

**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**

Работа Варенцова Александра Ивановича посвящена изучению переноса и осаждения аэрозолей в городском пограничном слое с использованием численного моделирования. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 181 страницу, текст изложен на 165 страницах, включая 62 рисунка и 9 таблиц.

Актуальность темы.

Исследования, нацеленные на воспроизведение детализированного описания процессов переноса и осаждения аэрозоля в сложной городской среде, бесспорно, актуальны из-за выбранного объекта изучения (аэрозоли) и использованного инструмента (вихреразрешающее моделирование с блоком лагранжева переноса). Верифицированные результаты эффективности исследований представляют научный интерес, в перспективе могут приобрести многоадресную практическую востребованность.

Исследованиям городского аэрозоля, его состава и изменчивости под влиянием различных факторов посвящено большое количество отечественных и зарубежных научных публикаций. Вместе с тем оценка влияния морфологии урбанистической застройки в городе с многообразием ее типов на перенос и осаждение аэрозольных частиц остается дискуссионной и слабо изученной. Именно поэтому выполненные автором наработки можно признать находящимися на первой линии решения большой высокотехнологичной научной задачи.

Оценка содержания диссертации.

Введение содержит описание актуальности, структуры работы, цели и задачи исследований, указана степень разработанности темы с перечислением разработчиков, внесших наибольший вклад в обсуждаемую проблему, отражены новизна, теоретическая и практическая значимость, личный вклад автора, приводятся защищаемые положения. Отражено, что имеющее в работе доминанту исследование влияния геометрии городской застройки на перенос аэрозолей проводилось на основе классификации локальных климатических зон (ЛКЗ) на базе вихреразрешающей модели

НИВЦ МГУ и ИВМ РАН с применением разработанной автором лагранжевой стохастической модели.

Глава 1 «Методы моделирования переноса и осаждения аэрозолей в городской среде». Представлен масштабный обзор методов моделирования переноса частиц, показаны различия лагранжева и эйлерова подходов. Подробно описаны особенности моделирования в идеализированной структуре и утверждается, что универсальным инструментом в городской морфологии, позволяющим преодолеть разрыв между идеализированными моделями и сложным реальным ландшафтом, является классификация локальных климатических зон (ЛКЗ). Вместе с тем применение ЛКЗ имеет ряд ограничений, т.к. требуются уточнения, какие масштабы и процессы контролируются ЛКЗ, а какие – локальными структурами застройки.

Автор, признавая перспективными подходы на основе машинного обучения, подчёркивает востребованность микромасштабных моделей вычислительной гидродинамики и превосходство вихреразрешающего моделирования (LES) над иными моделями, благодаря явному учету крупных нестационарных вихрей в городских условиях. Утверждается, что для микромасштабных исследований дисперсии аэрозолей в городской среде оптимальны инструменты, совмещающие лагранжевы переносы частиц.

В подразделе «Сухое осаждение аэрозолей в городской среде» подчеркивается, что ключевым процессом (помимо переноса течением и турбулентной диффузии), формирующим концентрации аэрозолей, является сухое осаждение частиц при их контакте с поверхностями в отсутствие осадков.

В последнем подразделе «Методология верификации и валидации моделей переноса» перечислены общепринятые подходы – сравнения с несколькими типами эталонных данных и кросс-верификация, примененная автором для проверки и взаимного сопоставления результатов различных стохастических параметризаций.

При том, что в Главе 1 представлен широкий и детальный обзор подходов и методов в области моделирования переноса и осаждения аэрозолей в городской среде с описанием специфических физических процессов, имеется ряд замечаний:

1. На мой взгляд, описанию различий лагранжева и эйлерова подходов уделено излишне много внимания.

2. Как бы ни была популярна классификация локальных климатических зон (ЛКЗ), по сути это классификация застройки и никак не климатическая. И, несмотря на авторитет имен разработчиков, диссертант, с учетом вывода о необходимости ее детализации, мог бы сформулировать

усовершенствованную классификацию типовой застройки, не содержащую термин «климатические», возможно, с показателем озеленения внутри типовой ЛКЗ как фактора сезонного влияния на содержание аэрозоля в городском воздухе.

Глава 2 «Модель лагранжева переноса частиц». В главе описывается разработанная модель лагранжева переноса частиц; подробно описаны физико-математические основы, реализованные в параметризации, численные схемы, архитектура программного комплекса для моделирования переноса и осаждения аэрозольных частиц.

Разработанный код интегрирован в вихреразрешающую модель НИВЦ МГУ и ИВМ РАН как отдельный программный модуль, предусматривающий прямой доступ лагранжева блока к мгновенным трёхмерным полям метеовеличин. Ключевой особенностью модуля является возможность одновременного моделирования переноса нескольких типов частиц в одном расчёте. Тщательнейшим образом проведено сравнение с аналитическими решениями для логарифмического пограничного слоя и течения Куэтта.

