X^{I}m}{L\sqrt{U_m}} \text{ при } U^{I}{}_{m} \leq 5, \qquad (7)$$

$$\alpha = 45\frac{X^{I}m}{L} \text{ при } U^{I}{}_{m} > 5.$$

Расстояние от линейного источника $\boldsymbol{X_m}$ на котором достигается максимальная приземная концентрация вредных веществ $\boldsymbol{C_m}$ определяется по формуле:

$$X_m = \varepsilon_2 \cdot X_m \quad (8)$$

$$\varepsilon_2 = 3 \text{ при } \alpha \leq 0{,}25; \quad (9)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1.5}{\sqrt{\alpha}} \text{ при } 0{,}25 < \alpha \leq 2{,}25$$

$$\varepsilon_2 = 1 \text{ при } \alpha > 2{,}25$$

Последовательность моделирования включает формирование исходных данных, определение параметров источника и метеорологических условий, расчёт распространения загрязняющих веществ и визуализацию полученных концентраций. На первом этапе задаются координаты источника, его геометрические характеристики, массовая интенсивность выброса Q и эффективная высота H(м). Далее учитываются скорость и направление ветра, класс устойчивости атмосферы и параметры горизонтального и вертикального рассеивания σy и σz.

На основе выбранной модели рассчитываются концентрации загрязняющих веществ в заданных точках пространства с последующим формированием продольного профиля и двумерного поля концентраций. Полученные результаты представляются в виде изолиний и используются для определения зон максимального расчётного вклада, оценки влияния метеорологических условий и сопоставления с данными инструментального мониторинга. Общая последовательность расчёта соответствует принятому физико-математическому подходу [44, с. 16].

Визуализация результатов позволяет оценить направление распространения загрязняющих веществ, положение зоны максимальной концентрации и изменение загрязнения с удалением от источника (рисунок 4.20).

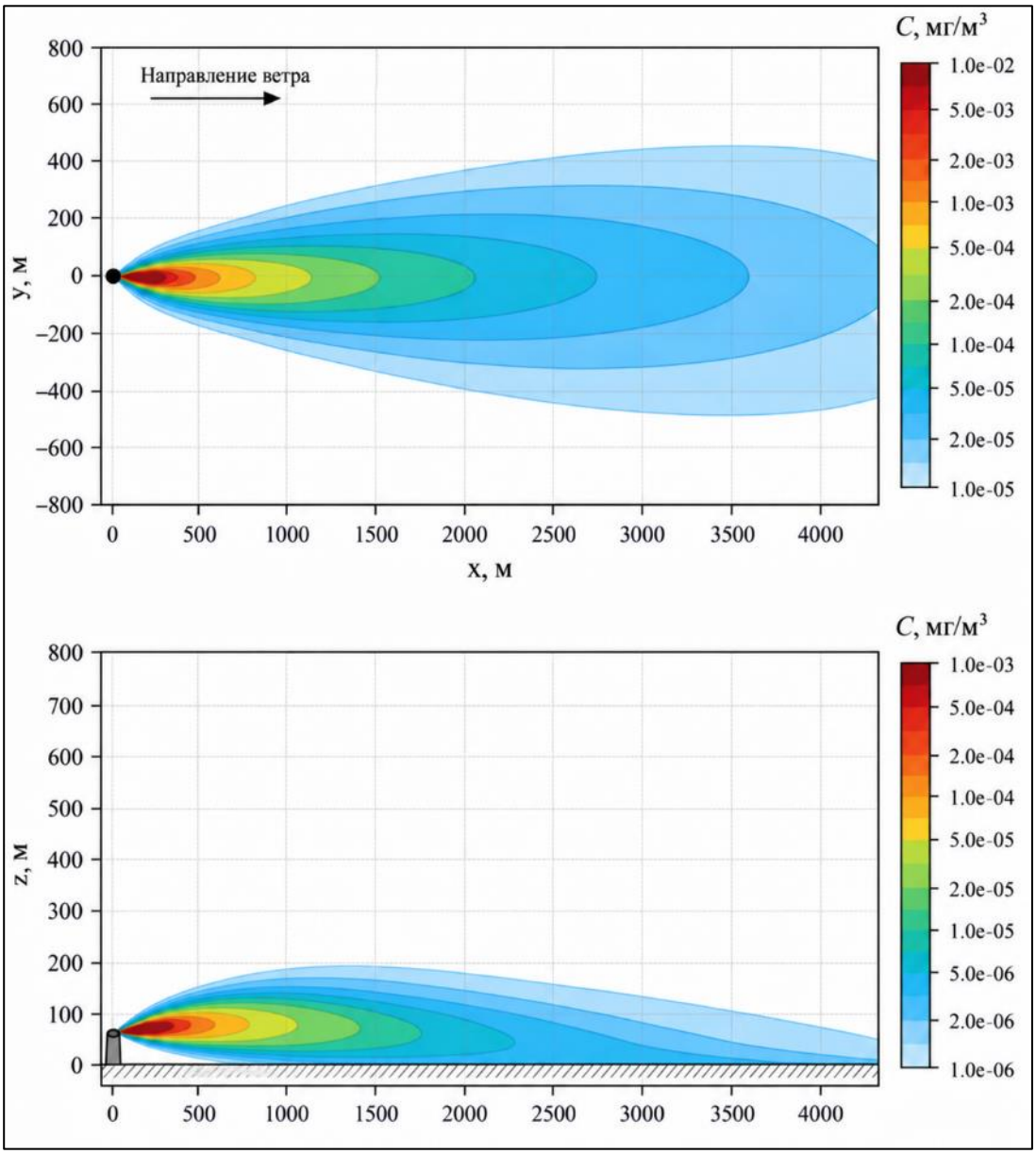


Рисунок 4.20 – Графики уровня концентрации загрязнителей в изолиниях (ось абсцисс – координаты по направлению ветра X, ось ординат – координаты, перпендикулярные направления ветра Y).

Применение математического моделирования совместно с данными автоматизированного мониторинга позволяет предварительно оценивать пространственное распространение загрязняющих веществ, определять потенциальные зоны повышенных концентраций PM2,5 и анализировать влияние метеорологических условий. В исследовании принят диапазон отклонений расчётных и контрольных значений 12–18%, при этом достоверность результатов зависит от характеристик источника, полноты исходных данных и параметров атмосферного рассеивания. Предложенный подход рассматривается как дополнительный инструмент экологической оценки и прогнозирования

качества атмосферного воздуха г. Худжанд, не заменяющий инструментальные наблюдения [10, 28, 48, 83, 146, 147].

4.4.1. Расчётный пример моделирования на основе параметров источника ООО «Джавони»

Для практической реализации приведённого математического подхода в качестве расчётного примера выбран организованный источник ООО «Джавони», расположенного в северо-восточной промышленной зоне г.Худжанд. Исходные геометрические и газодинамические параметры приняты по проекту нормативов предельно допустимых выбросов предприятия [73]. Выбор данного источника обусловлен наличием необходимого набора исходных параметров для расчёта рассеивания твёрдой примеси.

Таблица 4.11 – Исходные параметры организованного источника № 0026 ООО «Джавони»

Параметр	Значение
Оборудование котельной	2 котла DZL-4-1,25
Высота трубы H	48,0 м
Диаметр устья D	0,830 м
Скорость выхода газов Vs	7,0 м/с
Объёмный расход газов	3,8 м³/с
Температура отходящих газов Ts	170 °C
Расход угля	8154 т/год
Время работы источника	7248 ч/год
Пылегазоочистка	циклон, эффективность около 77 %
Расчётный выброс компонента «сажа» после очистки	3,924 г/с; 102,383 т/год

В качестве основного расчётного источника рассмотрена дымовая труба высотой 48 м с диаметром устья 0,830 м. Согласно исходным данным предприятия, массовая интенсивность выброса компонента «сажа» после очистки составляет 3,924 г/с. Указанное значение соответствует годовому выбросу около 102,383 т при продолжительности работы источника 7248 часов в год. Следует учитывать, что выброс компонента «сажа», представленный в документации предприятия, не является непосредственным измерением массовой концентрации PM2,5. Поэтому оценка мелкодисперсной составляющей выполняется в рамках отдельного расчётного допущения.

Для сценарной оценки мелкодисперсной составляющей выброса принят коэффициент K = 0,40, характеризующий условную долю PM2,5 в составе твёрдой примеси. При исходной интенсивности выброса сажи Q = 3,924 г/с расчётная интенсивность мелкодисперсной составляющей составляет 1,5696 г/с. Поскольку фактический фракционный состав выброса не определялся, коэффициент используется как расчётное допущение. На рисунке 4.21 представлены профили распространения полной твёрдой примеси и её условной мелкодисперсной составляющей.

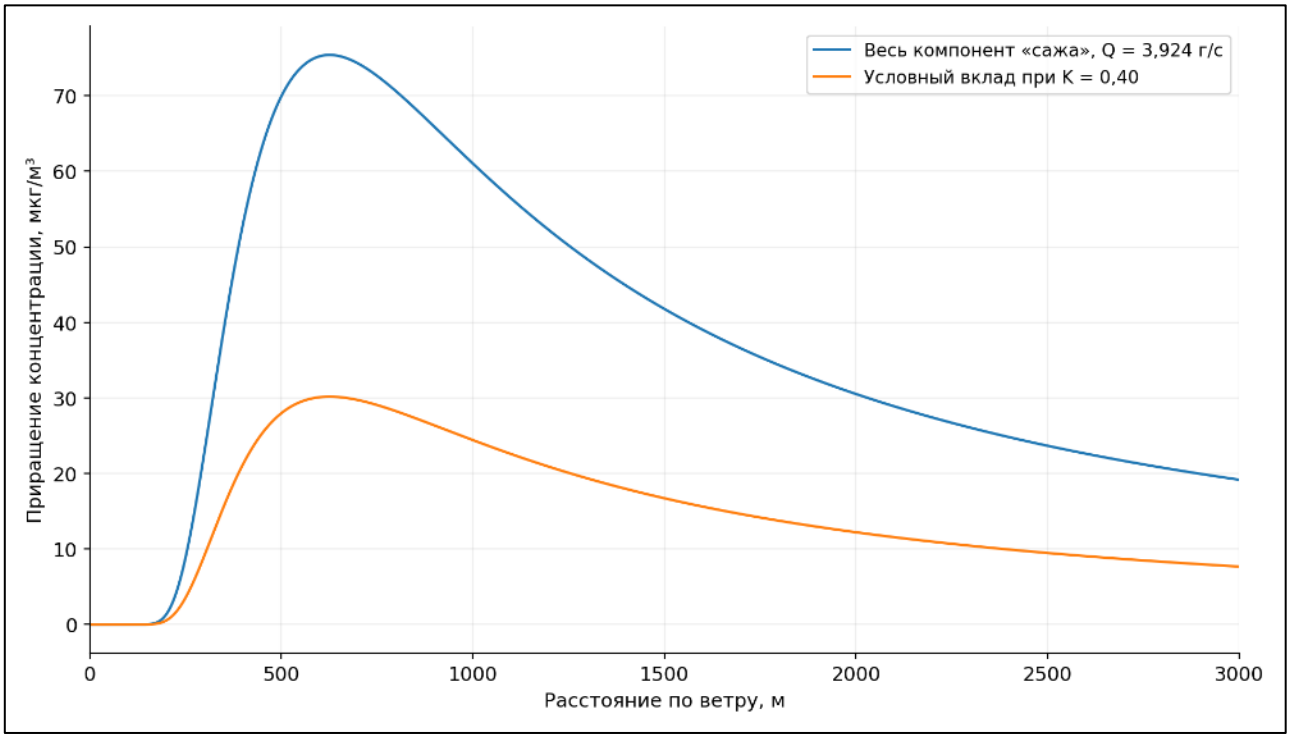


Рисунок 4.21 – Расчётные профили приземных концентраций твёрдой примеси и её условной фракции PM2,5 от источника ООО «Джавони».

Расчётные профили показывают формирование максимальных приземных концентраций на расстоянии около 626 м от источника. Максимальный вклад полной твёрдой примеси составляет приблизительно 75 мкг/м³, а условной фракции PM2,5 при K = 0,40 — около 30 мкг/м³. Полученные результаты позволяют предварительно определить участки потенциально повышенного загрязнения и обосновать размещение дополнительных пунктов мониторинга.

