

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

<sup>1</sup>Р.О. Азизов, <sup>2</sup>И.А. Мамадов

<sup>1</sup>Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими

<sup>2</sup>ОО «Молодежная группа по защите окружающей среды»

Целью данной работы является анализ применимости математических моделей для оценки степени загрязнения атмосферного воздуха с учётом метеорологических и географических условий местности. В статье систематизирован международный опыт и накопленный опыт таджикских ученых по мониторингу и исследованию аэрозолей. Проведен обзор и сравнительный анализ математических моделей. На примере города Худжанда показано, что для оценки ситуации степени загрязнения необходимо учитывать совокупность промышленных, транспортных, бытовых и природных, в том числе пылевых источников. В качестве итоговой методологии обоснован поэтапный подход, начиная с создания кадастра выбросов и завершая валидацией математических моделей для последующего прогнозирования.

**Ключевые слова:** загрязнение атмосферного воздуха, математическое моделирование, качество воздуха, PM<sub>2.5</sub>, источники загрязнения, CFD, экологический мониторинг.

## МОДЕЛСОЗИИ МАТЕМАТИКИИ РАВАНДИ ИФЛОСШАВИИ ҲАВОИ АТМОСФЕРӢ

Р.О.,Азизов, И.А. Мамадов

Мақсади кори мазкур таҳлили имконияти истифодаи моделҳои математикӣ барои баҳодихии дараҷаи ифлосшавии ҳавои атмосферӣ бо назардошти шароити метеорологӣ ва ҷуғрофӣ маҳал мебошад. Дар мақола таҷрибаи байналмилалӣ ва таҷрибаи андӯхтаи олимони тоҷик оид ба мониторинг ва таҳқиқи аэрозоли мураттаб гардонида шудааст. Шарҳ ва таҳлили муқоисавии моделҳои математикӣ гузаронида шуд. Дар мисоли шаҳри Хучанд нишон дода шудааст, ки барои баҳодихии вазъияти дараҷаи ифлосшавӣ ба инобат гирифтани маҷмуи манбаъҳои саноатӣ, нақлиётӣ, маишӣ ва табиӣ, аз ҷумла ҷангу ғубор зарур аст. Ҳамчун методологияи ниҳой муносибати марҳилавӣ асоснок карда шудааст, ки аз таҳияи кадастри партовҳо оғоз ёфта, бо валидатсияи (санҷиши) моделҳои математикӣ барои пешгӯии минбаъда анҷом меёбад.

**Калидвожаҳо:** ифлосшавии ҳавои атмосферӣ, моделсозии математикӣ, сифати ҳаво, PM<sub>2.5</sub>, манбаъҳои ифлосшавӣ, CFD, мониторинги экологӣ.

## MATHEMATICAL MODELING OF THE ATMOSPHERIC AIR POLLUTION PROCESS

R.O. Azizov, I.A. Mamadov

The aim of this work is to analyze the applicability of mathematical models for assessing the degree of atmospheric air pollution, considering the meteorological and geographical conditions of the area. The article systematizes international experience and the accumulated experience of Tajik scientists in monitoring and researching aerosols. A review and comparative analysis of mathematical models have been conducted. Using the city of Khujand as an example, it is shown that to assess the pollution situation, it is necessary to consider the aggregate of industrial, transport, residential, and natural sources, including dust. A phased approach is substantiated as the final methodology, starting with the creation of an emissions inventory and concluding with the validation of mathematical models for subsequent forecasting.

**Keywords:** atmospheric air pollution, mathematical modeling, air quality, PM<sub>2.5</sub>, pollution sources, CFD, environmental monitoring.

### Введения

Загрязнение атмосферного воздуха является одной из наиболее острых глобальных проблем XXI века, оказывающей прямое негативное воздействие на здоровье населения, состояние экосистем и климатические изменения. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), около 99% населения мира дышит воздухом, уровень загрязнения которого превышает рекомендованные пределы, что ежегодно приводит к миллионам преждевременных смертей [1]. Особую опасность представляют мелкодисперсные твердые частицы (PM<sub>2.5</sub>), способные проникать глубоко в респираторную систему человека и вызывать сердечно-сосудистые и легочные заболевания.