Валидация по данным натурных измерений представляет собой один из наиболее обоснованных способов оценки точности модели. Используя экспедиционные данные измерений пылевого и песчаного аэрозоля в Приаралье, представленные в монографии Семенова (2020 г.), проведены сравнения модельных профилей массовой концентрации частиц с эмпирическими, и, как показывают рисунки (2.10), использованные параметризации смогли корректно воспроизвести общую форму профиля концентрации.

Для более глубокой оценки работоспособности разработанной лагранжевой модели проведено сравнение с эталонной численной моделью – вихреразрешающей (LES) моделью ИВМ РАН. Кросс-верификация по данным вихреразрешающего моделирования подтвердила корректность физических основ модели и выявила границы применимости используемых стохастических подходов.

В завершении главы определены обусловленные принятыми допущениями границы применимости метода, к которым относятся отсутствие в модели описания коагуляции частиц, фазовых переходов и химических превращений, влажного осаждения и сальтации.

Глава 2 является одной из ключевых в диссертации и детально проработана, и есть лишь несколько вопросов, приведенных ниже:

1. Утверждая, что лагранжев блок предусматривает доступ к мгновенным трёхмерным полям метеовеличин, необходимо указать, модели

какого масштаба могут обеспечить входные метеорологические данные с необходимым разрешением

2. При моделировании рассматривались условия устойчивой и нейтральной стратификации, применим ли разработанный комплекс при термической неустойчивости? Имеются ли ограничения на диапазон температурной изменчивости, в частности, можно ли применить модельный комплекс для расчетов переноса аэрозоля в северных широтах при фоне 30–50 градусов ниже 0?

3. Часто употребляемое сочетание «перенос аэрозолей в городском воздухе» несет в себе завышенное ожидание и верно лишь отчасти, поскольку речь идет все-таки об ограниченной территории до несколько сотен метров в типовой городской застройке.

4. Сомнительно выражение «по данным натурных измерений в песчаных бурях». Как можно понять из текста, для валидации использовались вполне рядовые два эпизода полевых измерений.

5. Выражение "на лету", по-видимому, является понимаемым в среде модельеров сленгом, но требует расшифровки.

Глава 3 «Моделирование переноса аэрозолей в разных типах городской застройки на основе классификации ЛКЗ». Описаны постановочные условия и проанализированы результаты численных экспериментов для регулярных, рандомизированных и реальных конфигураций застройки по исследованию влияния городской морфологии на дисперсию аэрозолей, используя вихреразрешающую модель НИВЦ МГУ и ИВМ РАН со встроенным лагранжевым модулем переноса частиц.

Эксперименты проводились для пяти локаций в четырех локальных климатических зонах (ЛКЗ) на территории Москвы; объединённая выборка составила 48 конфигураций. В экспериментах с регулярной застройкой обнаружено, что изменчивость между конфигурациями одного типа ЛКЗ может превышать межклассовую изменчивость или быть сопоставимой с ней, но в рандомизированной застройке межклассовая изменчивость стабильно доминирует над внутриклассовой.

Для проверки необходимости учёта внутренней структуры застройки наряду с классификацией ЛКЗ построены линейные регрессионные модели, анализ которых дал основание сформулировать заключение: классификация ЛКЗ может служить предиктором в задачах переноса аэрозолей в городских районах, но для повышения точности описания полей концентрации её следует дополнять параметрами ориентации каньонов относительно ветра, анизотропии и пространственной хаотичности застройки.

При высоком уровне проработки материалов, к этой главе есть замечания:

1. Что понимается под термином «уличный» приповерхностный источник, и если при «фоновом» источнике аэрозоль – перемешанный по высоте, не является ли таковой следствием термической неустойчивости (если нет адвекции из удаленных районов)?

2. Каков вклад древесной и кустарниковой растительности внутри типовой зоны на перенос аэрозоля? Если в новостройках она еще незначительна, то степень озеленения в исторических городских районах, на мой взгляд, достаточно высокая (придомовые аллеи, небольшие скверики, густая крона многолетних деревьев до верхних этажей зданий).

Глава 4 «Моделирование процессов осаждения частиц». В главе исследуется роль процесса сухого осаждения частиц на поверхности зданий. Проведена серия численных экспериментов по установлению чувствительности полей концентрации к параметрам фасадного осаждения, проведен анализ распределения бюджета сухого осаждения по 4 базовым сценариям для частиц $PM_{2.5}$ в различных типах городской застройки, а также для ЛКЗ 4 с 36 типами частиц, используя для описания различных фасадных поверхностей вероятность осаждения от 0 до 100%.

Для демонстрации применимости разработанного модельного инструментария в условиях реальной застройки проведен численный эксперимент на примере жилого комплекса в Москве (Люблинский парк) Расчеты проводились в области размером $800 \times 800 \times 320$ м с разрешением $4 \times 4 \times 4$ м с вариациями направления ветра и типом термической стратификации. При анализе результатов расчетов принимались во внимание результаты натурных сезонных измерений количества частиц PM_{10} , представленные в работе Кошелевой (2024 г.), в которой указано, что количество осевшей пыли слабо зависит от высоты, но имеет сильную асимметрию между стенами каньона, характер которой меняется от сезона к сезону.