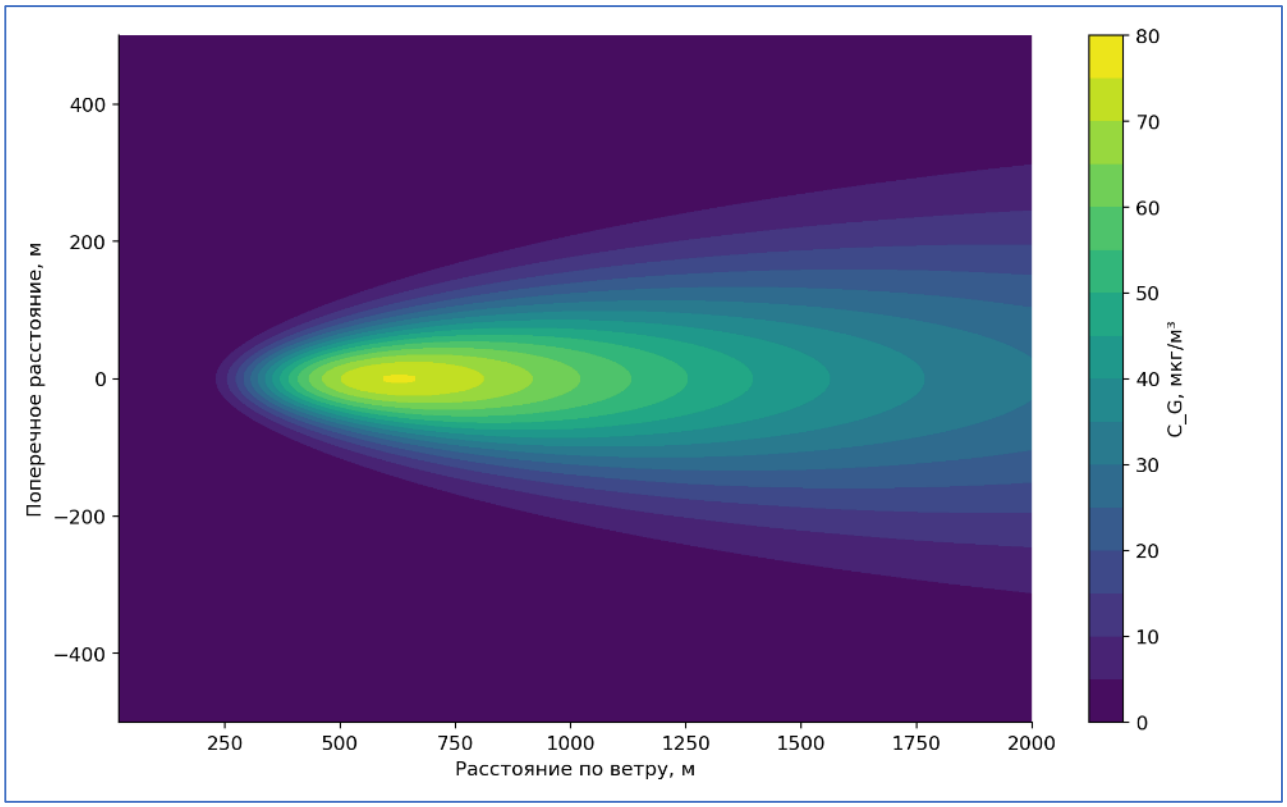


Рисунок 4.22 – Расчётное поле приземных концентраций компонента «сажа» от источника ООО «Джавони» при скорости ветра 2,5 м/с.

Для предварительной проверки результатов математического моделирования выполнено сопоставление расчётных концентраций с контрольными измерениями PM2,5 на расстояниях 100, 500 и 1000 м от рассматриваемого источника. Контрольные измерения проводились в ноябре с использованием собственных автоматизированных датчиков. В каждой точке выполнялись три последовательных измерения с интервалом пять минут, после чего определялось среднее арифметическое зарегистрированных концентраций.

Расчётные концентрации определялись на основе принятой гауссовой модели с учётом фоновой составляющей и локального вклада источника. Для оценки согласованности расчётных и контрольных показателей использована относительная величина отклонения, определяемая как отношение абсолютной разности расчётной и измеренной концентраций к измеренной концентрации, выраженное в процентах. Результаты сопоставления представлены в таб. 4.12.

Таблица 4.12 – Сопоставление расчётных и контрольных значений концентрации PM2,5 (ноябрь 2022)

Расстояние, м	Контрольное значение, мкг/м³	Расчётное значение, мкг/м³	Отклонение, %
100	157	134,33	14,44
500	123	103,33	15,99
1000	83	94,74	14,14

Полученные отклонения составили 14,15–15,99 %, то есть находятся в установленном в работе диапазоне 12–18 %. Дополнительный расчёт на примере реального стационарного источника тем самым усиливает практическую применимость принятой модели для предварительной оценки и прогнозирования пространственного распространения загрязняющих веществ в воздушном бассейне г. Худжанд.

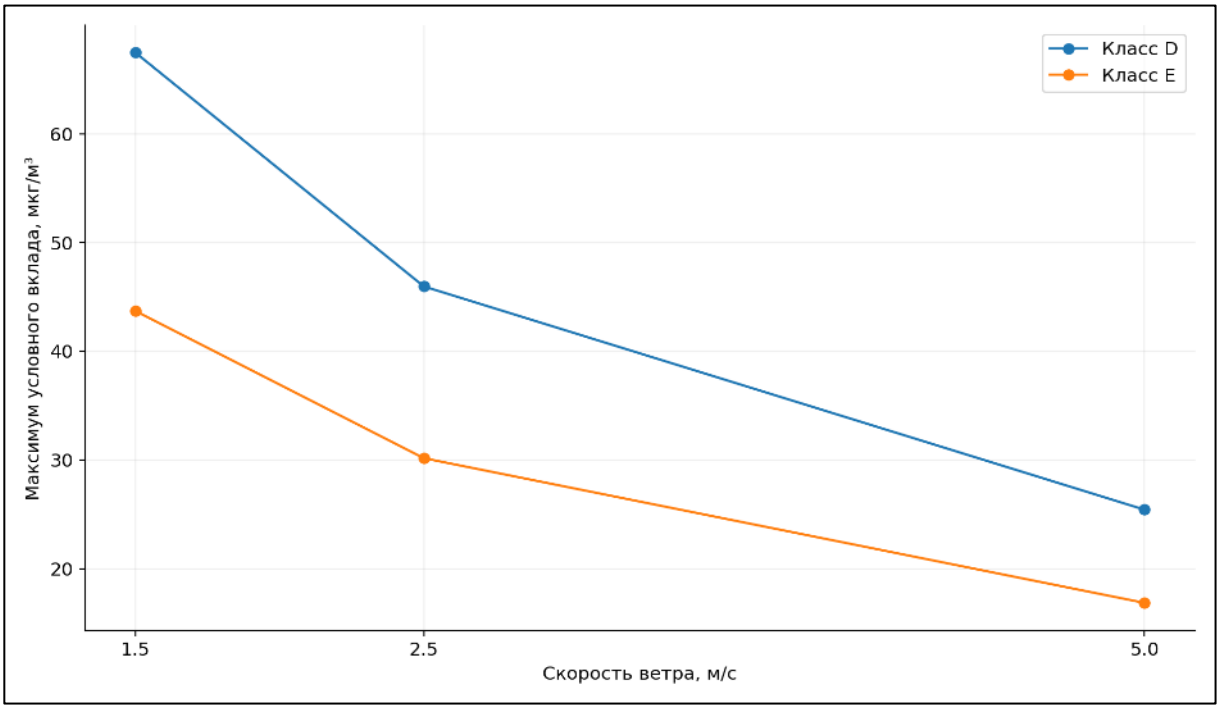


Рисунок 4.23 – Зависимость максимального расчётного вклада условной фракции PM2,5 от скорости ветра при классах устойчивости атмосферы D и E.

Анализ чувствительности модели (рисунок 4.23) показал снижение максимальной расчётной концентрации при увеличении скорости ветра от 1,5 до 5 м/с. Для класса устойчивости E максимальный вклад условной фракции PM2,5 уменьшается приблизительно с 44 до 17 мкг/м³, а для класса D — с 67 до 25 мкг/м³. Полученные результаты подтверждают зависимость расчётного

рассеивания загрязняющих веществ от скорости ветра и атмосферной устойчивости в пределах рассмотренных сценариев.

