

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата географических наук Варенцова Александра Ивановича
на тему: «Перенос и осаждение аэрозолей различного происхождения
в городском пограничном слое по результатам численного
гидродинамического моделирования» по специальности
1.6.18. Науки об атмосфере и климате

Актуальность и общая характеристика работы.

Диссертация А.И. Варенцова посвящена разработке и применению численных методов для исследования переноса и осаждения аэрозольных частиц в сложной городской среде. Рассматриваемая задача находится на пересечении вычислительной гидродинамики, физики атмосферного пограничного слоя, стохастического моделирования и географического анализа городской морфологии.

Актуальность работы определяется необходимостью описывать качество воздуха на масштабах отдельных кварталов и уличных каньонов. Поля концентрации аэрозолей в городе формируются под совместным влиянием источников, турбулентного переноса, стратификации, геометрии зданий и взаимодействия частиц с поверхностями. Региональные химико-транспортные модели не разрешают эти процессы явно, а наблюдательные сети недостаточно плотны для восстановления непрерывного трехмерного поля примеси. Развитие физически обоснованных моделей высокого разрешения является необходимым условием как для понимания механизмов внутригородской изменчивости загрязнения, так и для последующего совершенствования расчетных технологий мониторинга и прогноза.

Особенно востребовано сочетание вихреразрешающей модели воздушного потока с лагранжевым описанием частиц. Такой подход позволяет исследовать траектории частиц с разными физическими характеристиками, учитывать их взаимодействие с поверхностями и

получать детальные поля концентрации и осаднения. Одновременно он предъявляет высокие требования к численной реализации, вычислительной эффективности и многоуровневой верификации. Поэтому диссертация имеет значение не только как исследование городской атмосферы, но и как работа по развитию вычислительного инструментария для прямых задач переноса примесей и перспективного перехода к обратным задачам.

Целью работы является системное исследование и количественная оценка влияния морфологии городской застройки и осаднения на перенос и распределение аэрозольных частиц с различными физическими свойствами на основе вихреразрешающего моделирования. В соответствии с целью поставлены четыре взаимосвязанные задачи: создание и верификация лагранжева модуля, подготовка ансамбля конфигураций городской застройки, анализ информативности классификации локальных климатических зон и количественная оценка роли осаднения на фасады. Цель работы достигнута, задачи решены, а выводы соответствуют представленным результатам.

В целом, работа демонстрирует достаточно высокий уровень владения современными методами математического и гидродинамического моделирования, умение скомбинировать их с актуальными подходами к географическому районированию городских территорий, значительный объем самостоятельно выполненных расчетов и зрелую интерпретацию результатов.

Диссертация изложена на 181 странице и состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 62 рисунка и 9 таблиц; список литературы включает 187 источников. Структура последовательна: от анализа существующих подходов и разработки вычислительного инструмента автор переходит к его верификации, затем к систематическим численным экспериментам и демонстрации возможностей модели на примере реальной городской застройки.

Оценка методологии и содержания диссертации.

Во **введении** представлены актуальность и степень разработанности темы, объект и предмет исследования, цель и задачи, методы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, защищаемые положения, личный вклад и сведения об апробации. Логическая связь между задачами, содержанием глав и защищаемыми положениями прослеживается на протяжении всей диссертации.

Первая глава содержит систематический обзор методов моделирования переноса примесей на разных пространственных масштабах. Сопоставлены эйлеров и лагранжев подходы, RANS- и LES-модели, гауссовы методы, модели уличных сетей и методы машинного обучения. Отдельно рассмотрены способы формального описания городской морфологии и классификация локальных климатических зон. Автор аргументированно показывает, что для поставленных задач необходим инструмент, одновременно разрешающий нестационарную структуру турбулентного течения, траектории частиц и сложную геометрию препятствий.