Республика Таджикистан, как и другие страны Центральной Азии, сталкивается с серьезными вызовами в области качества воздуха. Город Худжанд, являясь вторым по величине городом страны и крупным промышленным и транспортным узлом Согдийской области, испытывает значительную антропогенную нагрузку. Рост промышленного производства, увеличение числа автотранспортных средств и высокая плотность населения усугубляются сложными географическими и метеорологическими условиями [2]. Расположение города в межгорной котловине способствует застою воздушных масс, что в периоды неблагоприятных метеорологических условий (НМУ) приводит к накоплению загрязняющих веществ у поверхности земли.

В данных условиях традиционные методы мониторинга качества воздуха, основанные на стационарных постах наблюдения, являются необходимыми, но недостаточными. Они предоставляют точные данные, но лишь в нескольких точках, не давая полной пространственной картины загрязнения.

Учитывая сложный рельеф и высокую стоимость развертывания плотной сети мониторинга с эталонными показателями, математическое моделирование становится потенциально доступным инструментом для анализа и прогнозирования [3].

Математическая модель позволяет с научной точки зрения описать процессы переноса и рассеивания примесей в атмосфере, выявить вклад отдельных источников, прогнозировать уровни загрязнения и, что наиболее важно, оценивать эффективность планируемых природоохранных мероприятий.

Целью данной работы является анализ существующих подходов к математическому моделированию загрязнения атмосферы, оценка их применимости к условиям г. Худжанд и разработка концептуальной основы для внедрения системы моделирования, интегрирующей международный опыт и научные наработки ученых.

**Основные источники выбросов.** Во всех рассмотренных системах математического моделирования отмечается необходимость предварительной классификации источников выбросов. На примере территории г. Худжанд и его агломерации можно выделить четыре основные категории.

**Стационарные источники.** К ним относятся промышленные предприятия, которые занимаются производством строительных материалов, металлургическая, химическая, пищевая промышленность, а также объекты энергетики, включая ТЭЦ и котельные. Они характеризуются организованными выбросами через дымовые трубы, что делает их основными кандидатами для моделирования [4]. В этом ключе основными загрязнителями выступают диоксид серы (SO<sub>2</sub>), оксиды азота (NO<sub>x</sub>), оксид углерода (CO), твердые частицы (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) и специфические загрязнители (тяжелые металлы, летучие органические соединения (ЛОС)).

**Мобильные источники.** Автотранспорт является одним из доминирующих мобильных источников загрязнения атмосферного воздуха в жилых районах. Выбросы производятся на уровне земли, которые можно отнести к линейным и неорганизованным источникам, что требует отдельных подходов к моделированию [5]. Вклад автотранспорта в выбросы NO<sub>x</sub>, CO, ЛОС и PM<sub>2.5</sub> является критическим, особенно в часы пик.

**Бытовые источники.** Эта категория включает неорганизованные выбросы от частного сектора, в первую очередь, сжигание угля, дров и биомассы для отопления и приготовления пищи в холодный период. Как показывают исследования для Центральной Азии, этот сектор вносит один из наибольших вкладов в зимние концентрации PM<sub>2.5</sub> [4].

**Естественные или природные источники.** Для Республики Таджикистан и всей Центральной Азии характерен высокий вклад природных источников, в первую очередь пыльных и песчаных бурь [5, 6]. Эти события приводят к резкому и масштабному повышению концентраций PM<sub>10</sub> и PM<sub>2.5</sub>.

Контекст качества воздуха в Таджикистане характеризуется двумя основными вызовами: острой нехваткой достоверных данных на национальном уровне и устойчиво высокими уровнями загрязнения, фиксируемыми в зонах мониторинга. Регулярно обновляемые данные непосредственно по г. Худжанд в открытом доступе ограничены, однако это ограничение подтверждает критическую необходимость внедрения математического моделирования для получения полной пространственной картины загрязнения. Общая ситуация по стране также свидетельствует о настоятельной необходимости развития и расширения существующих систем мониторинга качества воздуха.

Международные статистические данные подтверждают эти опасения, демонстрируя устойчивое обострение проблемы загрязнения воздуха. В частности, в отчете "World Air Quality Report" за 2023 год среднегодовая концентрация PM<sub>2.5</sub> в Таджикистане составила 31.7 мкг/м<sup>3</sup>. Однако, согласно данным того же отчета за 2024 год, ситуация значительно ухудшилась: средняя концентрация PM<sub>2.5</sub> возросла до 46.3 мкг/м<sup>3</sup>. Этот показатель вывел Таджикистан на 6-е место в мировом рейтинге наиболее загрязненных стран. Такая концентрация является высокой, поскольку она превышает среднегодовую рекомендацию Всемирной организации здравоохранения, установленную на уровне 5 мкг/м<sup>3</sup>, уже в 7–10 раз [7].

Отдельные исследования, проведенные в столице, подтверждают эту негативную тенденцию. В отчете Всемирного банка по Душанбе отмечается, что анализ данных за длительный период выявил устойчивый рост концентраций PM<sub>2.5</sub>, наблюдавшийся в течение последних 20 лет [4].

Этот же отчет приводит предварительную экспертную оценку источников для Душанбе, которая крайне важна для понимания общей структуры выбросов в городских агломерациях страны. Согласно этим оценкам, наибольший вклад в загрязнение PM<sub>2.5</sub> вносят не только промышленные объекты, но и пыль, переносимая ветром (33%) и отопление индивидуальных жилых домов (31%). За ними с меньшим, но все же значимым вкладом следуют сектор энергетики (9%) и выбросы от автотранспорта (3%).

Важно отметить, что приведенные данные по городу Душанбе имеют высокую релевантность и для Худжанда. Они недвусмысленно подчеркивают, что любая реалистичная и корректная модель для города должна быть комплексной. Она не может ограничиваться только выбросами от транспорта и промышленности, но должна быть способна интегрировать и учитывать значительный вклад как природных, так и бытовых источников.

### Обзор математических моделей по загрязнению атмосферного воздуха

Математическая модель представляет собой абстракцию реального процесса, выраженную через системы уравнений. Основная цель такого представления заключается в получении инструмента для анализа, описания и прогнозирования поведения исследуемой системы. Модели, применяемые для оценки качества воздуха, по своей сути являются именно такими системами уравнений. Они описывают сложную динамику загрязнителей в атмосфере, включая их физический перенос, турбулентное рассеивание, химические реакции и процессы осаждения [3]. Математические модели переноса примесей в атмосфере являются ключевым инструментом для понимания и прогнозирования качества воздуха. Выбор модели зависит от масштаба задачи, характеристик источников, доступности данных и требуемой точности.

**Гауссовы модели рассеивания.** Эти модели, как описано ранее в материалах [3, 8], являются фундаментальным подходом, особенно для оценки воздействия отдельных стационарных источников в условиях относительно стабильной атмосферы и открытой местности. Они основаны на аналитическом решении уравнения конвекции-диффузии при ряде упрощающих допущений, включая стационарные метеоусловия, однородный ветер, отсутствие химических реакций, полное отражение от поверхности и др.

Модель «Стационарный факел» (рис.1.) описывает концентрацию от непрерывного источника (например, заводской трубы) в установившемся режиме (концентрация не зависит от времени). Это основная модель, используемая в нормативных документах, таких как ОНД-86 [8].

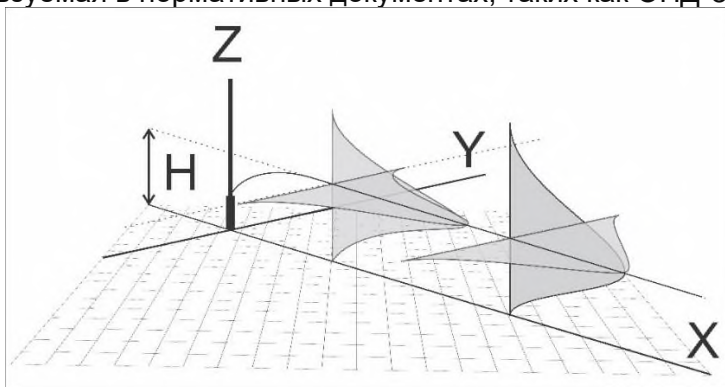


Рисунок 1 – Механизм действия модели рассеивания загрязнителей в воздухе (Gaussian Plume).

Основное уравнение для расчета концентрации  $C$  (в  $\text{мг}/\text{м}^3$ ) в точке  $(x, y, z)$  от источника с эффективной высотой  $H$  и мощностью выброса  $Q$  (в  $\text{мг}/\text{с}$ ) при скорости ветра  $u$  (в  $\text{м}/\text{с}$ ) имеет вид [3, 8]:

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

где  $x, y, z$  – координаты точки (ось  $x$  направлена по ветру),  $\sigma_y, \sigma_z$  – коэффициенты рассеивания в горизонтальном и вертикальном направлениях. Они не являются константами, а зависят от расстояния  $x$  и класса устойчивости атмосферы.  $\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right)$  описывает отражение примеси от поверхности земли.

Модель «Импульсный выброс» (Gaussian Puff) в отличие от "Plume", описывает одноразовый, мгновенный выброс массы  $Q$  (в  $\text{мг}$ ). Концентрация в этом случае зависит от времени  $t$ , так как «облако» выбросов движется и рассеивается. Эта модель используется для моделирования аварийных или разовых выбросов [3]

$$C_{puff}(x, y, z, t) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{(x-ut)^2}{2\sigma_x^2}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)$$

Гауссовы модели, несмотря на свою простоту, обладают рядом существенных преимуществ, благодаря которым они остаются базовым инструментом в нормативных расчетах. К ним относятся их относительная простота реализации, низкие вычислительные затраты и хорошая изученность

методологии. Однако эти модели имеют серьезные ограничения, особенно применительно к сложным условиям, характерным для г. Худжанд. В частности, они неприменимы в случаях штиля (когда скорость ветра  $u$  приближается к нулю), плохо учитывают сложный рельеф, нестационарные метеоусловия (изменение ветра во времени) и химические превращения загрязняющих веществ.

**Лагранжевы модели (Lagrangian Models)** используют принципиально иной подход: они не направлены на решение уравнений на стационарной сетке, а базируются на отслеживании траекторий большого числа виртуальных «частиц» или «облаков» загрязнителей в изменяющемся поле ветра. Концентрация в любой точке определяется количеством частиц, прошедших через заданный объем. Примерами таких систем являются HYSPLIT [9] и CALPUFF [10]. Сравнение систем приведено на рис. 2. Главные преимущества такого подхода заключаются в его способности значительно лучше справляться с нестационарными метеоусловиями, штилями и, что критично для условий Худжанда, со сложным рельефом [10]; так, модель CALPUFF специально разработана для учета влияния гор и долин на воздушные потоки. Основным ограничением, однако, является то, что эти модели более требовательны к вычислительным ресурсам и качеству входных метеоданных, чем их гауссовы аналоги.

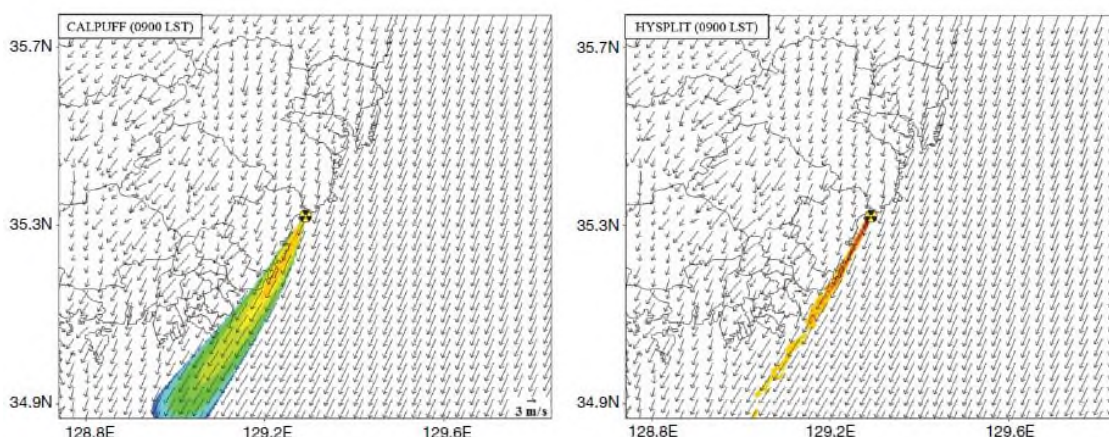


Рисунок 2 – Визуальное сравнение систем/моделей CALPUFF и HYSPLIT

Модели CALPUFF и HYSPLIT относятся к классу нестационарных моделей переноса загрязняющих примесей, однако их методологические основы различаются и это определяет характер получаемых полей концентраций. CALPUFF реализует подход эволюции облаков выброса в лагранжевой постановке типа «puff», что приводит к более сглаженным и пространственно протяженным шлейфам с относительно меньшими локальными максимумами концентраций и делает модель удобной для оценки общей площади воздействия источника при сложной метеорологии и орографии. HYSPLIT использует лагранжевую схему отслеживания множества отдельных частиц, вследствие чего более чувствительна к мелкомасштабным особенностям ветрового поля и часто формирует более узкие шлейфы с более выраженными локальными пиками концентраций.

**Эйлеровы модели** представляют собой наиболее комплексный и физически полный класс систем, часто именуемый сеточными моделями или моделями фотохимического переноса (СТМ). Их механизм основан на дискретизации атмосферы в виде трехмерной вычислительной сетки. В каждой из этих ячеек численно решается полная система уравнений конвекции-диффузии, которая описывает все ключевые атмосферные процессы: горизонтальный и вертикальный перенос (адвекцию), турбулентное рассеивание (диффузию), химические реакции, процессы осаждения и эмиссии [3].

Ключевая ценность эйлеровых моделей заключается в их уникальной способности к моделированию сложных химических преобразований в атмосфере. Это единственный тип моделей, который позволяет описывать такие процессы, как образование приземного озона (O<sub>3</sub>) или формирование вторичных аэрозолей, значительной части PM<sub>2.5</sub>. Примеры таких систем включают Community Multiscale Air Quality (CMAQ), Comprehensive Air quality Model with extensions (CAMx), а также модель Weather Research and Forecasting coupled with Chemistry (WRF-Chem), где метеорологические и химические процессы решаются одновременно.

Несмотря на высокую точность и физическую полноту, внедрение эйлеровых моделей сопряжено с серьезными техническими и информационными ограничениями. Во-первых, они чрезвычайно ресурсоемки и требуют использования мощных вычислительных кластеров. Во-вторых, их достоверность критически зависима от качества детальных кадастров инвентаризаций выбросов по всем загрязняющим веществам и их химическим прекурсорам. Высокие требования к вычислительным

ресурсам и детальным входным данным часто ограничивают их применение на уровне локальных городских исследований.

**Модели вычислительной гидродинамики (CFD)** представляют собой высокодетализированный инструмент, предназначенный для микромасштабного анализа атмосферных процессов. В основе этого подхода лежит численное решение фундаментальных уравнений движения жидкости, что позволяет получить исчерпывающее описание динамики потоков воздуха и турбулентности с разрешением от сантиметров до метров. Столь высокая пространственная детализация необходима для точного моделирования аэродинамических эффектов, возникающих вокруг сложных физических препятствий, таких как отдельные здания, перекрестки или внутри «уличных каньонов».

Область применения CFD-моделей строго ограничена микромасштабным моделированием и, вследствие их вычислительной интенсивности, не распространяется на всю городскую территорию. Вместо глобального охвата они используются для уточнения локальных параметров рассеивания загрязняющих веществ в непосредственной близости от промышленных площадок. Результаты, полученные с помощью CFD, позволяют выявить специфические зоны застоя или усиленной турбулентности, что критически важно для коррекции и повышения точности расчетов.

**Опыт моделирования и исследований в Центральной Азии.** Внедрение эффективной системы математического моделирования загрязнения атмосферного воздуха в Худжанде должно осуществляться не изолированно, а с опорой на уже наработанный международный, региональный и национальный научный опыт. Анализ международной практики демонстрирует важность поэтапного подхода. Например, в Соединенных Штатах (Агентство EPA) и странах Европы для регуляторных расчетов воздействия отдельных источников используются апробированные модели гауссова, такие как AERMOD и лагранжева CALPUFF типов [10]. Для комплексного научного анализа и прогнозирования качества воздуха на национальном и региональном уровнях применяются более сложные системы, включая CMAQ и EMEP [3]. Этот опыт однозначно подтверждает целесообразность перехода от простых моделей к более сложным по мере роста доступности данных и вычислительных ресурсов.

На региональном уровне проблема качества воздуха в Центральной Азии в последние годы приобрела особую актуальность. В рамках международного сотрудничества была создана платформа «Air Quality for Central Asia» (AQCA), поддерживаемая Программой ООН по окружающей среде (ЮНЕП). Данная платформа объединяет ключевых региональных партнеров, в том числе и ОО «Молодежная группа по защите окружающей среды» (YGPE) из Таджикистана для совместного обсуждения и разработки методик мониторинга и прогнозирования таких значимых региональных явлений, как пыльные бури.

Проведенные научные исследования подчеркивают региональную специфику источников загрязнения. В работе Мадыковой Ж., выполненной с применением эйлеровой модели CAM-Chem, был выявлен контраст между странами Центральной Азии: если для северных государств (Казахстан, Кыргызстан) пиковые концентрации PM<sub>2.5</sub> преимущественно связаны с сезонным отоплением, то для Таджикистана и Узбекистана был зафиксирован значительный вклад, обусловленный пыльными бурями. Этот вывод критически важен, так как он требует обязательного учета природных источников в моделировании. Более того, для валидации этой глобальной климатической модели использовались данные AERONET-станции, расположенной в Душанбе [5], что подтверждает практическую возможность верификации моделей на основе местных данных.

Научное сообщество Таджикистана внесло весомый и фундаментальный вклад в изучение физики атмосферы и процессов формирования аэрозолей, которые являются основой для корректного моделирования. Ключевые работы по физике атмосферных аэрозолей в аридной зоне Таджикистана были выполнены в Физико-техническом институте им. С.У. Умарова (ФТИ) АН РТ. В монографиях и статьях Назарова Б.И., Абдуллаева С.Ф. и Маслова В.А. были детально исследованы структура, свойства и динамические процессы пылевых и аэрозолеобразующих примесей [6, 11]. Полученные результаты образуют фундаментальную базу, необходимую для точной параметризации вклада естественных пылевых источников в математические модели для региона.

Наряду с фундаментальными проводились и прикладные, локализованные исследования. Например, работы Рахматова М.Н. (ФТИ) и его коллег были сфокусированы на мониторинге тяжелых металлов в атмосферных аэрозолях и почвах непосредственно в северной части Таджикистана [12], предоставляя бесценные исходные данные для инвентаризации промышленных выбросов. Анализ уровня загрязнения от промышленных и мобильных источников в г. Душанбе, проведенный Муртазовым Ш.А. и Рязановым А.В., может быть использован для сравнительного анализа методик оценки выбросов. Что касается самого Худжанда, посвященные ему научные труды подтверждают значительный вклад твердых частиц (PM) и отмечают выраженную сезонную динамику: рост

концентраций зимой, связанный с отоплением и высокие летние значения, обусловленные застоем воздуха в межгорной котловине и антропогенной нагрузкой.

Обобщение международного, регионального и национального научного задела позволяет сформулировать ключевые требования к системе моделирования для промышленных городов. Для достижения высокой достоверности расчетов критически важно корректно параметризовать не только выбросы от промышленных источников ( $Q$ ) и стандартные метеоусловия ( $u$ ,  $H$ ), но и ряд специфических факторов. Модель должна опираться на точном учете вклада природных пылевых аэрозолей и интегрировать данные отчетов для эффективной оценки влияния бытового сектора (сжигание твердого топлива), который, как определено, вносит один из наибольших вкладов в загрязнение  $PM_{2.5}$ .

**Предлагаемый подход к моделированию для г. Худжанд.** Основываясь на критическом анализе существующих моделей и специфическом местном контексте (сложный рельеф, значительный вклад бытовых и природных источников), для внедрения эффективной системы математического моделирования в г. Худжанд предлагается использовать четкий поэтапный подход. Успешная реализация этой стратегии требует тщательной подготовки исходных данных.

Ключевым и наиболее трудоемким подготовительным этапом, без которого невозможно начать достоверное моделирование, является разработка детального кадастра выбросов [14]. Кадастр должен охватывать все категории источников:

Инвентаризация стационарных источников: необходимо собрать точные данные по всем крупным промышленным объектам. Это включает географические координаты, физические параметры выбросов (высота и диаметр труб -  $H$ ), температурные и объемные характеристики отходящих газов, а также мощность выбросов ( $Q$ ) по всем ключевым загрязнителям ( $PM$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $CO$ ).

Инвентаризация мобильных источников: требуется провести оценку транспортных потоков на ключевых магистралях города (интенсивность движения, состав автопарка) с последующим использованием специализированных моделей (например, COPERT) для создания детализированных карт линейных источников.

Инвентаризация площадных/бытовых источников: этот аспект критически важен для  $PM_{2.5}$  в холодный период [4]. Необходима оценка жилого фонда (площадь частного сектора), анализ используемого топлива (уголь, дрова) и определение средних объемов сжигания для формирования карты площадных выбросов.

Учет природных источников: для параметризации событий пыльных бурь требуется использование спутниковых данных и метеостанций [5].

В качестве методологической основы для работы могут быть использованы национальные отчеты Таджикистана по инвентаризации парниковых газов несмотря на то, что они не касаются загрязнителей атмосферного воздуха [14].

## Заключение

Математическое моделирование для определения степени загрязнения воздуха в условиях г. Худжанд признается безальтернативным научно обоснованным инструментом для эффективного управления качеством воздуха. В отличие от рутинного мониторинга, который лишь констатирует факт превышения допустимых концентраций, моделирование выходит за рамки простого наблюдения. Оно позволяет глубоко понять первопричины загрязнения, прогнозировать его динамику в различных метеорологических сценариях и, что самое главное, находить научно обоснованные пути решения и оценивать эффективность планируемых природоохранных мероприятий.

Предварительные расчеты, подтверждающие жизнеспособность гауссовых моделей, могут служить прочной отправной точкой для дальнейшей работы. Однако для достижения полноценного описания экологической ситуации в городах необходимо осуществить переход к более сложным системам, а именно к лагранжевым моделям. Этот переход обусловлен необходимостью учета сложного рельефа города, а также интеграции вклада всех типов источников, включая неорганизованные выбросы от бытового сектора и природные пылевые явления.

Успешная реализация этой комплексной стратегии требует немедленного начала ключевых подготовительных исследований. Первоочередным и наиболее значимым направлением является начало работ по созданию детальной инвентаризации (кадастра) источников выбросов г. Худжанд, поскольку отсутствие этой базовой информации выступает главным барьером и одновременно ключом к успешному моделированию. Не менее важен систематический сбор и архивация метеорологических данных в формате, который будет пригоден для использования в модельных расчетах. Наконец, необходимо инвестировать в развитие кадрового потенциала через подготовку местных специалистов, способных квалифицированно работать с современными моделями качества воздуха.

Таким образом, конечный успех проекта зависит от синергии нескольких составляющих: интеграции передового международного опыта, применения современных вычислительных моделей и,

что особенно важно, опоры на фундаментальные научные исследования, уже проведенные в Таджикистане по физике атмосферы и аэрозолям [15 – 17]. Создание такой эффективной и научно обоснованной системы управления качеством атмосферного воздуха в промышленно развитых городах напрямую обеспечит долгосрочные выгоды, выражающиеся в улучшении здоровья и общего качества жизни населения региона.

Рецензент: Бобоев Х.Б — к.т.н. и.о., доцента кафедры «Безопасности жизнедеятельности и экологии» ТПУ имени академика М.С. Осими

### Литература

1. World Health Organization (WHO). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide? Executive summary. – Geneva: WHO, 2022.
2. Некоторые экологические аспекты мониторинга атмосферного воздуха города Худжанда [Электронный ресурс] // CyberLeninka. – 2021. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nekotorye-ekologicheskie-aspekty-monitoringa-atmosfernogo-vozduha-goroda-hudzhand> (дата обращения: 10.11.2025).
3. Seinfeld, J.H. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change / J. H. Seinfeld, S. N. Pandis. – 3rd ed. – John Wiley & Sons, 2016.
4. Исследование по Управлению Качеством Воздуха в г. Душанбе: [отчет] / Всемирный банк. – 2023. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099081723150529416/pdf/P18001408270f40e80b900006bd7a098720.pdf> (дата обращения: 10.11.2025).
5. Madykova, J.A First Look at Air quality in Central Asia [Электронный ресурс] / J. Madykova // – ACOMNCAR, 2020. <https://www2.acomncar.ucar.edu/news/first-look-air-quality-central-asia> (дата обращения: 10.11.2025).
6. Назаров, Б.И. Исследования структуры и свойств пылевых и аэрозолеобразующих примесей в аридной зоне юго-восточных районов Центральной Азии. / Б.И. Назаров, Л.С. Ивлев, С.Ф. Абдуллаев // – Душанбе, 2015. – 482 с.
7. IQAir. World Air Quality Report 2023. – [Switzerland]: IQAir, 2024.
8. ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. - Гидрометеиздат, 1987.
9. Draxler, R.R. An overview of the HYSPLIT\_4 modeling system for trajectories, dispersion, and deposition / R.R. Draxler, G.D. Hess // Australian Meteorological Magazine. – 1998. – Vol. 47, № 4. – P. 295–308.
10. Scire, J.S. A User’s Guide for the CALPUFF Dispersion Model (Version 5) / J. S. Scire, D. G. Strimaitis, R. J. Yamartino. – Earth Tech, Inc., 2000.
11. Назаров, Б.И. Динамические процессы при пылевых вторжениях в Центральной Азии / Б.И. Назаров, С.Ф. Абдуллаев, В.А. Маслов. – Душанбе, 2016. – 362 с.
12. Рахматов, М.Н. Мониторинг тяжелых металлов в атмосферном аэрозоле и почвах северного Таджикистана / М.Н. Рахматов, В.А. Маслов, С.Ф. Абдуллаев // – Душанбе, 2019.
13. Рязанов, А.В. Анализ уровня загрязненности атмосферы в г. Душанбе Республики Таджикистан [Электронный ресурс] / А.В. Рязанов, Ш.А. Муртазов // CyberLeninka. – 2017. <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-urovnya-zagryaznennosti-atmosfery-v-g-dushanbe-respubliki-tadzhikistan> (дата обращения: 10.11.2025).
14. Доклад о национальной инвентаризации парниковых газов [Электронный ресурс] / РКИК ООН (UNFCCC). – 2024. [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/NID\\_TJK.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/NID_TJK.pdf) (дата обращения: 10.11.2025).
15. Азизов, Р.О. Влияние качества атмосферного воздуха на изменение климата региона / Р.О. Азизов, И.А. Мамадов, Д.Д. Ходжибаев // Научные труды ИА РТ. – 2021.
16. Джурахонзода, Р. Оценка загрязнения тяжёлыми металлами в зависимости от географического расположения в Таджикистане / Р. Джурахонзода // Политехнический вестник. Серия: Техника и общество. – 2025. – № 4(12). – С. 26-29. – DOI 10.65599/VTDD9089. – EDN IPXALB.
17. Анализ экологической безопасности и воздействия автотранспорта на окружающую среду Республики Таджикистан / Р. А. Давлатшоев, М. К. Бутаев, Б. Ж. Маджидов, Ф. Джобиров // Политехнический вестник. Серия: Техника и общество. – 2025. – № 4(12). – С. 21-25. – DOI 10.65599/TUYY7674. – EDN YBVSBA.

### МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ-INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Азизов Рустам Очидлиевич д.и.т., профессор	Азизов Рустам Очидлиевич д.т.н., профессор	Azizov Rustam Ochilidievich Doctor of Technical Sciences, Professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi,
E-mail: <a href="mailto:rustam.azizov57@gmail.com">rustam.azizov57@gmail.com</a>		
TJ	RU	EN
Мамадов Икромҷон Ахмадалиевич директор	Мамадов Икромжон Ахмадалиевич директор	Mamadov Ikromjon Ahmadalievich director
Ташкилоти Чамбиятии «Гуруҳи ҷавонон оид ба ҳифзи муҳити атроф»	Общественная организация «Молодежная Группа по защите Оркружающей Среды»	Public organization “Youth Group on Protection of Environment”
E-mail: <a href="mailto:ikrom.mamadov@gmail.com">ikrom.mamadov@gmail.com</a>		