С экологической точки зрения результаты моделирования могут использоваться для предварительного выявления территорий, требующих повышенного природоохранного внимания. При дальнейшем развитии модели целесообразно учитывать расположение жилых кварталов, зелёных насаждений, рекреационных зон и водных объектов. Совмещение расчётных полей концентраций с картографическими данными об экологически чувствительных территориях позволит обосновывать приоритеты мониторинга и размещения дополнительных пунктов наблюдений.

Выводы по главе 4

1. Применение автоматизированной системы мониторинга с использованием оптических сенсоров Plantower PMS5003 и метеорологических датчиков BME280 позволило сформировать многолетние ряды наблюдений за концентрациями PM1,0, PM2,5 и PM10, температурой, относительной влажностью и атмосферным давлением. Основным показателем углублённого анализа принята концентрация PM2,5 ввиду её экологической и санитарно-гигиенической значимости для оценки аэрозольного загрязнения атмосферного воздуха.

2. По результатам мониторинга за 2019–2023 годы установлена выраженная межгодовая и сезонная изменчивость концентраций PM2,5 в атмосферном воздухе Худжанда. Среднегодовые значения по данным пункта «19-й микрорайон» 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 [152], свидетельствуя о высоком уровне аэрозольного загрязнения в зоне наблюдений.

3. Установлена высокая повторяемость среднесуточных концентраций PM2,5 выше 35 мкг/м³. По данным пункта «19-й микрорайон», доля дней с превышением 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 [152]. Результаты подтверждают необходимость систематического мониторинга с учётом различий пространственного охвата сети наблюдений.

4. Выявлена выраженная сезонная изменчивость концентраций PM2,5. По среднемесячным данным за 2019–2022 годы средняя концентрация в зимний период составила около 100,9 мкг/м³, а в летний — 25,0 мкг/м³, что соответствует различию приблизительно в 4,05 раза. Установленная закономерность согласуется с сезонными изменениями отопительной нагрузки и метеорологических условий, влияющих на накопление и рассеивание аэрозольных частиц.

5. Корреляционно-регрессионный анализ выявил статистические взаимосвязи концентраций PM2,5 с метеорологическими параметрами. По среднемесячным данным за 2022 год установлена сильная отрицательная корреляция с температурой воздуха ($r = -0,903$; $R^2 = 0,815$) и положительная корреляция с относительной влажностью ($r = +0,823$; $R^2 = 0,677$). При совместном учёте температуры и влажности коэффициент детерминации составил $R^2 = 0,822$. Полученные результаты отражают сопряжённость сезонной изменчивости PM2,5 и метеорологических условий и обосновывают необходимость их комплексного учёта при оценке загрязнения атмосферного воздуха.

6. Анализ атмосферных осадков, скорости и направления ветра выявил их значение для процессов переноса, накопления и удаления аэрозольных частиц. В отдельные периоды выпадение осадков сопровождалось снижением концентраций PM2,5, что согласуется с механизмом влажного осаждения аэрозолей. Повышение скорости ветра в рассмотренных условиях преимущественно способствовало рассеиванию загрязняющих веществ, тогда как направление воздушных потоков создавало условия для их переноса от промышленных, транспортных и бытовых источников.

7. Для предварительной оценки пространственного распространения загрязняющих веществ применена гауссова модель рассеивания. На примере организованного источника ООО «Джавони» выполнены расчёты приземных концентраций при заданных характеристиках выброса и метеорологических условиях. Расчётный сценарий показал формирование максимального вклада на расстоянии около 626 м по направлению ветра. Полученные результаты демонстрируют возможности моделирования для определения потенциальных зон повышенного загрязнения и обоснования размещения дополнительных пунктов наблюдения.

8. Математическое моделирование подтвердило возможность предварительной оценки распространения загрязняющих веществ и выявления зон повышенных концентраций PM2,5. В представленном сопоставлении расчётных и контрольных концентраций PM2,5 для трёх точек наблюдения относительные отклонения составили 14,14–15,99%, находясь в пределах принятого в исследовании диапазона 12–18%. Полученные результаты подтверждают целесообразность совместного применения математического моделирования и автоматизированного мониторинга для оценки и прогнозирования качества атмосферного воздуха г. Худжанд.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Основные научные результаты диссертации

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 ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Назаров Б.И. Сезонные изменения параметров атмосферы в г. Душанбе по данным AERONET // Оптика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 28. – № 1. – С. 76–85.
2. 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.
3. Абдуллозода С.Ф., Джамшедзода С., Халифаева Ш.Х., Маслов В.А. Среднедневные вариации содержания мышьяка, свинца и цинка в составе частиц атмосферного аэрозоля PM2,5 в г. Душанбе за 2014–2022 гг. // Известия НАНТ. Серия «Науки о Земле и окружающей среде. Энергетика и электротехника. Химические технологии, науки о материалах, металлургия». – 2025. – № 2 (6). – С. 53–59.
4. 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.
5. Абдуллозода С.Ф., Тиллобоев Х.И., Джураева Р.А. Исследование степени загрязненности воздушной среды мелкодисперсной пылью природного и техногенного происхождения на примере г. Худжанда // Ученые записки. Естественные и экономические науки. – 2025. – Т. 72. – № 1. – С. 23–29.
6. Азизов Р.О., Мамадов И.А. Математическое моделирование процесса загрязнения атмосферного воздуха // Политехнический вестник. Серия «Техника и общество». – 2026. – № 1 (13). – С. 24–30. – DOI: 10.65599/TS1285. – УДК 504.3.054:519.87.
7. Анализ повышения осведомленности по вопросам изменения климата в Таджикистане: аналитический отчет фазы 1 Пилотной программы по адаптации к изменению климата (ППАИК). – ПРООН, Таджикистан, 2012.

8. Безуглая Э.Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 184 с.
9. Белов С.В. Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды (техносферная безопасность) : учебник / С.В. Белов. – Москва : Юрайт, 2024. – 638 с.
10. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнений атмосферы. – Ленинград : Гидрометеоиздат, 1985. – 272 с.
11. 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.
12. Братков В.В., Воронин А.П. Метеорология и климатология: учебное пособие. – М.: Изд-во МИИГАиК, 2015.
13. Буйволов Ю.А., Боголюбов А.С. Программа комплексного исследования загрязнений наземных экосистем: введение в проблему мониторинга природной среды. – М.: Экосистема, 1997.
14. Веницианов Е.В. и др. Экологический мониторинг: шаг за шагом / под ред. Е.А. Заика. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2003. – 252 с.
15. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера / В.И. Вернадский. – М.: Наука, 1989. – 261 с.
16. Герасимов И.П. Система наземного мониторинга окружающей среды. – 1981.
17. Говоркова В.А., Катцов В.М. Изменения климата стран ближнего зарубежья России в XXI веке. – Санкт-Петербург: Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, 2008.
18. Горчаков Г.И. и др. О возможностях применения метода экспресс-анализа для определения химического состава приземных аэрозолей с целью идентификации их источников. – Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, 2018. – DOI: 10.13140/RG.2.2.21698.53444.

19. Горюнкова А.А. Современное состояние и подходы к разработке систем мониторинга загрязнения атмосферы // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. – Вып. 11.
20. ГОСТ 17.2.3.01–86. Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных пунктов. – М.: Издательство стандартов, 1986.
21. Декларация Конференции ООН по проблемам окружающей человека среды. – Стокгольм, 1972.
22. Заиков Г.Е., Маслов С.А., Рубайло В.Л. Кислотные дожди и окружающая среда / Г.Е. Заиков, С.А. Маслов, В.Л. Рубайло. – Москва : Химия, 1991. – 140 с. – ISBN 5-7245-0431-6. – URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01001576690 (дата обращения: 21.09.2026).
23. Закон Республики Таджикистан «О гидрометеорологической деятельности» от 2 декабря 2002 года (в действующей редакции, включая изменения от 13 ноября 2024 года № 2098). – URL: https://mmih.adlia.tj/SEARCH/DocumentView?DocumentId=23294 (дата обращения: 21.09.2026).
24. Закон Республики Таджикистан «Об обеспечении экологической безопасности автомобильного транспорта» от 8 августа 2015 года № 1214. – URL: https://mmih.adlia.tj/SEARCH/DocumentView?DocumentId=124975 (дата обращения: 21.09.2026).
25. Закон Республики Таджикистан «Об охране атмосферного воздуха» от 28 декабря 2012 года № 915 (в действующей редакции). – URL: https://mmih.adlia.tj/Search/DocumentView?DocumentId=118509 (дата обращения: 21.09.2026).
26. Закон Республики Таджикистан «Об охране окружающей среды» от 2 августа 2011 года № 760 (в действующей редакции). – URL: https://mmih.adlia.tj/SEARCH/DocumentView?DocumentId=120951 (дата обращения: 21.09.2026).
27. Закон Республики Таджикистан «Об экологическом мониторинге» от 25 марта 2011 года № 707 (в действующей редакции). – URL:

https://mmih.adlia.tj/SEARCH/DocumentView?DocumentId=36386 (дата обращения: 21.09.2026).

28. Замай С.С., Якубайлик О.Э. Модели оценки и прогноза загрязнений атмосферы промышленными выбросами в информационно-аналитической системе природоохранных служб крупного города : учебное пособие. – Красноярск: КГУ, 1998. – 109 с.
29. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. – Л.: Гидрометеоиздат, 1979. – 375 с.
30. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 560 с.
31. Каримов С.М., Бобоев Х.Б., Гулахмадов Х.Ш. Исследование запыленности атмосферного воздуха вблизи ОАО «Таджикцемент» г. Душанбе путем отбора проб воздуха // Наука и инновация. Серия геологических и технических наук. – 2023. – № 4. – С. 54–60.
32. Каримов С.М., Бобоев Х.Б., Гулахмадов Х.Ш. Обоснование параметров источников для расчета выбросов газа и пыли в атмосферный воздух от цементного производства // Политехнический вестник. Серия «Техника и общество». – 2025. – № 3 (11). – С. 21–27.
33. Каримов С.М., Бобоев Х.Б., Гулахмадов Х.Ш. Оценка химического состава снежного покрова в зоне влияния цементного завода на примере ОАО «Таджикцемент» г. Душанбе // Наука и инновация. Серия геологических и технических наук. – 2023. – № 3. – С. 44–53.
34. Каримов С.М., Гулахмадов Х.Ш., Бобоев Х.Б. Определение загрязнений снежного покрова и оценки техногенной нагрузки в зоне воздействия ОАО «Таджикцемент» г. Душанбе // Наука и инновация. Серия геологических и технических наук. – 2023. – № 1. – С. 158–166.
35. 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.

36. Качество атмосферного воздуха // Большая российская энциклопедия. – URL: https://bigenc.ru/c/kachestvo-atmosfernogo-vozdukha-legal-naia-definitsiia-07aedf (дата обращения: 18.03.2023).
37. Комиссаров Ю.А., Гордеев Л.С., Эдельштейн Ю.Д., Вент Д.П. Экологический мониторинг окружающей среды: учебное пособие для вузов: в 2 т. / под ред. П.Д. Саркисова. – М.: Химия, 2005.
38. Конвенция о доступе к информации, участии общественности в процессе принятия решений и доступе к правосудию по вопросам, касающимся окружающей среды. – Орхус, 1998.
39. Конвенция о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния. – Женева, 1979.
40. Концепция перехода Республики Таджикистан к устойчивому развитию на 2007–2030 годы. – Душанбе, 2007.
41. Кувшинников Д.Н., Меркушев А.Д. Мониторинг загрязнения воздушной среды. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2020.
42. Лазарева Е.О., Попова Е.С. Особенности пространственно-временной динамики антропогенных примесей воздуха г. Санкт-Петербурга за период времени с 1980 по 2012 годы // Ученые записки РГГМУ. – СПб., 2014. – № 37. – С. 204–215.
43. Ларионов М.В., Смирнова Е.Б., Бурдин М.В. Деградация окружающей среды в зоне влияния техногенных и сельскохозяйственных объектов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13. – № 1 (6). – С. 1347–1349.
44. Мамадов И.А. Качество воздуха как макроэкономический риск: оценки потерь и стратегия снижения ущерба в Республике Таджикистан // Наука и инновация. Серия геологических и технических наук. Таджикский

национальный университет. – 2026. – № 2. – С. 105–112. – ISSN 2664-1534. – УДК 504.5:628.5:711.4.

45. Мамадов И.А. Климат Центральной Азии: пыль, жара и цена бездействия / Чанг, жазирама ва бепарволик оқибати // Ватан. – 2025. – № 4 (8). – С. 40–45. – ISSN 3030-3583.
46. Материалы государственной статистической отчётности по форме 2-ТП (воздух) по городу Худжанду за 2023–2025 гг. – Худжанд, 2023–2025.
47. Меры по обеспечению качества воздуха в Европе и Центральной Азии: региональный обзор трендов выбросов, стратегий и программ по снижению загрязнения воздуха. – Программа ООН по окружающей среде. Доклад C598-R, 2021.
48. Методика расчёта концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86. – Ленинград : Гидрометеоиздат, 1987. – 93 с.
49. Министерство транспорта Республики Таджикистан. О количестве зарегистрированных транспортных средств в Республике Таджикистан по состоянию на 1 марта 2024 года. – Электронный ресурс. – URL: https://mintrans.tj/index.php/news-page/details/662 (дата обращения: 21.09.2026).
50. Морозов А.Е., Стародубцева Н.И. Метеорологические условия и загрязнение атмосферы: учебное пособие. – Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2020. – 128 с.
51. Муртазов А.К. Экологический мониторинг. Методы и средства: учебное пособие. – Рязань: Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина, 2008. – 146 с.
52. Назаров Б.И., Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А. Атмосферный аэрозоль Центральной Азии. – Душанбе : Дониш, 2017. – 416 с.
53. Назаров Б.И., Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А. Динамические процессы при пылевых вторжениях в Центральной Азии. – Душанбе : Ирфон, 2016. – 362 с.