По-видимому, автор стремился с помощью вихреразрешающего моделирования воссоздать зафиксированный по факту характер осаждения аэрозоля. Удалось выявить, что модель адекватно описывает высокую асимметрию загрязнения между наветренными и подветренными фасадами, а также характерное отсутствие выраженного вертикального градиента плотности осаждения. Выявленная высокая чувствительность результатов к направлению ветра указывает на необходимость учёта детальной информации о локальных источниках для решения практических задач экологического мониторинга.

Как и в предыдущих главах, автор демонстрирует впечатляющую способность постановки сложных численных экспериментов, а высококачественные графические иллюстрации являются подспорьем для тщательнейшего анализа, вплоть до описания различий осаджений на боковых ребрах зданий. Важно отметить, что анализ численных экспериментов сопровождается осмыслением физических процессов переноса и осаждения аэрозоля.

Замечания к главе:

1. В утверждении, что на фасады приходится до 70% всех осаждённых частиц, корректно было бы указывать, что этот показатель относится к двум типам застройки – открытой многоэтажной (ЛКЗ 4) и плотной среднеэтажной застройке (ЛКЗ 2).

2. При анализе скорости затухания шлейфов анализировались частицы с аэродинамическим диаметром не более 5 мкм, но при их перечислении упоминается PM_{10} .

3. По каким причинам для модельных экспериментов на реальной застройке не был выбран район Москвы, где проводятся регулярные изменения приземных концентраций и PM_{10} , и $PM_{2.5}$ на сети московского мониторинга качества воздуха?

В **Заключении** диссертации приведены основные выводы исследования.

Кроме вышеназванных замечаний к главам, есть еще два замечания:

1. К числу достоинств работы относится внушительный список использованных литературных источников. Вместе с тем из 187 ссылок лишь 10 – это публикации российских ученых, хотя еще не менее 20 публикаций в списке – работы отечественных исследователей, опубликованные в иностранных изданиях. Является такое соотношение свидетельством малой востребованности решения задач по моделированию аэрозольного загрязнения в городских условиях?

2. Автор часто подчеркивает, что разработанный инструментарий может использоваться для мониторинга качества воздуха, но оно определяется не только аэрозольным содержанием. И насколько в городе (Москва), где в году около 180 дней с осадками, примерно 25 дней с туманами, целесообразны ресурсоемкие расчеты вклада осаждения частиц на зданиях? Может быть, эта задача близкого будущего?

Вместе с тем перечисленные замечания ничуть не умаляют значимости диссертационного исследования. Характерные для всей работы А.И. Варенцова способность и умение глубоко погружаться в решаемую задачу, осваивать и применять новейшие методы анализа, разрабатывать многоуровневые сценарии экспериментов, на самом высоком уровне графически представлять

результаты экспериментов свидетельствуют о зрелости автора как состоявшегося научного исследователя.

Результаты диссертации нашли отражение в докладах на 5 научных конференциях и 6 публикациях, в том числе в 4 работах в рецензируемых научных журналах, определенных в п. 2.3 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова.

Автореферат и публикации полностью отражают содержание диссертации и основные ее результаты.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, являются обоснованными, опирающимися на известные аналитические решения, а также находящиеся в соответствии с натурными измерениями аэрозоля.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы обеспечивается применением строгого физико-математического моделирования при описании процессов переноса и осаждения аэрозолей, верификацией разработанной лагранжевой модели по аналитическим решениям и данным натурных измерений, кросс-верификацией с независимой эталонной LES моделью. Сформулированные результаты основаны на корректной статистической обработке и анализе данных численных экспериментов.

Теоретическая и практическая значимость результатов.

Разработана и апробирована модель переноса и осаждения аэрозольных частиц, сопрягающая лагранжев подход с вихреразрешающей гидродинамической моделью пограничного слоя атмосферы, которая является готовым инструментом для решения задач экологического мониторинга в условиях реальной плотной застройки. Разработанная модель может стать основой при создании новых методов геоэкологического анализа и районирования территорий по условиям самоочищения атмосферы.

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 географических наук,
главный научный сотрудник
отдела численных краткосрочных прогнозов
Регионального специализированного
метеорологического центра Москва
ФГБУ «Гидрометеорологический
научно-исследовательский центр
Российской Федерации»

КУЗНЕЦОВА Ирина Николаевна  «21» августа 2026 г.

Контактные данные:

Тел.: +7(499)255-98-04, e-mail: 

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена
диссертация: 25.00.30. Метеорология, климатология, агрометеорология

Адрес места работы:

123376, г. Москва, Бол. Предтеченский пер., д. 13, стр. 1,
ФГБУ «Гидрометцентр России», отдел численных краткосрочных прогнозов
Регионального специализированного метеорологического центра Москва

Тел.: +7(499)252-34-48, e-mail: hmc@mecom.ru

Подпись сотрудника ФГБУ «Гидрометцентр России» И.Н. Кузнецовой удостоверяю:

