В диссертационный совет 6D.KOA-091
при Таджикском техническом
университете имени академика М.С.Осими

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, первого заместителя директора Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности Национальной академии наук Таджикистана **Ахмадзода Матина Зафара** на диссертацию **Хакдодова Акбарджона Махмадшарифовича** на тему **«Совершенствование системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха в условиях города Душанбе»**, представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.9.6. Экология.

1. Соответствие темы и содержания диссертации паспорту научной специальности. Тема и содержание диссертационной работы соответствуют специальности 2.9.6. Экология. Содержание диссертации соответствует пунктам 3.8, 3.9, 4.3 и 4.8 паспорта научной специальности 2.9.6. Экология:

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

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

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

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

Предмет исследования – методы, модели и информационно-технологические решения совершенствования системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха – непосредственно отвечает пунктам паспорта, посвящённым разработке и совершенствованию систем экологического мониторинга и контроля, научным основам управления антропогенным воздействием на основе информационных систем, принципам системного экологического мониторинга и аналитического контроля, а также применению информационных технологий как инструмента достижения экологической и экономической эффективности.

Наименование работы, поставленные цель и задачи, а также полученные результаты образуют единое целое и не выходят за рамки заявленной специальности.

2. Актуальность темы исследования. Актуальность темы не вызывает сомнений и рассматривается автором в тесной связи с задачами обеспечения экологической безопасности населения. Загрязнение атмосферного воздуха отнесено Всемирной организацией здравоохранения к числу наиболее серьёзных экологических угроз, а ведущим загрязнителем воздушного бассейна города Душанбе выступают мелкодисперсные частицы PM2.5.

Расположение города в межгорной котловине, преобладание слабых ветров и температурные инверсии холодного периода создают неблагоприятные условия рассеивания примесей и обусловливают эпизоды экстремального роста концентраций. Действующая система наблюдений, опирающаяся на ограниченное число стационарных постов и периодическую обработку данных, не обеспечивает требуемой пространственно-временной детализации и оперативности оценки.

В этих условиях переход к непрерывному автоматизированному мониторингу приобретает характер приоритетной задачи природоохранного управления. Значимость работы усиливается её соответствием Государственной экологической программе Республики Таджикистан на 2023–2028 годы и государственным приоритетам развития цифровой экономики и инноваций.

3. Степень новизны результатов диссертации и выносимых на защиту научных положений. Научная новизна исследования является достаточной для кандидатской диссертации. К наиболее существенным новым результатам следует отнести: уточнение структуры современной системы экологического мониторинга как многоуровневого цифрового процесса, охватывающего сбор, верификацию, хранение, анализ, прогнозирование, контроль нормативных превышений и поддержку принятия решений; метрологически обоснованную оценку пригодности низкобюджетных оптических датчиков для измерения концентраций PM2.5 с построением калибровочной модели, учитывающей относительную влажность; разработку архитектуры автоматизированной информационной системы, отличающейся включением модулей сенсорного сбора данных, метеорологической информации, блокчейн-проверки достоверности, прогнозирования, контроля ПДК, смарт-контрактов и отчётности; а также алгоритм слияния данных разнородных источников с учётом коэффициентов качества и пространственно-временной релевантности и логику автоматизированного реагирования на превышение допустимых концентраций.

С позиции обеспечения экологической безопасности особую ценность представляет ориентация предложенных решений на достоверность и доказуемую целостность измерительной информации, а также на риск-ориентированную модель оценки состояния воздушной среды.

4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций. Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечиваются корректным применением научно обоснованных методов анализа и подтверждаются согласованностью теоретических положений с данными натурных наблюдений. Достоверность экспериментальной части опирается на результаты полевых измерений и статистическую обработку многолетнего временного ряда объёмом 2269 наблюдений с применением метода межквартильного размаха для выявления выбросов, автокорреляционного анализа, расширенного теста Дики–Фуллера и сезонной декомпозиции ряда. Оценка пригодности измерительного оборудования выполнена по признанным критериям Агентства по охране окружающей среды США, что

является методически корректным. Достоверность проектных решений подтверждается внутренней согласованностью функциональных модулей системы, соответствием разработанной архитектуры задачам мониторинга и возможностью практической реализации. Выводы логически следуют из результатов исследования, а сформулированные рекомендации носят конкретный характер и адресованы уполномоченным органам.

5. Объём и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, рекомендаций по практическому использованию результатов и списка использованной литературы. Общий объём составляет 161 страницу машинописного текста; работа содержит 55 рисунков и 30 таблиц, список литературы включает 210 наименований. Структура работы логична, последовательность изложения соответствует поставленным задачам.

Во введении обоснована актуальность темы, охарактеризована степень её научной разработанности, сформулированы цель и задачи, определены объект и предмет исследования, изложены научная новизна, положения, выносимые на защиту, теоретическая и практическая значимость, а также сведения о личном вкладе соискателя, апробации и публикациях.

В первой главе изложены теоретико-методические основы мониторинга качества атмосферного воздуха и выполнен анализ экологической обстановки города Душанбе.

в том числе: систематизированы методы и средства измерения концентраций загрязняющих веществ и обосновано, что для распределённых сетей наблюдения наиболее перспективны оптические датчики; проанализированы методики расчёта индексов качества воздуха; установлено, что ведущим загрязнителем воздушного бассейна города являются частицы PM2.5, а неблагоприятные условия рассеивания обусловлены орографией и метеорологическим режимом; выявлены существенные ограничения действующей системы мониторинга – недостаточная плотность наблюдательной сети, преимущественная ориентация на ПДК-модель оценки и отсутствие развитого прогностического блока.

Во второй главе представлены экспериментальные исследования и статистический анализ загрязнения атмосферного воздуха города Душанбе мелкодисперсными частицами PM2.5.

в том числе: обоснован выбор оптического датчика SPS30; экспериментально установлено, что наиболее достоверные результаты достигаются при среднечасовом усреднении данных ($R^2 = 0,86$; RMSE = 3,38 мкг/м³), а учёт относительной влажности в калибровочной модели дополнительно повышает точность ($R^2 = 0,88$; RMSE = 3,05 мкг/м³); выявлена выраженная суточная динамика концентраций в городской среде при более чем восьмикратном росте среднего уровня загрязнения в период пылевого вторжения; статистическим анализом ряда из 2269 наблюдений установлены стабильно высокий уровень загрязнения (среднее 120,9 мкг/м³), ненормальность и правосторонняя асимметрия распределения,

доминирующая роль сезонной компоненты и инерционный характер загрязнения.

В третьей главе разработаны архитектура и проектные решения автоматизированной информационной системы мониторинга качества атмосферного воздуха.

в том числе: предложена архитектура распределённой информационной системы мониторинга (РИСМКАВ), построенная на концепции киберфизической системы и объединяющая модули сбора данных, обработки и хранения, аналитики и прогнозирования, контроля и реагирования, а также взаимодействия с пользователями; разработано алгоритмическое обеспечение системы, включая ансамблевое прогнозирование, обнаружение аномалий и алгоритм слияния данных разнородных источников; обоснованы гибридная блокчейн-схема верификации данных, смарт-контракт реагирования на превышение ПДК и метод адаптивного построения маршрута беспилотных средств; на архитектуру получен малый патент Республики Таджикистан на изобретение.

Содержание заключения в полной мере отражает результаты работы и её научную новизну. Сформулированные выводы соответствуют поставленным задачам, а рекомендации по практическому использованию результатов имеют прикладную направленность.

6. Научное, практическое, экономическое и социальное значение диссертации. Научное значение работы заключается в уточнении понимания мониторинга как информационно-аналитического процесса, в котором измерение загрязняющих веществ является лишь одним из этапов более сложной системы экологической оценки, прогнозирования и поддержки решений; разработанная архитектура может служить методической основой для дальнейших исследований в области интеллектуального экологического мониторинга.

Практическое значение состоит в возможности применения результатов при совершенствовании системы мониторинга качества атмосферного воздуха города Душанбе и других городов со сходными природно-климатическими условиями; соответствующие рекомендации адресованы Комитету охраны окружающей среды при Правительстве Республики Таджикистан и Агентству по гидрометеорологии.

Экономическое значение определяется применением низкобюджетных сенсоров, позволяющих создавать распределённые сети наблюдения в условиях ограниченного финансирования. Социальное значение работы связано с защитой здоровья населения и обеспечением доступа граждан к достоверной информации о состоянии воздушной среды в режиме реального времени.

7. Публикация результатов исследования по теме диссертации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 7 научных работах, в том числе в 4 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Президенте Республики Таджикистан, и 3 публикациях в материалах международных и

республиканских научно-практических конференций; получен малый патент Республики Таджикистан на изобретение.

Результаты работы прошли апробацию на научных мероприятиях в городах Ташкент, Душанбе и Минск. Количество и уровень публикаций соответствуют требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а их содержание отражает основные положения работы.

8. Соответствие оформления диссертации установленным требованиям. Оформление диссертации в целом соответствует установленным требованиям. Работа написана научным языком, снабжена необходимым иллюстративным и табличным материалом, ссылки на источники оформлены единообразно.

Автореферат, составленный на основе диссертации, соответствует её содержанию и требованиям к оформлению, отражая основные результаты, выводы и положения, выносимые на защиту.

Несмотря на положительную оценку, выраженную в отзыве, в данной диссертации имеются отдельные замечания, среди которых можно выделить следующие:

1. Калибровочная модель для оптического датчика получена применительно к конкретному экземпляру сенсора SPS30 и определённому диапазону относительной влажности. В работе недостаточно раскрыты вопросы переносимости полученных калибровочных коэффициентов на другие экземпляры датчиков при массовом развёртывании сети, а также обоснование межповерочных интервалов и процедуры периодической поверки по референсным станциям.

2. Предложенная гибридная блокчейн-схема верификации повышает целостность и неизменяемость измерительных данных, однако в работе не приведена оценка вычислительной нагрузки и временных задержек процедур верификации применительно к режиму реального времени, что существенно для оперативного реагирования на превышения предельно допустимых концентраций.

3. Логика автоматизированного реагирования, предусматривающая инициирование полёта беспилотных средств по показателю риска, описана преимущественно на концептуальном уровне, т.е. недостаточно обоснованы пороговые значения показателя риска и не рассмотрены нормативно-правовые и эксплуатационные аспекты применения беспилотных летательных аппаратов над городской территорией.

Указанные замечания в целом не снижают теоретическое и практическое значение данной диссертации и не оказывают существенного влияния на общую положительную оценку содержания работы.

В целом диссертация **Хакдодова Акбарджона Махмадшарифовича** на тему **«Совершенствование системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха в условиях города Душанбе»,** представленная на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.9.6. Экология, является завершённой научно-квалификационной работой, выполнена на высоком научном уровне, соответствует требованиям Порядка присуждения учёных степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, **Хакдодов Акбарджон Махмадшарифович**, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент:

доктор технических наук, первый заместитель директора Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности Национальной академии наук Таджикистана — Ахмадзода М.З.

Подписи заверяю:
начальник отдела кадров, делопроизводства и контроля Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности Национальной академии наук Таджикистана — Шосафарова Ш.Г.

М.П.

Юридический адрес организации:
734025, г.Душанбе, р.Шохмансур,
проспект Рудаки 33
Тел.: (+992-37) 227 83 83
E-mail: info@cbrn.tj

«22» 10 2026 г.

В диссертационный совет 6D.KOA-091
при Таджикском техническом
университете имени академика М.С.Осими

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора философии (PhD), доцента, проректора по международным связям Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими **Джурахонзода Рауфа Джурахона** на диссертацию **Хакдодова Акбарджона Махмадшарифовича** на тему «**Совершенствование системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха в условиях города Душанбе**», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.9.6. Экология.

1. Соответствие темы и содержания диссертации паспорту научной специальности. Тема и содержание диссертационной работы соответствуют специальности 2.9.6. Экология. По части содержания диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.9.6. Экология:

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

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

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

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

Заявленная тема, объект и предмет исследования, а также полученные научно-технические результаты выдержаны в рамках указанной специальности.

2. Актуальность темы исследования. Тема исследования является актуальной и своевременной, что определяется как остротой экологической проблемы, так и общемировым вектором цифровой трансформации систем управления окружающей средой. Загрязнение воздушного бассейна города Душанбе мелкодисперсными частицами PM2.5 при неблагоприятных условиях рассеивания требует перехода от фрагментарных наблюдений к интеллектуальным автоматизированным системам, обеспечивающим непрерывный сбор, обработку, хранение, анализ, прогнозирование и визуализацию экологических данных. Предложенная автором концепция опирается на интеграцию технологий Индустрии 4.0 – Интернета вещей, распределённого реестра и машинного обучения – в единую модульную платформу, что соответствует современным мировым тенденциям построения систем «умного города» и государственным приоритетам Республики Таджикистан в области развития цифровой экономики и инноваций на период

2025–2030 годов. Тем самым работа имеет выраженную научно-практическую и интеграционную значимость.

3. Степень новизны результатов диссертации и выносимых на защиту научных положений. Научная новизна работы является достаточной и подтверждается наличием малого патента Республики Таджикистан на изобретение. Наиболее существенными с точки зрения информационно-технологического содержания представляются: разработанная архитектура распределённой информационной системы мониторинга (РИСМКАВ), построенная на концепции киберфизической системы и модульном принципе; предложенное алгоритмическое обеспечение, включающее ансамблевое прогнозирование на основе моделей Random Forest, Gradient Boosting и LSTM с адаптивными весами, алгоритм обнаружения аномалий по прогнозному доверительному интервалу и алгоритм слияния данных разнородных источников с учётом коэффициентов качества и пространственно-временной релевантности; обоснование гибридной блокчейн-схемы верификации данных и смарт-контракта автоматизированного реагирования; а также метрологически обоснованная возможность применения низкобюджетных оптических датчиков. Существенным элементом новизны является формализация системы средствами унифицированного языка моделирования, доведённая до уровня проектной документации.

4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций. Достоверность результатов обеспечивается опорой на признанные методы системной инженерии и анализа данных, а также внутренней согласованностью предложенных проектных решений. Функциональность системы формализована в виде четырёх взаимосвязанных бизнес-процессов, образующих замкнутый контур управления; выделены 20 функциональных и 7 нефункциональных требований и построена трассировочная таблица, связывающая требования с модулями и компонентами. Динамическая и объектная модели представлены диаграммами вариантов использования (9 акторов и 21 вариант использования), диаграммой классов (31 класс) и восемью диаграммами последовательности, а реализуемость архитектуры подтверждена комплектом из 13 интерактивных прототипов пользовательского интерфейса. Экспериментальная часть базируется на натурных измерениях и статистической обработке ряда из 2269 наблюдений с применением корректных методов оценки. Выводы и рекомендации обоснованы и логически вытекают из полученных результатов.

5. Объём и структура диссертации. Диссертация включает введение, три главы, заключение, рекомендации по практическому использованию результатов и список использованной литературы. Общий объём работы составляет 161 страницу машинописного текста, работа содержит 55 рисунков и 30 таблиц, список литературы насчитывает 210 наименований. Композиция работы соответствует логике решения поставленных задач: от анализа предметной области к экспериментальному обоснованию и далее к проектированию системы.

Во введении раскрыта актуальность темы, показана степень её научной разработанности, определены цель, задачи, объект и предмет исследования, изложены научная новизна, выносимые на защиту положения, теоретическая и практическая значимость, а также сведения о личном вкладе автора, апробации и публикациях по теме.

В первой главе рассмотрены теоретико-методические основы мониторинга качества атмосферного воздуха и проведён анализ экологической обстановки города Душанбе.

в том числе: систематизированы методы и средства измерения концентраций загрязняющих веществ; проанализированы методики расчёта индексов качества воздуха; охарактеризованы природно-климатические и антропогенные факторы формирования загрязнения; выполнен анализ действующей системы экологического мониторинга и выявлены её организационные, технические и информационно-аналитические ограничения, что послужило обоснованием необходимости перехода к комплексной цифровой системе.

Во второй главе представлены экспериментальные исследования и статистический анализ загрязнения атмосферного воздуха мелкодисперсными частицами PM2.5.

в том числе: обоснован выбор измерительного оборудования и оценена пригодность оптических датчиков типа SPS30; выполнены натурные измерения в различных природно-территориальных и метеорологических условиях; проведён статистический анализ многолетнего временного ряда, установивший высокий уровень загрязнения, ненормальность распределения, доминирующую роль сезонной компоненты и инерционный характер загрязнения, что создаёт методологическую основу для построения краткосрочных прогнозных моделей.

В третьей главе разработаны архитектура и проектные решения автоматизированной информационной системы мониторинга качества атмосферного воздуха, что составляет ядро полученных автором результатов.

в том числе: построена архитектурная модель распределённой системы (РИСМКАВ) на основе киберфизической концепции; предложено алгоритмическое обеспечение (прогнозирование, слияние данных, блокчейн-верификация, автоматизированное реагирование); разработаны функциональная модель (бизнес-процессы, требования, варианты использования), объектная и динамическая модели; выполнено прототипирование пользовательских интерфейсов и оценён ожидаемый эффект внедрения системы в условиях города Душанбе. Это обеспечивает переход от реактивного мониторинга к проактивному управлению экологической ситуацией.

Содержание заключения адекватно отражает содержание работы и её научную новизну: приведённые восемь выводов соответствуют поставленным задачам и полученным результатам, а рекомендации по практическому использованию имеют конкретный адресный характер, включая применение результатов в учебном процессе высших учебных заведений.

6. Научное, практическое, экономическое и социальное значение диссертации. Научное значение работы состоит в разработке методической и архитектурной основы интеллектуального экологического мониторинга, интегрирующей технологии Индустрии 4.0, и может быть использовано при дальнейших исследованиях цифровых платформ наблюдения за качеством воздуха и систем прогнозирования экологических рисков. Практическое значение определяется возможностью использования предложенной архитектуры и комплекта проектной документации при программной реализации городской автоматизированной системы мониторинга, создании городских экологических панелей и внедрении сенсорных сетей. Экономическая эффективность обеспечивается модульностью и масштабируемостью решения, а также применением недорогих измерительных средств. Социальное значение работы связано с повышением информированности населения о состоянии окружающей среды и укреплением инструментов принятия природоохранных решений. Отдельно следует отметить образовательную и международную значимость результатов, соответствующих мировой практике построения систем экологического мониторинга и способствующих научно-техническому сотрудничеству.

7. Публикация результатов исследования по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Президенте Республики Таджикистан, и 3 публикации в материалах международных и республиканских научно-практических конференций; на архитектуру системы получен малый патент Республики Таджикистан на изобретение. Результаты исследования апробированы на научных мероприятиях международного уровня, в том числе в Ташкенте, Душанбе и Минске. Объём и уровень публикаций, а также международная апробация полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук.

8. Соответствие оформления диссертации установленным требованиям. Оформление диссертации соответствует установленным требованиям. Работа изложена грамотным научным языком, структурирована и снабжена развитым графическим и табличным материалом, включающим диаграммы UML и прототипы интерфейсов; библиографические ссылки оформлены корректно. Автореферат, составленный на основе диссертации, полностью соответствует её содержанию и требованиям к оформлению.

Несмотря на положительную оценку, выраженную в отзыве, в данной диссертации имеются отдельные замечания, среди которых можно выделить следующие:

1. Ансамблевые прогнозные модели (Random Forest, Gradient Boosting, LSTM с адаптивными весами) предложены преимущественно на проектно-алгоритмическом уровне. Для более убедительного обоснования прогностических возможностей системы целесообразно было бы привести результаты обучения и валидации моделей на реальном временном ряду с

сопоставимыми метриками точности прогноза (MAE, RMSE) на горизонте 1–7 суток и сравнением с базовыми методами.

2. Сопоставление предложенной системы с зарубежными аналогами носит ограниченный характер. Работа выиграла бы от систематической сравнительной таблицы, позиционирующей РИСМКАВ относительно существующих мировых платформ мониторинга качества воздуха по функциональным и техническим показателям, что дополнительно подчеркнуло бы новизну и способствовало бы международной сопоставимости результатов.

3. Нефункциональные требования (масштабируемость, безопасность, производительность) сформулированы, но не в полной мере количественно обоснованы. Недостаточно раскрыты выбор конкретной блокчейн-платформы и программного стека реализации.

Указанные замечания в целом не снижают теоретическое и практическое значение данной диссертации и не оказывают существенного влияния на положительную оценку содержания работы.

В целом диссертация **Хакдодова Акбарджона Махмадшарифовича** на тему **«Совершенствование системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха в условиях города Душанбе»,** представленная на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.9.6. Экология, является завершённым и самостоятельным научным исследованием, выполнена на высоком научном уровне, соответствует требованиям Порядка присуждения учёных степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, **Хакдодов Акбарджон Махмадшарифович**, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент:

проректор по международным связям Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими, доктор философии (PhD) Джурахонзода Р.Дж.

Подписи заверяю:

начальник УКиСР Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими Кодирзода Н.Х.

М.П.

Юридический адрес организации:
734042, г. Душанбе, р. Шохмансур
проспект академиков Раджабовых 10
Тел.: (+992-37) 221-35-11
E-mail: info@ttu.tj

«23» 10 2026 г.