54. Назаров Б.И., Ивлев Л.С., Абдуллаев С.Ф. Исследования структуры и свойств пылевых и аэрозолеобразующих примесей в аридной зоне юго-восточных районов Центральной Азии и их влияния на региональный климат. – Душанбе : Ирфон, 2015. – 482 с.
55. 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).
56. Николаева О.Н. Мониторинг среды обитания: курс лекций. – URL: https://moodle.kstu.ru/pluginfile.php/308505/mod_resource/content/1/Лекция%20№1%20по%20ЭМ%20для%20бакалавров.pdf (дата обращения: 16.04.2024).
57. О порядке организации единой государственной системы экологического мониторинга Республики Таджикистан: постановление Правительства Республики Таджикистан от 31 декабря 2014 г. № 791.
58. Обзор системы мониторинга атмосферного воздуха в Республике Таджикистан: отчет. – Душанбе: ОО «Молодежная группа по защите окружающей среды», 2024. – 49 с.
59. Обзоры результативности экологической деятельности. Таджикистан. Третий обзор. – Нью-Йорк; Женева: ЕЭК ООН, 2017.
60. Официальный сайт Росгидромет. – URL: http://www.meteorf.ru/ (дата обращения: 15.03.2023).
61. Охрана окружающей среды в Республике Таджикистан: статистический сборник. – Душанбе: Агентство по статистике при Президенте Республики Таджикистан, 2015.
62. Охрана окружающей среды в Республике Таджикистан: статистический сборник. – Душанбе: Агентство по статистике при Президенте Республики Таджикистан, 2020.
63. Оценка рисков для здоровья, связанных с загрязнением воздуха. Общие принципы. – Копенгаген: Европейское региональное бюро ВОЗ, 2016. –

URL: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/300876/Health-risk-assessment-airpollution-General-principles-ru.pdf (дата обращения: 18.11.2022).

64. Панарин В.М., Зякун А.М., Бизикин А.В., Зуйкова А.А. Автоматизированные системы экологического мониторинга атмосферы промышленно развитых территорий. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. – 218 с.
65. Пешков Ю.В. Система государственного мониторинга состояния и загрязнения атмосферного воздуха. – Санкт-Петербург, 2013.
66. Пленков О.Ю. Индустриальная цивилизация XX века: особенности эволюции и динамики // Метаморфозы истории. – 1997. – Вып. 1. – С. 93–106.
67. Поздняков Э. Изменение климата на Земле: причины и возможные последствия // МЭ и МО. – 2005.
68. 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).
69. Постановление Правительства Республики Таджикистан от 3 января 2014 года № 30 «О Техническом регламенте “Требования к безопасности автомобильного бензина, дизельного топлива, мазута и топлива для реактивных двигателей”». – URL: https://mmih.adlia.tj/SEARCH/DocumentView?DocumentId=120951 (дата обращения: 21.09.2026).
70. Постановление Правительства Республики Таджикистан от 4 марта 2015 года № 136 «О Техническом регламенте “Безопасность сжиженных углеводородных газов”». – URL: https://mmih.adlia.tj/SEARCH/DocumentView?DocumentId=123660 (дата обращения: 21.09.2026).

71. Программа социально-экономического развития города Худжанда на 2026–2030 годы. – Худжанд, 2025. – Утверждена решением Маджлиса народных депутатов города Худжанда от 26 декабря 2025 г. № 74.
72. Программа социально-экономического развития города Худжанда на период 2016–2020 годы. – 2015.
73. Проект нормативов предельно допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу для ООО «Джавони». – Худжанд, 2014.
74. Протокол о регистрах выбросов и переноса загрязнителей к Конвенции о доступе к информации, участии общественности в процессе принятия решений и доступе к правосудию по вопросам, касающимся окружающей среды. – Киев, 2003.
75. РД 52.04.186–89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. Часть 1. Загрязнение атмосферы в городах и других населенных пунктах. – М.: Госкомгидромет СССР, 1989.
76. РД 71.04.050. Физико-химические методы анализа. Введ. с 01.01.1995. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. – 20 с.
77. Рогожина Н.Г. Новые тенденции в экологической политике развивающихся стран // Мировая экономика и международные отношения. – 2009. – № 4.
78. Розумная Л.А., Кураева О.П. Экологический мониторинг атмосферного воздуха в современной системе управления качеством окружающей среды. РосГСУ, М.: 2013 – с. 83-91
79. Саблин И.В. Глобализация и окружающая среда: экологическая политика Индии и Китая // Век глобализации. – 2014. – № 2 (14).
80. Сидоренко В.Н. Моделирование и экономическая оценка ущерба здоровью населения регионов России от загрязнения атмосферного воздуха // Вестник Самарского государственного университета. Естественнонаучная серия. – 2006. – № 9 (49). – С. 270–276.
81. Сидорова Л.П. Метеорология и климатология: учебное электронное текстовое издание. – Екатеринбург: УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2015.

82. Системные изменения для улучшения качества воздуха: доклад Центральноазиатской конференции платформы AQCA, 22–23 февраля 2023 года. Система мониторинга качества воздуха в РТ. – С. 15.
83. Соляник Н.А., Кушников В.А., Пряхина Н.С. Информационная система прогнозирования состояния атмосферного воздуха г. Саратова // Экологические проблемы промышленных городов : сборник научных трудов. – Саратов: СГТУ, 2005. – С. 153–156.
84. Сообщение Европейской Комиссии Совету и Европейскому парламенту: тематическая стратегия по загрязнению воздуха атмосферы. – COM, 2005. – С. 446.
85. Строительная климатология: справочное пособие к СНиП 2.01.01-82 / Научно-исследовательский институт строительной физики Госстроя СССР; под общ. ред. М.И. Краснова. — М.: Стройиздат, 1990. — 86 с.
86. Справочник по климату СССР. Вып. 31. Таджикская ССР. Ч. 1. Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние. – Ленинград : Гидрометеоиздат, 1966.
87. Справочник по климату СССР. Вып. 31. Таджикская ССР. Ч. 2. Температура воздуха и почвы. – Ленинград : Гидрометеоиздат, 1966.
88. Справочник по климату СССР. Вып. 31. Таджикская ССР. Ч. 2. Температура воздуха и почвы. – М.: Гидрометеоиздат, 1965.
89. Справочник по климату СССР. Вып. 31. Таджикская ССР. Ч. 3. Ветер. – Ленинград : Гидрометеоиздат, 1967.
90. Справочник по климату СССР. Вып. 31. Таджикская ССР. Ч. 5. Облачность и атмосферные явления. – Ленинград : Гидрометеоиздат, 1970.
91. Справочник по климату СССР. Вып. 31. Таджикская ССР. Ч. IV. Влажность воздуха, атмосферные осадки, снежный покров. – Л.: Гидрометеоиздат, 1969. – 212 с.
92. Темиров К.О., Мамадов И.А. Особенности управления развитием зеленой экономики: теоретические аспекты // Вестник Таджикского государственного университета права, бизнеса и политики. Серия

общественных наук. – 2025. – № 2 (103). – С. 85–96. – DOI: 10.24412/3005-8023-2025-2-85-96.

93. Температура воздуха и осадки по месяцам и годам: Худжанд // Погода и климат. – Электронный ресурс. – Дата обращения: 20.09.2026. – URL: https://www.pogodaiklimat.ru/history/ru0106.htm.
94. Третье национальное сообщение Республики Таджикистан по Рамочной конвенции ООН об изменении климата. – Душанбе, 2014.
95. Укрепление роли Программы Организации Объединенных Наций по окружающей среде в обеспечении качества воздуха: резолюция Ассамблеи ЮНЕП № 1/7 от 27 июня 2014 г.
96. Фесечко А.И. Влияние окружающей среды на безопасность жизнедеятельности людей // Труды международного симпозиума «Надёжность и качество», Пензенский государственный университет, Пенза: 2010 – с. 214-216
97. Финаев А.Ф. Потенциал загрязнения атмосферы Таджикистана по сочетанию метеорологических факторов // Известия АН Республики Таджикистан. Отделение наук о Земле. – 1994. – № 1.
98. Ципилева Т.А. Геоинформационные системы: учебное пособие. – Кафедра автоматизации обработки информации, 2004. – С. 6.
99. Экологические бюллетени. Агентство по гидрометеорологии Республики Таджикистан. – URL: http://www.meteo.tj (дата обращения: 12.07.2025).
100. Якунина И.В., Попов Н.С. Методы и приборы контроля окружающей среды. Экологический мониторинг : учебное пособие / И.В. Якунина, Н.С. Попов. – Тамбов : Изд-во Тамбовского государственного технического университета, 2009. – 188 с. – ISBN 978-5-8265-0864-0. – URL: https://www.tstu.ru/book/elib/pdf/2009/Popov-Yakunina-l.pdf (дата обращения: 21.09.2026).
101. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2: Energy. – Hayama : Institute for Global Environmental Strategies, 2006.

102. 2024 World Air Quality Report. Region & City PM2,5 Ranking. – IQAir, 2025. – URL: https://www.iqair.com/world-air-quality-report (дата обращения: 03.04.2025).
103. 7 million premature deaths annually linked to air pollution. – Geneva: WHO, 2016. – URL: http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/airpollution/en/ (дата обращения: 03.03.2025).
104. Accelerating Access to Clean Air for a Livable Planet. – Washington, DC: World Bank, 2025. – URL: https://www.worldbank.org/en/publication/accelerating-access-to-clean-air-for-a-livable-planet (дата обращения: 22.06.2025).
105. Air pollution // World Health Organization. – URL: https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1 (дата обращения: 13.05.2026).
106. Air Quality Management in Tajikistan. – Washington, DC : World Bank, 2023.
107. Air Quality Sensor Performance Evaluation Center (AQ-SPEC): Field and Laboratory Evaluations of Air Quality Sensors // South Coast Air Quality Management District.
108. Alimov Kh., Bathan-Baterina G., Biggs R., Bontia C., Carbone S., DeWinter J., Diez S., Elkotbeid S., Espita-Casanova D., Friedman E., Gayle Tamayo E., Hagerbaumer Ch., Mamadov I., Martinez B., Opondo G., Pavlovic N., Tejada M. Imagine Two Scenarios: The Urgent Need for Equitable, Accessible Air Quality Data Management // Environment: Science and Policy for Sustainable Development. – 2026. – Vol. 68. – № 1. – P. 8–13. – DOI: 10.1080/00139157.2025.2575745.
109. Ambient (outdoor) air pollution // World Health Organization. – 2024. – URL: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-%28outdoor%29-air-quality-and-health (дата обращения: 19.12.2024).
110. Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C., Ljung G.M. Time Series Analysis: Forecasting and Control. – 5th ed. – Hoboken : Wiley, 2015.
111. BreezoMeter: environmental intelligence and air quality map. – URL: https://www.breezometer.com/air-quality-map/ (дата обращения: 22.02.2025).

112. Broomandi P., Mohammadpour K., Kaskaoutis D.G., Fathian A., Abdullaev S.F., Maslov V.A., Nikfal A., Jahanbakhshi A., Aubakirova B., Kim J.R., Satyanaga A., Rashki A., Middleton N. A Synoptic- and Remote Sensing-based Analysis of a Severe Dust Storm Event over Central Asia // Aerosol and Air Quality Research. – 2023. – Vol. 23, № 2. – Article 220309. – DOI: 10.4209/aaqr.220309.
113. Bulot F.M.J., Johnston S.J., Basford P.J., Easton N.H.C., Apetroaie-Cristea M., Foster G.L., Morris A.K.R., Cox S.J., Loxham M. Long-term field comparison of multiple low-cost particulate matter sensors in an outdoor urban environment // Scientific Reports. – 2019. – Vol. 9. – Article 7497. – DOI: 10.1038/s41598-019-43716-3.
114. Burden of disease from the joint effects of household and ambient air pollution for 2016. – Geneva: WHO, 2018. – URL: http://www.who.int/airpollution/data/AP_joint_effect_BoD_results_May2018.pdf (дата обращения: 24.11.2024).
115. City air quality trends (GEMS/AIR data). Vol. 2. Athens, Cairo, Caracas, Christchurch, Hong Kong, Los Angeles, Madrid, New York, Shenyang, Toronto. – Geneva: World Health Organization, 1993. – WHO/PEP/93.26.
116. Clements A., Duvall R., Greene D., Dye T. The Enhanced Air Sensor Guidebook. – Research Triangle Park, NC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 2022. – EPA/600/R-22/213.
117. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. – Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021. – URL: https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/ (дата обращения: 03.08.2025).
118. Climate Risk Country Profile: Tajikistan. – World Bank Group; Asian Development Bank, 2021. – 30 p.
119. Cressie N. Statistics for Spatial Data. – Revised edition. – New York : Wiley, 1993.
120. Duvall R.M., Long R.W., Beaver M.R., Kronmiller K.G., Wheeler M.L., Szykman J.J. Performance Testing Protocols, Metrics, and Target Values for Fine Particulate Matter Air Sensors: Use in Ambient, Outdoor, Fixed Site, Non-

Regulatory Supplemental and Informational Monitoring Applications. – Research Triangle Park, NC: U.S. Environmental Protection Agency, 2021. – EPA/600/R-20/280.

121. Economic cost of the health impact of air pollution in Europe: clean air, health and wealth. – Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2015. – URL: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0004/276772/Economic-cost-health-impact-air-pollution-en.pdf (дата обращения: 19.10.2023).
122. EMEP Steering Body: European Monitoring and Evaluation Programme // United Nations Economic Commission for Europe. – URL: https://unece.org/environmental-policy/air/emep-steering-body (дата обращения: 12.11.2023).
123. EMEP/CEIP. Emissions Database (WebDab): air pollutant emissions data // Centre on Emission Inventories and Projections. – Электронный ресурс. – URL: https://www.ceip.at/webdab-emission-database (дата обращения: 21.09.2026).
124. EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2023. – European Environment Agency, 2023.
125. European Air Quality Index // European Environment Agency. – Электронный ресурс. – URL: https://airindex.eea.europa.eu/AQI/ (дата обращения: 21.09.2026).
126. Fourth Environmental Performance Review of Tajikistan. – Geneva : United Nations Economic Commission for Europe, 2026.
127. Fourth National Communication of the Republic of Tajikistan under the UN Framework Convention on Climate Change. – Dushanbe, 2022. – 232 p.
128. 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.
129. Holzworth G.C. Meteorological Potential for Urban Air Pollution in the Contiguous United States // Proceedings of the 2nd Clean Air Congress. – Washington, D.C., 1970. – New York, 1971. – P. 1076–1080.

130. International Cooperative Programme on Assessment and Monitoring of the Effects of Air Pollution on Rivers and Lakes (ICP Waters) // UNECE. – URL: https://unece.org/ru/waters (дата обращения: 24.06.2026).
131. International Cooperative Programme on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops (ICP Vegetation) // UNECE. – URL: https://unece.org/ru/vegetation (дата обращения: 25.08.2026).
132. IQAir: real-time air quality information platform. – URL: https://www.iqair.com (дата обращения: 22.02.2025).
133. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R. – 2nd ed. – New York : Springer, 2021.
134. Japan Meteorological Agency. – URL: https://www.jma.go.jp/jma/indexe.html (дата обращения: 30.05.2024).
135. Karagulian F., Barbiere M., Kotsev A., Spinelle L., Gerboles M., Lagler F., Redon N., Crunaire S., Borowiak A. Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring // Atmosphere. – 2019. – Vol. 10, № 9. – Article 506. – DOI: 10.3390/atmos10090506.
136. Kiss A., Shelton D. Manual of European Environmental Law. – Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
137. Krzyzanowski M., Schwela D. Patterns of air pollution in developing countries // Air Pollution and Health / ed. S.T. Holgate et al. – San Diego: Academic Press, 1999. – P. 105–113.
138. Kuula J., Mäkelä T., Aurela M., Teinilä K., Varjonen S., González Ó., Timonen H. Laboratory evaluation of particle-size selectivity of optical low-cost particulate matter sensors // Atmospheric Measurement Techniques. – 2020. – Vol. 13. – P. 2413–2423. – DOI: 10.5194/amt-13-2413-2020.
139. Longley P.A., Goodchild M.F., Maguire D.J., Rhind D.W. Geographic Information Science and Systems. – 4th ed. – Hoboken : Wiley, 2015.
140. Muller R.A., Jackson A.L. Estimates of climatic air quality potential at Shreveport, Louisiana // Journal of Climate and Applied Meteorology. – 1985. – Vol. 24. – № 4. – P. 293–301.

141. PMS5003 Series Data Manual. Digital Universal Particle Concentration Sensor. – Beijing: Plantower, 2016. – Version 2.3.
142. Quality assurance in urban air quality monitoring. GEMS/AIR Methodology Review Handbook Series. Vol. 1. – Geneva: WHO, 1994. – WHO/EOS/94.1.
143. The Global Health Cost of PM2,5 Air Pollution: A Case for Action Beyond 2021. – Washington, DC: World Bank, 2022. – 88 p.
144. The Preparatory Survey Report on the Project for Improvement of Equipment for Road Maintenance in Sughd Region and the Eastern Part of Khatlon Region in the Republic of Tajikistan. – Japan International Cooperation Agency; Katahira & Engineers International. – 2016. – Table 1.2-1: Temperature and Precipitation in Khujand.
145. Tryner J., L'Orange C., Mehaffy J., Miller-Lionberg D., Hofstetter J.C., Wilson A., Volckens J. Laboratory evaluation of low-cost PurpleAir PM monitors and in-field correction using co-located portable filter samplers // Atmospheric Environment. – 2020. – Vol. 220. – Article 117067. – DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.117067.
146. Turner D.B. Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates. – Revised edition. – Research Triangle Park, NC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Programs, 1970.
147. U.S. Environmental Protection Agency. User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model (AERMOD). – Research Triangle Park, NC : U.S. EPA, 2026. – EPA-454/B-26-001.
148. United States Environmental Protection Agency. – URL: http://www.epa.gov/ (дата обращения: 30.05.2024).
149. Updated Handbook for the 1979 Convention on Long-range Transboundary Air Pollution and its Protocols. – United Nations Economic Commission for Europe. – New York; Geneva, 2015.
150. Updated Nationally Determined Contribution of the Republic of Tajikistan. – Dushanbe, 2021.

151. Wexler H. Роль метеорологических факторов в загрязнении атмосферного воздуха. – 2009. – URL: https://www.saveplanet.su/articles_4.html (дата обращения: 23.07.2024).
152. 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).
153. Wilks D.S. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. – 4th ed. – Amsterdam : Elsevier, 2019.
154. Windy: interactive weather forecasting services. – URL: https://www.windy.com/ (дата обращения: 22.02.2025).
155. World Air Quality Index project. – URL: https://aqicn.org/ (дата обращения: 22.02.2025).
156. World Bank Group. Tajikistan Country Climate and Development Report. – Washington, DC : World Bank, 2024. – DOI: 10.1596/42270.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ

КУМИТАИ ҲИФЗИ МУҲИТИ ЗИСТИ НАЗДИ ҲУКУМАТИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН
АГЕНТИИ ОБУҲАВОШИНОСӢ МАРКАЗИ ОБУҲАВОСАНҶИИ ВИЛОЯТИ СУҒД

734025, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, кучаи Бобочон Ғафуров 373,
тел: (+992 37) 227-89-71, факс: (+992 37) 223-18-21, web: http://www.meteo.tj
735750, Ҷумҳурии Тоҷикистон вилояти Суғд.шахри.Гулистон: кучаи Истеклол 94

№ 11/6 03. 07 2024 сол.

№ 8/6 18. 06. 2024 сол.

СПРАВКА

Гидрометеорологический центр Согдийской области настоящим подтверждает, что результаты мониторинга качества воздуха соискателя Мамадова Икромжона Ахмадалиевича, выполненные в рамках научно-исследовательской деятельности по определению влияния климатических факторов на формирование воздушной среды города Худжанда используются для улучшения систем мониторинга и создания базы данных о качестве атмосферного воздуха. Отмечаем, что данные, собранные по качеству воздуха в городе Худжанде, и математическое моделирование процесса загрязнения воздуха, изложенные в диссертационном материале «Формирование воздушной среды города Худжанда Республики Таджикистан по основным сезонным показателям и условиям жизнедеятельности», в дальнейшем помогут в улучшении систем мониторинга и прогнозирования.

Директор Гидрометеорологического
Центра Согдийской области МАРКАЗИ ОБУҲАВОСАНҶИИ СУҒД Хамитов. А.Ш