

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

Диссертационная работа А.И. Варенцова посвящена исследованию переноса и сухого осаждения аэрозольных частиц в городском пограничном слое на основе вихреразрешающего гидродинамического моделирования и разработанной автором лагранжевой стохастической модели. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 181 страницу, включая 62 рисунка, 9 таблиц и список литературы из 187 наименований.

Актуальность темы исследования.

Загрязнение воздуха взвешенными частицами остается одним из существенных факторов риска для населения крупных городов. Его отличительной чертой является выраженная пространственная неоднородность: в пределах отдельных кварталов условия вентиляции, накопления и удаления примеси существенно зависят от высоты, плотности и ориентации зданий. Региональные модели качества воздуха сглаживают эти различия, а существующие наблюдательные сети не позволяют получить непрерывную трехмерную картину распределения аэрозоля в городской застройке.

Поэтому развитие микромасштабных моделей, явно описывающих нестационарную турбулентную структуру течения в городском пограничном слое, является актуальным направлением физики атмосферы. Сочетание метода крупных вихрей с лагранжевым описанием движения частиц позволяет исследовать механизмы их переноса при различных физических

свойствах и сложной геометрии поверхности. Особый интерес представляет учет сухого осаждения на фасады зданий, большая суммарная площадь которых может заметно влиять на локальный баланс аэрозольной примеси.

Цель работы заключается в системном исследовании и количественной оценке влияния морфологии городской застройки и осаждения на перенос и распределение аэрозольных частиц с различными физическими свойствами. Для достижения цели автор разработал и верифицировал лагранжеву модель, интегрировал ее в LES-комплекс НИВЦ МГУ и ИВМ РАН, сформировал набор идеализированных и реальных конфигураций застройки, исследовал применимость классификации локальных климатических зон и оценил роль вертикальных поверхностей в осаждении аэрозолей. Поставленные задачи взаимосвязаны и в диссертации решены.

Оценка содержания диссертации.

Во **введении** обоснована актуальность темы, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, защищаемые положения и личный вклад автора. Структура работы соответствует логике поставленных задач.

Первая глава содержит аналитический обзор методов моделирования переноса и осаждения аэрозолей. Рассмотрена иерархия моделей качества воздуха, сопоставлены эйлеров и лагранжев подходы, RANS- и LES-модели, модели уличных сетей и методы машинного обучения. Отдельное внимание уделено влиянию морфологии городской поверхности, классификации локальных климатических зон и физическим механизмам сухого осаждения. Автор аргументированно показывает, что принадлежность к классу ЛКЗ не исчерпывает всего многообразия микромасштабной аэродинамики и должна рассматриваться совместно с внутренней структурой застройки.

Во **второй главе** изложены физико-математические основы и численная реализация разработанной модели лагранжева переноса частиц. Описаны уравнения движения, учет гравитационного оседания и подсеточной турбулентности, взаимодействие с твердыми поверхностями,

автономный режим работы и интегрированный модуль для вихреразрешающего комплекса. Важным достоинством является возможность одновременно рассчитывать несколько типов частиц с различными диаметрами, плотностями и параметрами взаимодействия с поверхностями.

Как можно понять из текста работы, модель прошла многоуровневую проверку, включавшую сопоставление с аналитическими решениями для идеализированных пограничных слоев, сравнение с натурными профилями пылевого аэрозоля и кросс-верификацию по результатам независимого вихреразрешающего моделирования. Автор демонстрирует согласие результатов и обсуждает границы применимости стохастических параметризаций, что повышает убедительность работы.

В **третьей главе** исследуется влияние городской морфологии на структуру воздушного потока, характеристики турбулентности и пространственное распределение аэрозолей. Рассмотрены 48 конфигураций четырех распространенных в Москве типов ЛКЗ, включая регулярные, рандомизированные и реальные участки. Основная серия экспериментов проведена при нейтральной стратификации; дополнительная серия при слабоустойчивой стратификации использована для проверки устойчивости выявленных закономерностей.

Содержательный результат состоит в том, что в регулярной анизотропной застройке перенос частиц определяется, прежде всего, ориентацией уличных каньонов относительно ветра и связанным с ней режимом обтекания. В рандомизированных и реальных конфигурациях направленные эффекты частично сглаживаются, а более информативными становятся интегральные характеристики района и тип ЛКЗ. Показано также, что классификация ЛКЗ лучше описывает распределение фоновой примеси, тогда как для локальных приповерхностных источников, число и многообразие которых в городах велико, требуется дополнительный учет ориентации, фронтальной площади и упорядоченности застройки.

Заслуживает внимания анализ влияния термической стратификации. При переходе к слабоустойчивому режиму подавление вертикального перемешивания изменяет относительную роль морфометрических параметров, однако общая связь между упорядоченностью застройки и доминирующими механизмами переноса сохраняется. Это подтверждает физическую обоснованность интерпретации результатов.

В **четвертой главе** исследована роль сухого осаждения на стены зданий. Установлена нелинейная чувствительность приповерхностных концентраций к вероятности поглощения частиц фасадами. В рассмотренных типах застройки на вертикальные поверхности может приходиться около 30–70% общего числа осевших частиц. Показано, что для исследованных мелкодисперсных фракций корректный учет взаимодействия со стенами оказывает существенное влияние на пространственную структуру концентраций.

Интересен расчет для жилого комплекса «Люблинский парк» и сравнение с уникальными измерениями выпадений частиц на стенах. Модель воспроизводит зависимость загрязнения фасадов от направления ветра, выраженную асимметрию между стенами каньона и слабую изменчивость осаждения с высотой для отдельных направлений потока. Сопоставление с наблюдениями позволило автору обоснованно показать, что для описания реальной картины необходимо учитывать не только климатическую розу ветров, но и локальную циркуляцию, пространственную структуру источников и конкретные метеорологические эпизоды.

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

Положения, выносимые на защиту, научные выводы и рекомендации диссертации в достаточной степени обоснованы. Они опираются на физически содержательную постановку задачи, многоуровневую проверку численной реализации, последовательное сопоставление серий расчетов для различных конфигураций застройки и статистический анализ полученных

полей. Выводы каждой главы непосредственно следуют из представленных результатов, а сформулированные практические рекомендации и обозначенные направления дальнейших исследований учитывают установленные в работе границы применимости модели.

Научная новизна, достоверность и значимость результатов.

Научная новизна диссертации определяется разработкой и интеграцией новой лагранжевой модели переноса и осаждения частиц, выявлением смены доминирующих факторов переноса при переходе от регулярной к нерегулярной застройке, определением условий применимости ЛКЗ как предиктора и получением количественных оценок вклада фасадов в сухое осаждение аэрозолей.

Достоверность результатов обеспечивается физически обоснованной постановкой задачи, использованием апробированной LES-модели, последовательной верификацией лагранжева модуля по аналитическим, натурным и численным эталонным данным, значительным объемом вычислительных экспериментов и корректной статистической обработкой. Все четыре защищаемых положения непосредственно подтверждаются результатами соответствующих глав. Представленные данные дают основание положительно оценить достоверность и новизну сформулированных автором научных выводов и рекомендаций.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии представлений о связи турбулентной структуры городского пограничного слоя с морфологией застройки и в количественной оценке вертикальных поверхностей как стока аэрозольной примеси. Практическая значимость определяется созданием работоспособного программного инструмента и возможностью использовать полученные закономерности при геоэкологическом районировании, совершенствовании моделей качества воздуха и подготовке более детальных сценарных расчетов городской среды.

Личный вклад А.И. Варенцова является основополагающим. Автором разработаны физико-математическая постановка и программная реализация

лагранжева модуля, выполнены его тестирование, верификация и интеграция в LES-комплекс, подготовлены конфигурации застройки, проведены численные эксперименты, статистический анализ и физическая интерпретация результатов.

Диссертация представляет собой самостоятельное завершённое исследование, выполненное на высоком научном уровне. По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.6.18, и 12 тезисов конференций. Результаты докладывались на 12 всероссийских и международных конференциях, семинарах и школах.

Замечания и пожелания.

1. В главе 3 используется широкий набор морфометрических характеристик застройки. Для облегчения физической интерпретации результатов было бы полезно свести в компактную таблицу соответствие между этими показателями и основными режимами течения: каналированием потока, блокирующим эффектом зданий, интенсивностью механической турбулентности и вертикального обмена.

2. Дополнительная серия при слабоустойчивой стратификации удачно подтверждает устойчивость основных качественных закономерностей. Естественным продолжением работы могло бы стать их рассмотрение для конвективной неустойчивой стратификации, в том числе в зимние месяцы, суточного хода термической стратификации, а также переходных режимов городского пограничного слоя.

3. Результаты расчетов для ЖК «Люблинский парк» показывают чувствительность осаждения к локальной метеорологической обстановке. В дальнейших исследованиях целесообразно дополнить подобные расчеты одновременными измерениями скорости ветра и температурной стратификации непосредственно внутри застройки; это расширит возможности совместного анализа модели и наблюдений.

4. В ряде многопанельных рисунков главы 3, в частности в сериях рисунков 3.12–3.24, а также на отдельных рисунках главы 4 размер подписей осей, легенд и обозначений линий при печати оказывается сравнительно небольшим. Небольшое увеличение шрифта и унификация размеров подписей облегчили бы восприятие графического материала.

5. В диссертации используется значительное число русских и англоязычных сокращений и обозначений, в том числе LES, RANS, ЛКЗ, UFP, PM2.5 и PM10. Хотя основные сокращения раскрываются при первом употреблении, отдельный список сокращений и обозначений облегчил бы чтение и поиск необходимых терминов.

6. Работа в целом написана ясно, однако в отдельных местах встречаются перегруженные сложные предложения и мелкие редакционные неточности. Дополнительная вычитка и унификация оформления сокращений и подписей могли бы повысить редакционное качество текста.

Общее заключение.

Указанные замечания имеют редакционный или рекомендательный характер, не ставят под сомнение полученные результаты, обоснованность защищаемых положений, достоверность выводов и 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:

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры физики атмосферы
Физического факультета ФГБОУ ВО «Московский
государственный университет имени М.В. Ломоносова»

ЮШКОВ Владислав Пролетарьевич

«2» сентября 2026 г.

Контактные данные:

Тел.: +7(495)939-48-47, e-mail: yushkov@phys.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена
диссертация: 04.00.22. Геофизика

Адрес места работы:

119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2,
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова», Физический факультет

Тел.: +7(495)939-31-60, e-mail: info@physics.msu.ru

Подпись сотрудника кафедры физики атмосферы Физического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» В.П. Юшкова удостоверяю:

И.о. декана Физического факультета
ФГБОУ ВО «Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова»,
доктор физико-математических наук, профессор

В.В. Белокуров