Обзор завершается анализом методов верификации и валидации. Правильно выделены разные уровни проверки: аналитические решения для идеализированных постановок, лабораторные и натурные данные, а также кросс-верификация с более детальной численной моделью. Важным итогом главы является формулировка конкретных дефицитов существующих исследований – ограниченной изученности ЛКЗ как предиктора дисперсии и недостатка количественных оценок вклада фасадного осаждения в локальный баланс аэрозоля.

Вторая глава является методическим ядром диссертации. В ней разработана лагранжева численная модель переноса и осаждения аэрозольных частиц. Описаны уравнения движения, силы сопротивления и гравитации, стохастические параметризации подсеточной турбулентности, схемы взаимодействия частиц с поверхностями, дискретизация и

алгоритмическая организация вычислений. Предусмотрены два способа представления геометрии разной сложности, что позволяет применять модель как в автономных тестах, так и в составе сеточного LES-комплекса.

Автор уделяет существенное внимание программной архитектуре и вычислительной оптимизации. Последовательно реализованы параллельные версии с использованием OpenMP, MPI и CUDA. Представленные тесты на суперкомпьютере «Ломоносов-2» показывают значительное ускорение расчетов при переходе от последовательной реализации к OpenMP-, MPI- и CUDA-версиям. Эти результаты имеют самостоятельную методическую ценность, поскольку основные серии экспериментов требуют расчета траекторий десятков миллионов частиц.

Модель поддерживает одновременный расчет нескольких типов частиц и непосредственный доступ к мгновенным трехмерным полям гидродинамических величин при интеграции в вихреразрешающий комплекс НИВЦ МГУ и ИВМ РАН. Тем самым разработан не отдельный расчетный сценарий, а расширяемый программный модуль с набором физических параметризаций, граничных условий и вариантов представления поверхности.

Система тестов модели построена последовательно. Выполнена верификация по аналитическим решениям для пограничного слоя, проверено влияние временного шага для отдельных стохастических схем, проведено сопоставление с натурными профилями пылевого аэрозоля и кросс-верификация по данным независимой LES-модели. Существенно, что автор не ограничивается демонстрацией совпадений, но выявляет границы применимости реализованных параметризаций и обсуждает физические причины различий. Это свидетельствует о корректной постановке вычислительного эксперимента и обоснованной интерпретации результатов.

В **третьей главе** разработанный модуль используется для исследования влияния городской морфологии. Автор формирует 48

конфигураций четырех типов ЛКЗ, включая регулярные, псевдослучайные и реальные московские участки. Для характеристики геометрии используются средняя высота и плотность застройки, индекс фронтальной площади, анизотропия, коэффициент вариации высот и спектральная энтропия. Такой набор позволяет количественно различать территории, близкие по средним параметрам, но существенно отличающиеся по внутренней пространственной организации.

С методической точки зрения достоинством является поэтапный анализ. Сначала исследуются поля ветра и турбулентности, затем пространственное распределение концентрации и интегральные показатели, после чего строятся статистические модели связи этих показателей с ЛКЗ и морфометрическими параметрами. Рассматриваются два типа источников – приповерхностный и фоновый, несколько типов частиц, а также нейтральный и слабоустойчивый режимы стратификации.

Полученные результаты имеют ясную физическую и статистическую интерпретацию. Для регулярной застройки главными оказываются направленные характеристики – ориентация каньонов относительно потока и фронтальная площадь. Для рандомизированных и реальных конфигураций возрастает роль изотропных параметров и типа ЛКЗ. Автор показывает, что классификация ЛКЗ наиболее информативна для фонового источника, а для локального источника должна дополняться характеристиками внутренней структуры застройки.

Регрессионный анализ проведён с учетом различной сложности моделей, используется скорректированный коэффициент детерминации. Автор явно отделяет качество описания исходной выборки от прогностического качества и осторожно трактует результаты для малых подвыборок. Важен и сам переход от детальных LES-полей к компактным статистическим зависимостям: он создаёт основу для построения параметризаций и упрощённых моделей, которые могут применяться в

задачах, где применение полноценного вихреразрешающего моделирования невозможно.

В четвертой главе выполнен параметрический анализ осаждения частиц на поверхности зданий. Варьируются вероятности поглощения на горизонтальных и вертикальных поверхностях, размеры и плотности частиц, анализируются поля концентрации и распределение бюджета осаждения. Получена нелинейная зависимость концентрации от вероятности осаждения на стенах. Показано, что вертикальные поверхности могут обеспечивать значительную и в отдельных конфигурациях доминирующую долю суммарного осаждения. Для рассмотренных мелкодисперсных частиц неопределенность граничного условия на стене оказывает на поле концентрации влияние, по масштабу сопоставимое с эффектом изменения физических характеристик частиц.

Завершает главу расчёт для реального жилого комплекса в городе Москва. Рассмотрены восемь направлений ветра и выполнено сопоставление с данными накопленных пылевых выпадений на двух стенах городского каньона на пяти высотах. Расчёты показывают высокую чувствительность результата к направлению набегающего потока и положению источника. Важным выводом является недостаточность простой комбинации климатической розы ветров с равномерным фоновым источником для восстановления наблюдаемой асимметрии. Это не только характеризует ограничения упрощенной постановки, но и указывает на перспективность адаптации разработанной модели к решению обратных задач для идентификации источников.

Научная новизна и значение результатов.

К основным новым результатам относятся:

1. Разработка, верификация и интеграция в вихреразрешающий гидродинамический программный комплекс лагранжевой модели, поддерживающей перенос, стохастическую подсеточную диффузию и

взаимодействие нескольких типов частиц с поверхностями сложной городской геометрии.

2. Количественное выявление смены доминирующих морфометрических факторов при переходе от регулярной к нерегулярной застройке.

3. Определение возможностей и ограничений классификации ЛКЗ как предиктора пространственных характеристик аэрозольного загрязнения и обоснование набора дополнительных направленных показателей.

4. Получение оценок вклада вертикальных фасадов в суммарное сухое осаждение и демонстрация высокой чувствительности полей концентрации к параметризации взаимодействия частиц со стенами.

Теоретическое значение диссертации состоит в развитии географических и физико-математических представлений о переносе аэрозоля в геометрически неоднородном городском пограничном слое. Предложенная система морфометрических предикторов связывает результаты детального гидродинамического моделирования с географической типизацией городской территории. В методическом отношении значим созданный модуль, его параллельная реализация и многоуровневая схема проверки.

Практическая значимость связана с возможностью использовать разработанный комплекс для анализа сценариев размещения источников, исследования вентиляции и самоочищения городских территорий, подготовки параметризаций для моделей меньшего разрешения и формирования обучающих выборок для статистических методов. Разработанная модель в перспективе может выступать оператором прогноза в обратных задачах определения параметров источников, а полученные LES-данные – основой для построения параметризаций.

Степень обоснованности положений, выносимых на защиту, научных выводов и рекомендаций.

Обоснованность положений, выносимых на защиту, научных выводов и рекомендаций определяется согласованностью постановки, методов и

результатов. Первое положение подтверждается серией аналитических, натурных и численных тестов. Второе и третье положения следуют из сопоставления конфигураций разной степени упорядоченности и статистического анализа 48 расчётных случаев. Четвертое положение подтверждается параметрическими экспериментами по осаждению и расчётом баланса частиц на горизонтальных и вертикальных поверхностях. Выводы сформулированы в пределах рассмотренных постановок, а рекомендации по применению модели и дальнейшему развитию исследований логически следуют из полученных результатов и обозначенных ограничений.

Достоверность научных результатов, выводов и рекомендаций.

Достоверность обеспечена использованием апробированной вихреразрешающей модели, физически обоснованных лагранжевых параметризаций, тестированием численной реализации и сопоставлением с несколькими типами независимых данных. Существенны большой объём вычислительных экспериментов, воспроизводимая система интегральных характеристик и корректное применение методов математической статистики. Результаты представлены подробно и позволяют проследить переход от постановок и визуализаций полей к обобщениям и выводам. Совокупность этих обстоятельств позволяет положительно оценить достоверность сформулированных научных выводов и рекомендаций.

Личный вклад соискателя.

Личный вклад соискателя несомненен и включает разработку физико-математической и программной реализации лагранжева модуля, его интеграцию и верификацию, создание конфигураций застройки и генератора псевдослучайной геометрии, разработку параллельных версий, планирование и проведение серий расчетов, статистическую обработку и интерпретацию результатов.

Результаты работы апробированы на научных мероприятиях и представлены в публикациях. В диссертации указано 4 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.6.18, и 12 тезисов конференций. Основные результаты докладывались на 12 всероссийских и международных конференциях, семинарах и школах.

Замечания и рекомендации.

1. При описании численной реализации (п. 2.4) отсутствуют теоретические оценки, обосновывающие выбор временного шага и необходимого количества частиц. Использовался ли адаптивный временной шаг? Если нет, то почему? Не очень понятно, как определяется «незначительная потеря точности» (стр. 52), которая позволила отказаться от более трудоемкой численной схемы. Что будет происходить с результатами экспериментов и, следовательно, выводами работы при изменении порядка количества частиц?

2. При обсуждении постановок численных экспериментов (п. 3.2) не хватает информации о требуемой памяти и полной вычислительной стоимости экспериментов, например в узло-часах на модельный час, вместе с числом частиц и размером сетки. Было бы полезно также явно указать долю гидродинамического LES (или аналогичного RANS) расчета.

3. Генератор псевдослучайных конфигураций («застроек») в Главе 3 также является важной частью вычислительной постановки. Для воспроизводимости было бы полезно привести его основные алгоритмические параметры.

4. Эксперимент для ЖК «Люблинский парк» в Главе 4 естественно подводит к постановке обратной задачи. В дальнейшем было бы интересно формализовать оператор наблюдений, связывающий рассчитанные поля с

данными локальных датчиков и накопленных выпадений, и использовать его для идентификации источников.

5. Для прикладных сценарных расчётов и градостроительного планирования была бы полезна итоговая сводная таблица по типам ЛКЗ, включающая долю фасадного осаждения, относительное изменение приповерхностной концентрации и характерную протяжённость шлейфа при основных сочетаниях параметров.

6. Перспективным продолжением работы представляется сопоставление безразмерных параметров вероятностей осаждения на горизонтальные и вертикальные поверхности с классами реальных фасадных и дорожных материалов на основе лабораторных или натурных данных.

7. Так как одним из основных результатов диссертации является разработка программного модуля, то было бы естественно, чтобы на него было получено свидетельство о регистрации программы. Генератор «застроек», вероятно, также заслуживает регистрации.

Заключение.

Вместе с тем указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.6.18. Науки об атмосфере и климате (по географическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1–2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Варенцов Александр Иванович заслуживает присуждения ученой степени кандидата географических наук по специальности 1.6.18. Науки об атмосфере и климате.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
заместитель директора ФГБУН Институт
вычислительной математики и математической
геофизики Сибирского отделения РАН

ПЕНЕНКО Алексей Владимирович —  «04» сентября 2026 г.

Контактные данные:

Тел.: +7(383)330-61-52, e-mail: aleks@ommgp.sccc.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена
диссертация: 05.13.18. Математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ

Адрес места работы:

630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, д. 6,
ФГБУН Институт вычислительной математики и математической геофизики
Сибирского отделения РАН

Тел.: +7(383)330-83-53, e-mail: contacts@sscc.ru

Подпись сотрудника ФГБУН Институт вычислительной математики и математической
геофизики Сибирского отделения РАН А.В. Пененко удостоверяю:

