

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Варенцов Александр Иванович

**Перенос и осаждение аэрозолей различного происхождения
в городском пограничном слое по результатам численного
гидродинамического моделирования**

Специальность 1.6.18. Науки об атмосфере и климате

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2026

Диссертация подготовлена на кафедре метеорологии и климатологии
географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель – ***Степаненко Виктор Михайлович,***
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты – ***Кузнецова Ирина Николаевна,***
*доктор географических наук, главный научный
сотрудник Гидрометеорологического научно-
исследовательского центра Российской
Федерации*

Пененко Алексей Владимирович,
*доктор физико-математических наук,
заместитель директора Института
вычислительной математики и
математической геофизики Сибирского
отделения РАН*

Юшков Владислав Пролетарьевич,
*кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры физики атмосферы
физического факультета Московского
государственного университета имени
М.В. Ломоносова*

Защита диссертации состоится «17» сентября 2026 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.2 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы д. 1, ГЗ МГУ, Географический факультет, 18 этаж, ауд. 1801.

E-mail: Diss1102MSU@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3973>

Автореферат разослан « » июня 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук

А.В. Ольчев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Качество атмосферного воздуха является одним из ключевых факторов, определяющих здоровье населения. Одной из главных особенностей загрязнения атмосферы в городах является его выраженная пространственная неоднородность, обусловленная сложной морфологией застройки и физико-химическими свойствами подстилающей поверхности [Sokhi et al., 2022]. Внутригородские различия в условиях переноса и накопления примесей формируют устойчивые контрасты качества воздуха на уровне отдельных районов и кварталов. Это определяет необходимость исследования процессов переноса и сухого осаждения аэрозолей не только как физической, но и как географической задачи, направленной на выявление пространственных закономерностей формирования качества воздуха в условиях неоднородной урбанизированной территории.

Для решения задач анализа и прогноза качества воздуха применяется иерархия моделей. Однако глобальные и региональные системы химико-транспортного моделирования из-за грубого пространственного разрешения сглаживают градиенты концентраций и не учитывают городскую геометрию напрямую [Monks et al., 2009]. Сетевые уличные и гауссовы модели часто ошибаются в сложной реалистичной морфологии, а методы машинного обучения, несмотря на перспективность, требуют высокодетальных данных для обучения и обладают ограниченной физической интерпретируемостью. Это обуславливает востребованность микромасштабного вихреразрешающего моделирования (LES) в связке с лагранжевым подходом для точного описания турбулентности и физики движения частиц в городской среде [Guha, 2008; Blocken, 2018].

В последние годы в качестве пространственного каркаса для анализа и моделирования городской вентиляции и загрязнения воздуха всё активнее используется классификация локальных климатических зон (ЛКЗ) [Stewart, Oke, 2012]. Изначально разработанная для исследований городского острова тепла, она позволяет типизировать застройку по её морфометрическим свойствам. Тем не менее, применимость ЛКЗ как предиктора переноса и накопления примесей в современной науке остаётся слабо изученной. Сохраняется существенная неопределённость в том, какие процессы контролируются исключительно типом ЛКЗ, а какие – характеристиками внутренней структуры застройки [Li et al., 2021; Gál et al., 2025].

Дополнительным важным фактором, зачастую игнорируемым или сильно упрощаемым в моделях качества воздуха, является сухое осаждение аэрозолей на вертикальные фасады зданий [Mohan, 2016; Farmer et al., 2021]. Огромная площадь стен в городе выступает мощным фильтром, и отсутствие количественных оценок этого стока в

застройке различных типов ведёт к искажению расчётов локального баланса массы примеси.

Таким образом, системное исследование влияния реалистичной городской морфологии на основе ЛКЗ и процессов фасадного осаждения на дисперсию аэрозолей с использованием передовых методов моделирования является актуальной научной задачей, имеющей как фундаментальное значение, так и высокую прикладную геоэкологическую и метеорологическую ценность.

Степень разработанности темы. Теоретической и методологической основой работы послужили фундаментальные труды в области физики атмосферы, городской метеорологии и моделирования переноса примесей. Основы теории атмосферной диффузии и лагранжевых стохастических моделей были заложены в классических работах О. Sutton, М.Е. Берлянда, D. Thomson, В. Sawford, Р. Durbin, а их развитие для условий неоднородной турбулентности представлено в исследованиях А.В. Глазунова и J.-P. Minier. Изучению структуры воздушных потоков и режимов обтекания зданий посвящены труды Т. Oke, R. Britter, S. Hanna, В. Blocken.

Для анализа и прогноза качества воздуха сложилась иерархия моделей: от эйлеровых химико-транспортных (CHIMERE, CMAQ, SILAM и др.) и гауссовых уличных (AERMOD, OSPM, SIRANE) до микромасштабных (PALM, ENVI-met и др.) и методов машинного обучения – ограничения разных подходов в сложной морфологии обобщены в обзорах Р. Monks, А. Baklanov и R. Sokhi. Для воспроизведения турбулентности в городском пологе всё активнее используются методы вихреразрешающего моделирования: PALM (В. Maronga), uDALES (Т. Grylls) и др., подробные описания приводятся в обзорах В. Blocken и Y. Tominaga.

Современным стандартом описания городской морфологии стала классификация локальных климатических зон (ЛКЗ) I. Stewart и Т. Oke, фокус применения которой расширяется от исследований острова тепла в сторону задач вентиляции и качества воздуха (М. Demuzere, Т. Gál, R. Jiang, М. Amoui). Структура городской застройки, её влияние на аэродинамику и перенос примесей рассматриваются в работах Р. Kastner-Klein, J. Hang, N. Nazarian, R. Plotnick, G. Boeing. Вопросы сухого осаждения аэрозолей на городские поверхности, в том числе фасады зданий, рассматривались в работах J. Seinfeld и S. Pandis, S. Mohan, W. Slinn, А. Petroff, L. Thouron и М. Kurppa.

Несмотря на значительный прогресс, применимость ЛКЗ как предиктора дисперсии примесей с учётом внутренней структуры застройки и роль фасадного осаждения в самоочищении городского воздуха остаются освещёнными лишь частично, а их комплексное исследование на основе гибридного LES-моделирования в реалистичных морфологиях ранее не проводилось.

Объект исследования – процессы переноса и осаждения аэрозольных частиц в городском пограничном слое атмосферы. **Предмет исследования** – влияние морфологии городской застройки (описываемой в том числе классами ЛКЗ) и физических свойств частиц на их пространственное распределение и закономерности осаждения.

Целью настоящей диссертационной работы является системное исследование и количественная оценка влияния морфологии городской застройки и процессов осаждения на перенос и распределение аэрозольных частиц с различными физическими свойствами на основе вихреразрешающего моделирования.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1) Разработать, верифицировать и внедрить в состав вихреразрешающего гидродинамического комплекса лагранжеву численную модель, корректно воспроизводящую пространственную структуру переноса и осаждения частиц и применимую в сложной геометрической среде города.

2) Сформировать набор идеализированных и реальных (на примере г. Москвы) конфигураций городской застройки различных классов локальных климатических зон (ЛКЗ) для исследования их влияния на особенности атмосферного перемешивания и дисперсии примесей.

3) Выявить количественные закономерности связи характеристик поля концентрации аэрозолей с типом ЛКЗ и оценить применимость классификации ЛКЗ в качестве предиктора характеристик аэрозольного загрязнения.

4) Оценить роль осаждения на вертикальные фасады в формировании пространственной структуры загрязнения и сопоставить значимость этого фактора с влиянием основных физических свойств (размера и массы) самих частиц.

Методы исследований. Основой исследования является метод численного моделирования физических процессов. Динамика атмосферных течений и турбулентности рассчитывалась с помощью вихреразрешающей модели (LES-модели НИВЦ МГУ и ИВМ РАН). Для описания траекторий аэрозольных частиц применялась разработанная автором лагранжева стохастическая модель. Системное исследование влияния геометрии застройки на перенос аэрозолей проводилось на основе классификации локальных климатических зон (ЛКЗ) с привлечением различных морфометрических параметров городской геометрии. Анализ результатов численных экспериментов выполнялся с использованием методов математической статистики.

Научная новизна:

1) Разработана и представлена новая численная модель переноса и осаждения аэрозольных частиц, сопрягающая лагранжев подход с вихреразрешающей гидродинамической моделью пограничного слоя атмосферы. Доказана применимость

модели для задач исследования пространственной структуры концентраций и сухого осаждения частиц, обосновано её использование в сложной геометрической среде города.

2) Впервые количественно выявлено качественное изменение доминирующих факторов переноса аэрозолей в зависимости от морфологической упорядоченности застройки: установлено, что в регулярных конфигурациях с выраженным направлением городских каньонов ключевую роль играет анизотропия и ориентация относительно ветра, тогда как в нерегулярной среде (рандомизированной и реальной застройке Москвы) определяющим становится влияние изотропных макропараметров района (тип ЛКЗ), нивелирующее локальные направленные эффекты.

3) Доказано, что классификация ЛКЗ выступает не только инструментом параметризации, но и устойчивой географической основой для типизации условий формирования качества воздуха. Установлено, что для высокоточного анализа ЛКЗ как предиктор необходимо дополнять метриками пространственной хаотичности, анизотропии застройки и зависимой от направления ветра фронтальной площади.

4) Получены новые количественные оценки, характеризующие фасады зданий как значимый сток примеси (до 70% от бюджета сухого осаждения), формирующий внутригородскую неоднородность концентраций аэрозолей, представляющих фракции UFP, PM_{2.5} и PM₁₀. Показано для данных фракций, что неопределённость в параметризации взаимодействия частиц со стенами может вносить в изменчивость полей концентрации вклад, значительно превышающий эффект от вариации размера и массы частиц, при этом сам процесс формирования загрязнения на фасадах в реальной застройке демонстрирует высокую чувствительность к направлению ветра и локализации источников.

Теоретическая и практическая значимость. Результаты позволяют интерпретировать различия в переносе аэрозолей как проявление пространственной дифференциации городской среды, обусловленной типом застройки. Это открывает путь к созданию новых методов геоэкологического анализа и районирования территорий по условиям самоочищения атмосферы. Также ценность результатов заключается в возможности совершенствования прогностических моделей качества воздуха, в том числе на основе методов машинного обучения, за счёт учёта описанных связей ЛКЗ и характеристик концентраций в городском пологе и найденных ограничений применимости ЛКЗ в условиях регулярной и хаотичной застройки. Количественные показатели затухания шлейфа для разных ЛКЗ могут быть использованы в территориальном планировании для минимизации рисков при размещении жилых массивов. Разработанная модель является готовым инструментом для решения задач экологического мониторинга и прогноза в условиях реальной плотной застройки.

Основные защищаемые положения:

1) Разработанная лагранжева модель переноса и осаждения аэрозолей, сопряжённая с вихреразрешающей моделью пограничного слоя атмосферы, верифицирована и позволяет воспроизводить детальную пространственную структуру полей концентрации и осаждения частиц в городской застройке.

2) Пространственное распределение аэрозолей в городской застройке зависит от её морфометрических параметров: в регулярной застройке с выраженной ориентацией каньонов (высокой анизотропией) решающую роль играют характеристики, зависящие от направления ветра, а в нерегулярной – изотропные интегральные показатели, не связанные с направлением воздушного потока.

3) Тип локальной климатической зоны служит важным предиктором пространственного распределения аэрозолей в городском пограничном слое и наиболее информативен в случае фонового (удалённого) источника частиц.

4) Сухое осаждение на вертикальные стены зданий является одним из ключевых механизмов удаления примеси из воздуха в городском пологие и обеспечивает до 70% суммарного потока осаждения. Для рассмотренных моноразмерных аэрозолей с аэродинамическим диаметром не более 5 мкм (представители фракций UFP, PM_{2.5} и PM₁₀) учёт этого процесса оказывает на пространственное распределение концентраций влияние, сравнимое с эффектом вариации размера и массы частиц или превосходящее его.

Личный вклад автора. Все основные результаты диссертационного исследования получены автором лично. Автором самостоятельно разработана физико-математическая и программная реализация лагранжевой модели, проведены её тестирование и верификация, осуществлена интеграция в вихреразрешающую модель НИВЦ МГУ и ИВМ РАН. Выбраны территории моделирования и созданы конфигурации застройки, проведён анализ их геометрии, разработан генератор псевдослучайной застройки. Спланированы и проведены все серии численных экспериментов, выполнен анализ и интерпретация результатов, сформулированы основные выводы и положения, выносимые на защиту.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов обеспечивается применением строгого физико-математического моделирования для описания процессов переноса и осаждения аэрозолей, многоуровневой верификацией разработанной лагранжевой модели по аналитическим решениям, данным натурных измерений и путём кросс-верификации с независимой эталонной LES-моделью. В качестве пространственного каркаса для классификации застройки применяется широко используемая в городской климатологии система локальных климатических зон (ЛКЗ). Полученные результаты основаны на корректной статистической обработке и анализе данных численных экспериментов.

Основные результаты диссертации докладывались на 12 всероссийских и международных конференциях, семинарах и школах, в том числе на международных конференциях по городскому климату ICUC-11 и ICUC-12 (Сидней, 2023; Роттердам, 2025), генеральных ассамблеях EGU (Вена, 2021; 2022), международной школе ERCA-2024 (Гренобль, 2024), на семинаре Гидрометцентра России, а также на конференциях CITES и ENVIROMIS. Результаты диссертации использовались при выполнении работ по 10 проектам и грантам РФФИ, РНФ и других организаций.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 научные работы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.6.18. Науки об атмосфере и климате (географические науки).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 181 страницу, включая 62 рисунка и 9 таблиц. Список литературы насчитывает 187 наименований (из них 10 на русском языке и 177 на английском языке).

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю д.ф.-м.н., зам. директора НИВЦ МГУ Степаненко В.М. и к.ф.-м.н., зав. лабораторией математического моделирования геофизических пограничных слоёв НИВЦ МГУ Мортикову Е.В. за постановку исследовательских задач и поддержку на пути к их решению, сотрудникам кафедры метеорологии и климатологии Географического факультета МГУ и лабораторий суперкомпьютерного моделирования природно-климатических процессов и математического моделирования геофизических пограничных слоёв НИВЦ МГУ, Глазунову А.В., Дебольскому А.В., Кошелевой Н.Е., Савенко А.В. А также своим близким, в частности Н.Е. Варенцовой, И.М. Варенцову, С.А. Варенцовой, М.И. Варенцову, Н.А. Варенцовой и собаке Цири.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи, показана научная новизна и практическая значимость исследования, представлены основные защищаемые положения, описана апробация работы.

Глава 1. Методы моделирования переноса и осаждения аэрозолей в городской среде

В главе представлен подробный обзор литературы, посвященной методам исследования и моделирования качества городского воздуха, с акцентом на аэрозольное загрязнение. Показано, что традиционные методы наземного и мобильного мониторинга

не способны обеспечить полную пространственно-временную картину распределения примесей в сложной городской застройке, что делает применение физико-математического моделирования необходимым инструментом.

Выполнен анализ иерархии современных моделей состава атмосферы и переноса примесей. Отмечено, что региональные и глобальные химико-транспортные модели (IFS-COMPO, GEOS-CF, SILAM, CMAQ, CHIMERE, WRF-Chem и др.) обладают детализированными химическими модулями, но из-за грубого пространственного разрешения не могут напрямую разрешать городскую геометрию и процессы в ней. Гауссовы модели (например, AERMOD), макро-лагранжевы траекторные модели (HYSPLIT, FLEXPART) и модели уличных сетей (OSPM, SIRANE) эффективны для специфических задач, но могут давать существенные ошибки в сложной морфологии реальных городов.

Отмечено, что в последние годы активно развиваются и являются крайне перспективными для городских условий подходы на базе машинного обучения (регрессия землепользования (LUR), методы на основе случайного леса, градиентного бустинга, нейросетей), в том числе благодаря их относительно низкой вычислительной стоимости при применении. Однако такие методы требуют детализированной информации для обучения и дополнительных исследований в части выбора предикторов, целей прогнозирования и ограничений. Это дополнительно обуславливает востребованность микромасштабных моделей вычислительной гидродинамики (CFD), которые способны предоставить детальные данные для различных условий и позволяют изучить локальные эффекты и процессы в городском пограничном слое атмосферы. В категории CFD-моделей вихреразрешающее моделирование (LES, например, модели PALM, uDALES и др.) во многом превосходит модели на основе осреднённых уравнений (RANS, например, модель ENVI-met) в городских условиях, так как напрямую рассчитывает крупные нестационарные вихри.

Рассмотрены физико-математические основы расчёта дисперсии частиц. Отмечено, что эйлеров подход (диффузия концентраций между ячейками расчётной сетки) не позволяет явно учитывать силы, взаимодействия и столкновения для частиц, а также несёт меньше полезной информации (например, отсутствуют траектории) по сравнению с лагранжевым подходом. Лагранжев трекинг (расчёт позиций и скоростей индивидуальных частиц) позволяет явным образом учитывать физику движения частиц и вводить детальные граничные условия взаимодействия с поверхностями. Обосновано, что гибридные вычислительные комплексы, совмещающие разрешение потока методами LES и лагранжев трекинг, являются оптимальным инструментом для микромасштабных исследований дисперсии аэрозолей в городской среде. Также описываются подходы к

верификации моделей, в том числе по данным эталонных LES-расчётов.

В качестве универсального инструмента для описания морфологии городской застройки введена концепция локальных климатических зон (ЛКЗ). Эта система создавалась в первую очередь для классификации городской поверхности (хотя включает и природные классы) и активно применяется в задачах исследования атмосферных параметров на региональном масштабе, когда невозможно явно разрешить отдельные здания. Классификация включает 17 классов подстилающей поверхности: 10 для городской застройки (рис. 1) и 7 для природных территорий. Изначально классификация разрабатывалась для задач, связанных с энергетическим балансом и температурой в городе, но сейчас ЛКЗ всё чаще используются как пространственный каркас для моделирования вентиляции и качества воздуха. Однако подчёркивается, что применимость ЛКЗ в этой теме требует дополнительных исследований и систематизации. Каждый класс ЛКЗ задаёт лишь диапазоны геометрических параметров застройки, в пределах которых внутренняя пространственная структура (упорядоченность, анизотропия относительно направления ветра) может варьироваться и сильно влиять на воздушные течения и концентрации загрязняющих веществ. Следовательно, для объективной оценки применимости ЛКЗ как предиктора переноса и накопления аэрозолей необходимо учитывать и влияние внутренней структуры застройки.

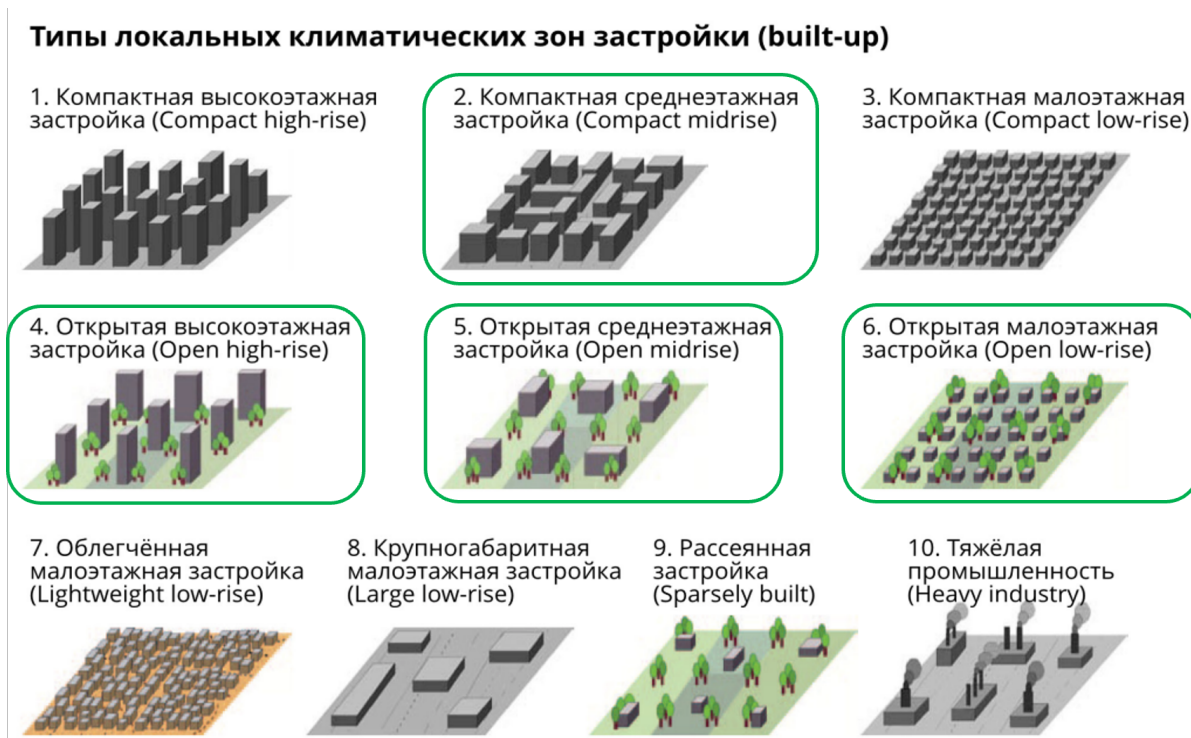


Рисунок 1 – Типы локальных климатических зон для городской застройки [Stewart и Oke, 2012; Самсонов и Тригуб, 2018]. Зелёными фигурами выделены типы ЛКЗ, исследуемые в работе далее.

Отдельно проанализирован один из способов самоочищения атмосферы – процесс сухого осаждения аэрозолей на различные поверхности, в том числе на стены зданий. Показано, что на масштабе всего города потоки осаждения на вертикальные стены могут быть сопоставимы с потоками на крыши. Отдельные микромасштабные эксперименты показывают, что рядом с зонами сильной турбулентности на зданиях могут образовываться зоны активного осаждения частиц, а учёт фасадного осаждения в дополнение к осаждению на горизонтальные поверхности может заметно (более чем на 20%) снижать концентрацию частиц в уличных каньонах. Несмотря на значимость осаждения на стены, в научном сообществе отсутствует консенсус по методам параметризации этого процесса, а в микромасштабных моделях он зачастую игнорируется. Это обосновывает необходимость систематических численных экспериментов для оценки влияния фасадного осаждения на перенос и накопление примесей в слое городского полога.

В заключении главы резюмируется, что несмотря на мощный скачок в развитии гидродинамического моделирования и подходов на основе машинного обучения применительно к переносу и накоплению аэрозолей в городе, сохраняется ряд пробелов. К ним относятся недостаточное понимание применимости ЛКЗ с учетом внутренней структуры и хаотичности застройки, а также неопределённость в важности и роли фасадного сухого осаждения. Эти вопросы определяют актуальность дальнейших исследований, представленных в диссертации.

Глава 2. Модель лагранжева переноса частиц

В данной главе представлено описание и результаты верификации разработанного в рамках диссертации численного инструмента – модели лагранжева переноса частиц. Выбор лагранжева подхода обоснован его высокой информативностью и возможностью явного учёта сил, действующих на каждую отдельную частицу, что критически важно для моделирования в сложной геометрической среде города.

Физико-математическим ядром модели служит система дифференциальных уравнений движения, основанная на втором законе Ньютона:

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \frac{\mathbf{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_D(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p), \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{x}_p}{dt} = \mathbf{u}_p, \quad (2)$$

где $\mathbf{u}_p$ и $\mathbf{x}_p$ – скорость и координата частицы, $\mathbf{u}$ – скорость воздушного потока, $\mathbf{g}$ – ускорение силы тяжести, ρ_p и ρ – плотности материала частицы и воздуха соответственно,

а F_D – коэффициент силы аэродинамического сопротивления среды (рассчитывается на основе закона Стокса).

Для моделирования мелкомасштабной турбулентности, не разрешаемой на сетке входных данных, в коде реализованы стохастические параметризации различных порядков. Для пассивных аэрозолей (без инерции) используется модель случайных смещений (RDM), в которой система уравнений (1)-(2) упрощается – рассчитывается изменение координаты частицы x_i^p (по i -ой оси координат) за счёт явно разрешённой скорости воздушного потока $\bar{u}_i$, скорости гравитационного оседания частицы $u_{s,i}$ (по закону Стокса) и подсеточной турбулентности с учётом дрейфовой коррекции (для выполнения «условия хорошего перемешивания» Томсона, предотвращающего нефизическое скопление частиц в зонах с неоднородной турбулентностью):

$$dx_i^p = \bar{u}_i dt + \frac{\partial K_s}{\partial x_i} dt + \sqrt{2K_s} \xi_i + u_{s,i} dt, \quad (3)$$

где ξ_i – гауссова случайная величина с нулевым средним и дисперсией dt (приращение винеровского процесса) для i -ой оси, K_s – коэффициент турбулентной диффузии. Также реализована стохастическая модель первого порядка на базе уравнения Ланжевена (LSM, в нескольких вариантах), применяемая в том числе для более тяжёлых инерционных частиц:

$$du'_i = -\frac{1}{2} b^2 \frac{u'_i}{\sigma_{u_i}^2} dt + b \xi_i, \quad (4)$$

где параметр b связан со скоростью диссипации турбулентной кинетической энергии, а $\sigma_{u_i}^2$ – дисперсия компоненты скорости потока для i -ой оси.

Функционал модели расширен блоками расчёта распада частиц с ограниченным временем жизни (для биоаэрозолей), параметризацией обратного влияния экстремальных концентраций на стратификацию атмосферы, а также механизмами вероятностного осаждения и упругого отскока от твёрдых поверхностей. Поддерживается как высокоточная «полигональная» геометрия зданий, так и оптимизированная «сеточная» аппроксимация объектов. Для обеспечения возможности расчёта ансамблей до сотен миллионов частиц проведена оптимизация программного кода с использованием технологий параллельного программирования.

Проведённая многоуровневая верификация подтвердила точность модели. Сравнение с аналитическими решениями для логарифмического пограничного слоя и течения Куэтта показало качественное совпадение и высокую корреляцию ($r = 0.96 \sim 0.99$) расчётных профилей концентрации с теоретическими. Валидация по данным натурных измерений концентраций в песчаных бурях (рис. 2б, одна из измерительных площадок) продемонстрировала хорошее согласие модели с эмпирическими профилями

массовой концентрации песчаных частиц (рис. 2в). В рамках кросс-верификации с эталонной LES-моделью ИВМ РАН [Glazunov, 2018] при моделировании регулярной застройки установлено, что разработанные стохастические методы (RDM и один из вариантов LSM) корректно воспроизводят структуру шлейфа примеси как при нейтральной, так и при устойчивой термической стратификации.

Разработанный код интегрирован в состав вихререшающей модели НИВЦ МГУ и ИВМ РАН (MSU LES) [Varentsov et al., 2025] в виде отдельного программного модуля (рис. 2а). Гибкая архитектура обеспечила прямой доступ лагранжева блока к мгновенным трёхмерным полям метеовеличин и турбулентности «на лету», что позволило исследовать перенос частиц во взаимодействии с явно разрешёнными нестационарными вихревыми структурами в условиях городской застройки.

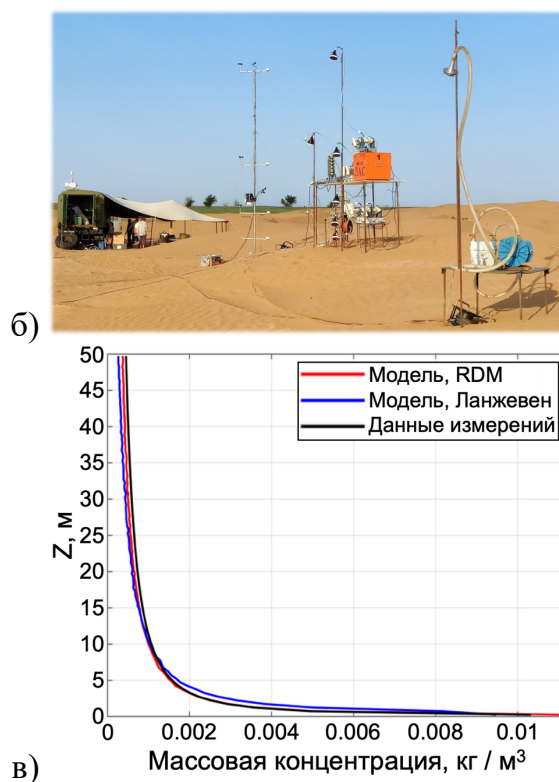
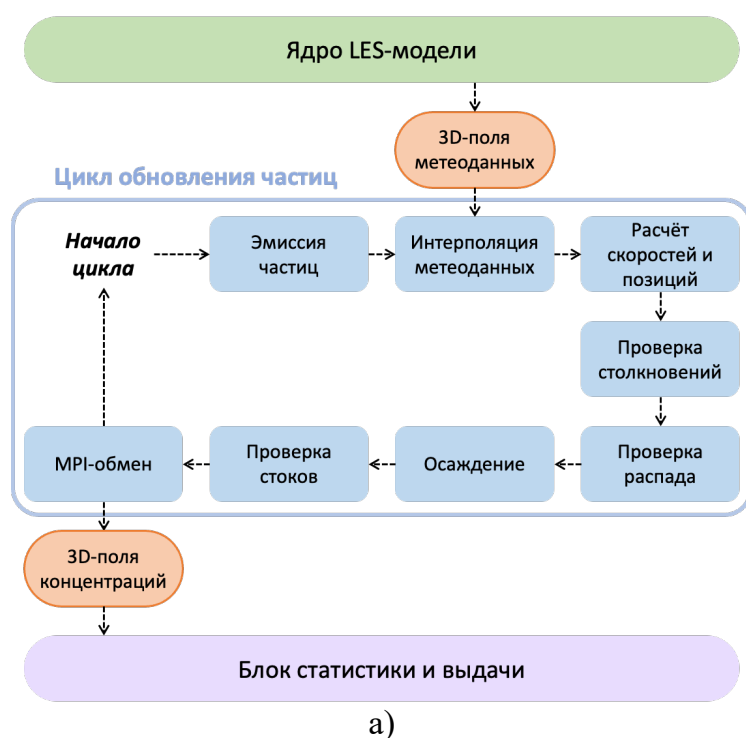


Рисунок 2 – Алгоритм работы модуля лагранжева переноса частиц в LES-модели НИВЦ МГУ и ИВМ РАН (а). Комплекс для измерения концентраций частиц в полупустыне, п. Нарын-Худук, Калмыкия (б). Профили концентрации песчаных частиц по эмпирическим профилям (аппроксимация данных измерений) и расчётам лагранжевой модели (в).

В заключении главы сформулированы границы применимости метода, обусловленные принятыми допущениями: не учитываются коагуляция частиц, фазовые переходы, химические превращения, влажное осаждение и механизм сальтации. Созданный и верифицированный инструментарий признан надёжным и эффективным средством для решения задач исследования переноса аэрозолей в городском воздухе.

Глава 3. Моделирование переноса аэрозолей в разных типах городской застройки на основе классификации ЛКЗ

В третьей главе представлены результаты серии численных экспериментов в вихреразрешающей модели НИВЦ МГУ и ИВМ РАН, направленных на системное исследование влияния городской морфологии на дисперсию аэрозолей. В качестве пространственного каркаса выбраны четыре типа локальных климатических зон (ЛКЗ), наиболее характерные для Москвы: ЛКЗ 4 (открытая многоэтажная застройка, занимающая почти 44 % застроенной площади города), ЛКЗ 6 (открытая малоэтажная, 26 %) и ЛКЗ 5 (открытая среднеэтажная, 10 %), а также ЛКЗ 2 (компактная среднеэтажная, составляющая 28 % застройки в центральной части города). Для каждого типа ЛКЗ было отобрано по пять реальных локаций города (рис. 3), соответствующих заданным морфометрическим критериям.

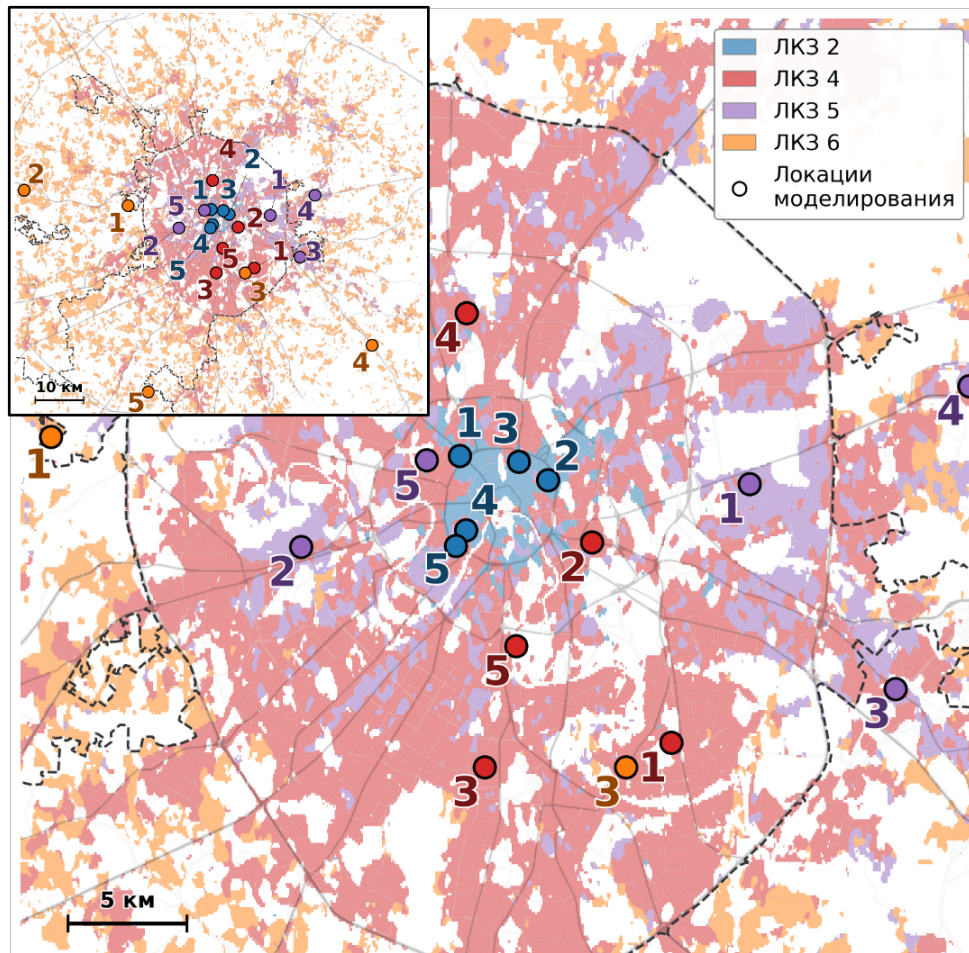


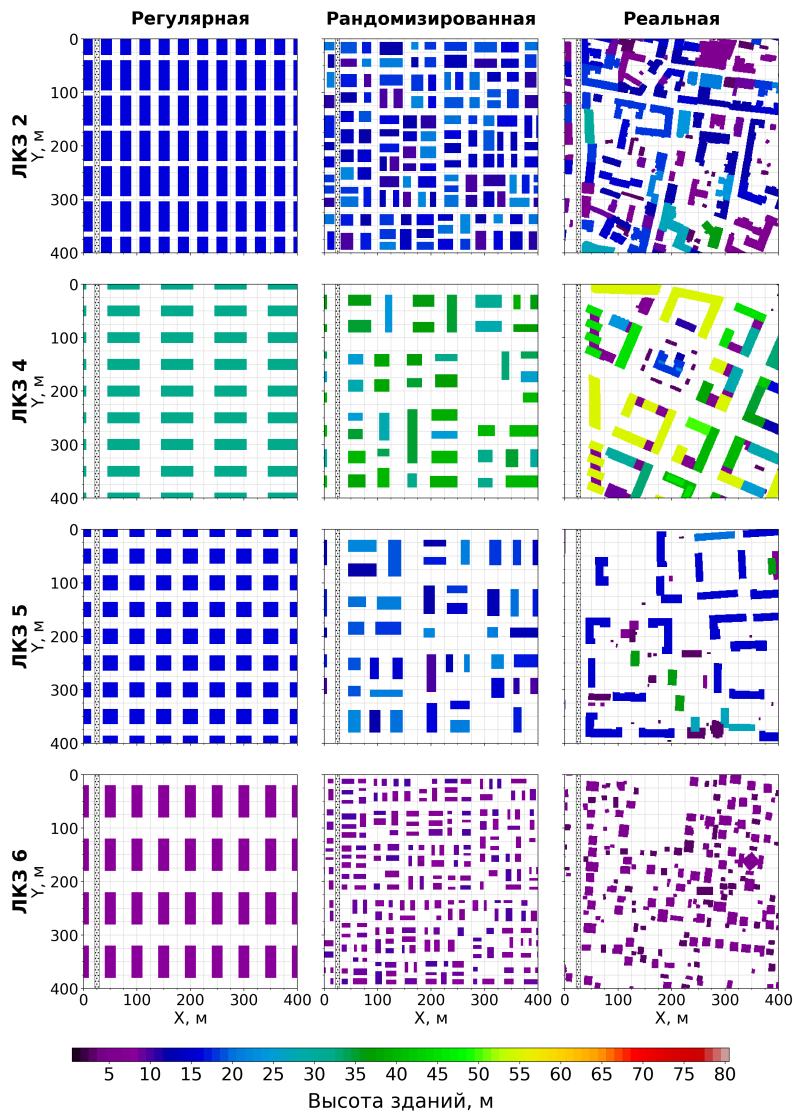
Рисунок 3 – Карта типов ЛКЗ в Москве и области, точки – локации моделирования реальной застройки (по 5 для каждой из выбранных ЛКЗ). Карта построена на основе данных региональной карты ЛКЗ для Москвы и окрестностей [Varentsov et al., 2020] и глобальной карты ЛКЗ [Demuzere et al., 2022].

Выбранный набор позволяет изолированно оценить влияние вариативности высоты зданий при фиксированной плотности (ЛКЗ 4, 5, 6) и влияние плотности при фиксированной высоте (ЛКЗ 2 и 5).

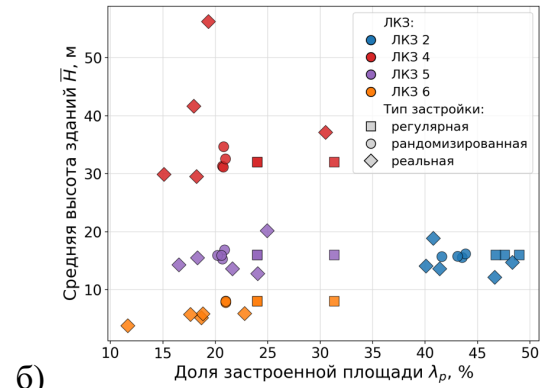
На основе открытых геоданных (OpenStreetMap, Яндекс Карты) для выбранных территорий сформированы карты высот. В дополнение к реальным участкам были сгенерированы конфигурации, представляющие собой крайние случаи с точки зрения пространственной упорядоченности: идеализированные регулярные (по 3 варианта на каждый тип ЛКЗ) и рандомизированные (по 4 варианта). Последние создавались с помощью разработанного программного генератора, обеспечивающего псевдослучайную геометрию при строгом сохранении базовых морфометрических индексов целевой ЛКЗ (средней высоты, доли застроенной площади, отношения аспекта каньона). В результате сформирована объединённая выборка из 48 конфигураций (рис. 4а).

Анализ морфометрических параметров полученных конфигураций демонстрирует широкий разброс по средней высоте и плотности застройки в пределах допустимых значений каждой ЛКЗ (рис. 4б). Для количественной оценки структурной неоднородности использовались метрики пространственной хаотичности (рис. 4в): коэффициент вариации высот зданий CV_H (относительный разброс высот) и спектральная энтропия Шеннона двумерного поля высот S_H (мера многомасштабности и нерегулярности рисунка застройки; низкие значения отвечают регулярной решётке, высокие – нерегулярной застройке разной высоты). Дополнительно вводится индекс анизотропии застройки A_f (рис. 4г) – коэффициент вариации индекса фронтальной площади по разным направлениям ветра. Эта величина характеризует пространственную направленность застройки: $A_f = 0$ для изотропной геометрии (одинаковое сопротивление ветровому потоку по всем направлениям), а высокие значения означают наличие выражено ориентированных каньонов (улиц).

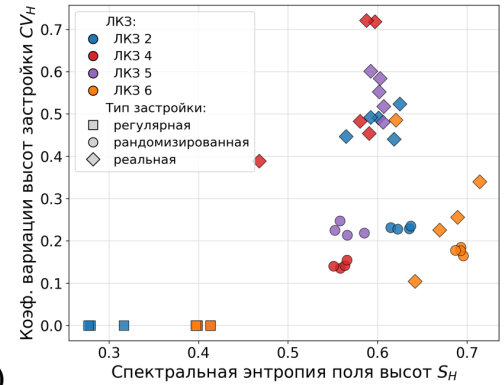
Выявлено, что конфигурации отчётливо разделяются на три кластера по CV_H и S_H (рис. 4в): регулярные (с минимальной хаотичностью), рандомизированные (с высокой энтропией, но умеренной дисперсией высот) и реальные (с максимальной хаотичностью по обоим показателям). Анизотропия A_f при этом достигает высоких значений преимущественно в регулярной застройке с выраженной ориентацией каньонов (рис. 4г), тогда как в хаотичной застройке высокие значения A_f недостижимы из-за усреднения по различным масштабам и ориентациям зданий. Полученные результаты подчёркивают, что даже при идентичных средних морфометрических параметрах, определяющих тип ЛКЗ, внутренняя геометрическая структура застройки может кардинально различаться.



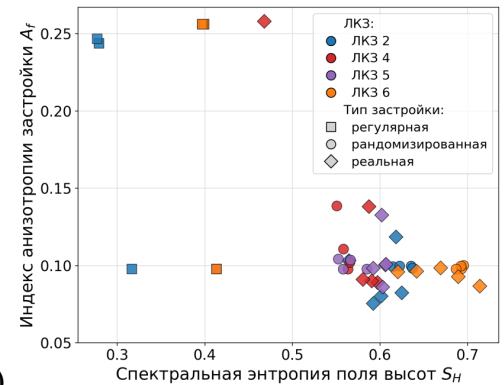
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4 – Примеры моделируемых конфигураций зданий для разных типов ЛКЗ (строки) и разных типов застройки (столбцы), показано 12 из 48 конфигураций, штриховкой отмечено положение источника частиц (а). Средняя высота застройки и доля застроенной площади для каждой конфигурации (б). Метрики структурной неоднородности и направленности застройки: спектральная энтропия поля высот и коэффициент вариации высот (в), индекс анизотропии для каждой конфигурации (г).

На основе рассчитанных полей концентрации фракции $PM_{2.5}$ проведён статистический анализ пространственного распределения частиц с расчетом вертикальных профилей коэффициента вариации (рис. 5). Выявлен двойственный характер влияния городской морфологии. В регулярной застройке поля концентраций критически зависят от локальной ориентации улиц и их выраженности (анизотропии): изменчивость между конфигурациями внутри одного типа ЛКЗ (внутриклассовая)

огромна и может превышать разницу между различными типами ЛКЗ (межклассовую) (рис. 5а) или быть сопоставимой с ней (рис. 5б). В перпендикулярных ветру каньонах развивается вертикальное перемешивание, перемещающее аэрозоли из городского полога в пространство выше уровня крыш. В параллельных ветру каньонах, наоборот, образуются каналы вдоль улиц, активизирующие горизонтальный перенос аэрозолей – в результате более высокие концентрации наблюдаются внутри полога и более низкие над ним. Поэтому в регулярной застройке максимумы изменчивости находятся у земли и высоко над городским пологом, а точка перегиба кривой – чуть выше уровня крыш.

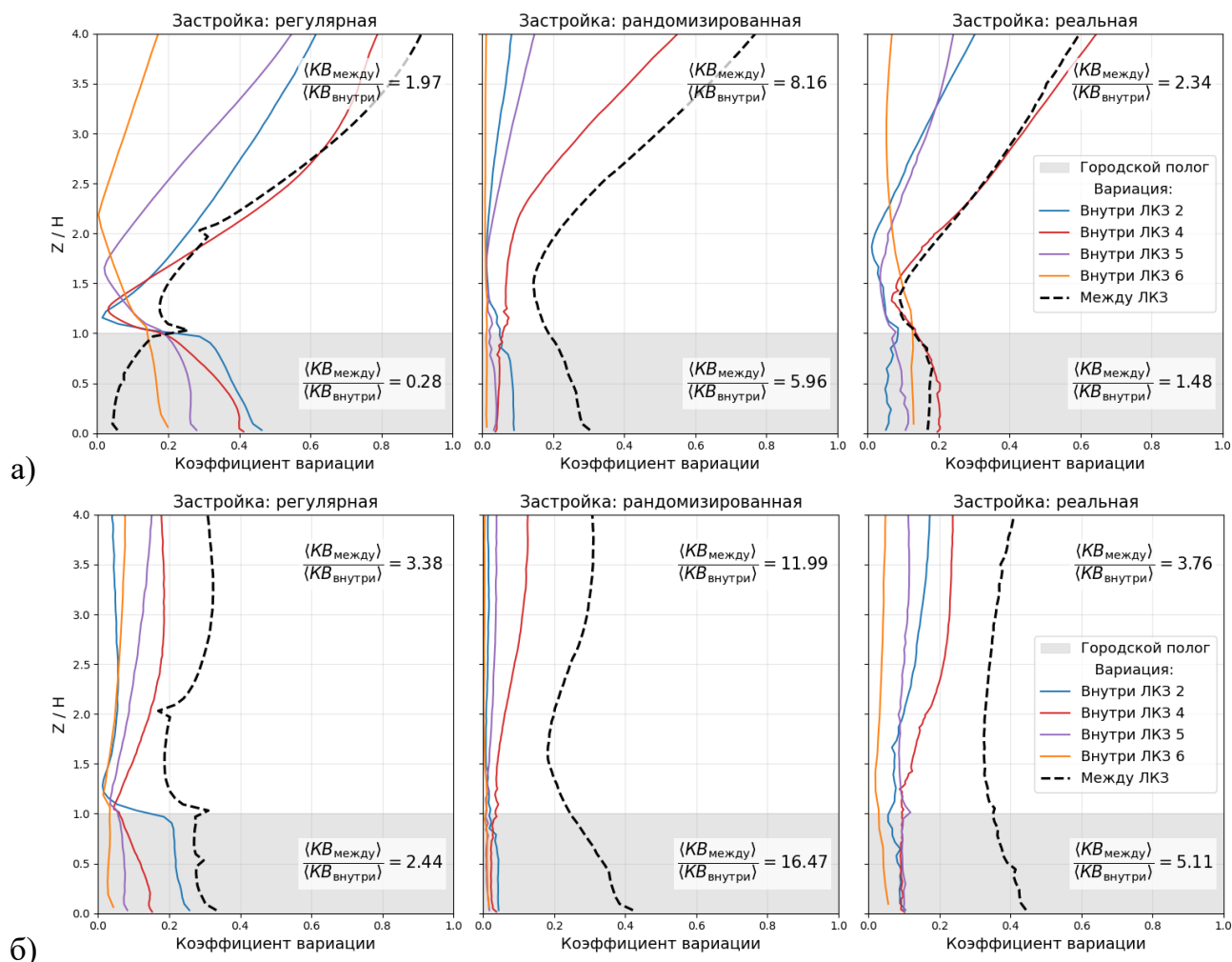


Рисунок 5 – Вертикальные профили коэффициента вариации (KV) концентрации для приповерхностного источника (а, «выбросы с дороги») и перемешанного по высоте источника (б, «фоновое загрязнение»). Цветные линии – изменчивость между разными конфигурациями внутри одного типа ЛКЗ (внутриклассовая), чёрная пунктирная – между разными типами ЛКЗ (межклассовая). Высоты нормированы на среднюю высоту зданий каждой конфигурации. Отношения KV между ЛКЗ к KV внутри ЛКЗ рассчитаны в среднем по слою городского полога ($Z/H \leq 1$) и над ним ($1 < Z/H \leq 4$), значения $\ll 1$ – доминирование внутриклассовой изменчивости, $\gg 1$ – межклассовой.

В рандомизированной застройке (рис. 5а и 5б, по центру) наблюдается обратная ситуация: пространственная неоднородность сглаживает локальные аэродинамические эффекты, вследствие чего межклассовая изменчивость (между ЛКЗ) стабильно доминирует над внутриклассовой (внутри ЛКЗ). Реальная застройка занимает промежуточное положение: межклассовая изменчивость доминирует в случае фоновых источников, но имеет схожий масштаб с внутриклассовой для уличного источника. Отмеченные закономерности сохраняют устойчивость при переходе от нейтральной к слабоустойчивой стратификации атмосферы.

Для количественной проверки гипотезы о необходимости учёта особенностей внутренней структуры застройки наряду с классификацией ЛКЗ были построены линейные регрессионные модели. Характеристики поля концентрации (средняя концентрация в слое 0-4 м над землёй $\bar{C}_{0-4м}$ и доля частиц внутри городского полога $\bar{C}_H/\bar{C}_{4H}$) аппроксимировались на основе типа ЛКЗ и морфометрических параметров застройки: относительного индекса фронтальной площади $\tilde{\lambda}_f$ (характеризует ориентацию каньонов относительно ветра), индекса анизотропии A_f и спектральной энтропии высот зданий S_H . Использовалась серия моделей линейной регрессии с последовательным наращиванием физически интерпретируемых предикторов:

$$\begin{aligned} \text{M1: } y &= \beta_0 + \alpha_{LCZ}, \\ \text{M2: } y &= \beta_0 + \alpha_{LCZ} + \gamma_1(\tilde{\lambda}_f - 1), \\ \text{M3: } y &= \beta_0 + \alpha_{LCZ} + \gamma_1(\tilde{\lambda}_f - 1) \cdot A_f/S_H, \end{aligned} \quad (5)$$

где α_{LCZ} – категориальный эффект класса ЛКЗ (реализован через индикаторные переменные для классов ЛКЗ 4, 5, 6, опорный класс – ЛКЗ 2, эффект которого включён в свободный член β_0).

Модель М2 добавляет к ЛКЗ-классификации знаковую направленность застройки: использован не сам индекс $\tilde{\lambda}_f$, а его отклонение от среднего по всем румбам, равного единице ($\tilde{\lambda}_f - 1$). Такое представление позволяет линейной модели «увидеть» переход режима – от каналирования потока вдоль параллельных ветру улиц ($\tilde{\lambda}_f - 1 < 0$) к вертикальному перемешиванию в перпендикулярных каньонах ($\tilde{\lambda}_f - 1 > 0$). Модель М3 дополнительно учитывает, что эффект направленности уточняется двумя факторами: во-первых, прямой зависимостью от индекса анизотропии A_f , поскольку выраженные оси застройки могут усиливать каналирующий или блокирующий эффект каньонов, и, во-вторых, обратной зависимостью от S_H , поскольку при высокой энтропии (хаотичности застройки) разнообразие локальной геометрии застройки размывает направленный геометрический эффект, и его вклад в осреднённое поле концентрации ослабевает.

Соответственно, направленный член $(\tilde{\lambda}_f - 1)$ умножается на A_f и делится на S_H , объединяя три морфометрические характеристики в единый физически интерпретируемый предиктор.

Оценка качества моделей проводилась с помощью скорректированного коэффициента детерминации R^2 (табл. 1).

Таблица 1. Скорректированный R^2 моделей линейной регрессии для $\bar{C}_{0-4м}$ (концентрация на «пешеходном» уровне) и $\bar{C}_H/\bar{C}_{4H}$ (доля частиц в городском пологое). Источники: «уличный» – приповерхностный; «фоновый» – перемешанный по высоте. Модели на основе уравнения (5): M1: $y = f(\text{ЛКЗ})$, M2: $y = f(\text{ЛКЗ}, \tilde{\lambda}_f)$, M3: $y = f(\text{ЛКЗ}, \tilde{\lambda}_f, A_f, S_H)$. Зелёным выделены лучшие модели в ряду. Скорректированный R^2 рассчитан на той же выборке, на которой подгонялись модели, и характеризует долю объяснённой дисперсии, а не прогностическое качество вне обучающей выборки.

Источник	Метрика	Выборка конфигураций	Модель		
			M1	M2	M3
Уличный	$\bar{C}_{0-4м}$	Все	0.19	0.49	0.71
		Регулярные	-0.35	0.46	0.71
	$\bar{C}_H/\bar{C}_{4H}$	Все	0.71	0.82	0.87
		Регулярные	0.34	0.76	0.85
Фоновый	$\bar{C}_{0-4м}$	Все	0.89	0.89	0.89
		Регулярные	0.75	0.81	0.86
	$\bar{C}_H/\bar{C}_{4H}$	Все	0.85	0.86	0.86
		Регулярные	0.62	0.79	0.85

Базовая ЛКЗ-модель (M1) демонстрирует низкую описательную способность для регулярной застройки ($R^2 < 0$ для приповерхностной концентрации при уличном источнике), поскольку не учитывает ориентацию каньонов относительно ветра. При этом сравнение строк "Все" и "Регулярные" в таблице 1 показывает, что для регулярной подвыборки исходная информативность ЛКЗ резко ниже, тогда как на полной выборке, включающей рандомизированные и реальные конфигурации, ЛКЗ-классификация уже даёт значимый вклад – это согласуется с показанным на рис. 5 доминированием межклассовой изменчивости (между типами ЛКЗ) над внутриклассовой в нерегулярной среде. Учёт ориентации каньонов относительно ветра (M2) кардинально повышает качество описания: R^2 растёт с -0.35 до 0.46. Дополнительный учёт уточняющих факторов (A_f и $1/S_H$) в составе единого предиктора (M3) обеспечивает дальнейший

прирост до 0.71 и в регулярной, и в полной выборке. Приповерхностная концентрация при уличном источнике оказывается более чувствительной к деталям геометрии застройки, чем интегральная доля частиц в каньоне: именно для неё вклад моделей М2 и М3 максимален, тогда как при моделировании фоновое загрязнение, перемешанное по высоте, классификация ЛКЗ сама по себе остаётся достаточно надёжным предиктором, и роль направленных морфометрических характеристик становится менее существенной.

В заключении главы делается вывод, что классификация ЛКЗ способна объяснять различия в переносе и накоплении аэрозолей между разными территориями города и может успешно применяться в качестве предиктора. Тем не менее, для более точного описания полей концентраций, особенно при наличии значимых локальных источников внутри застройки, ЛКЗ следует дополнять морфометрическими параметрами, отражающими ориентацию каньонов относительно ветра, степень анизотропии застройки и её пространственную хаотичность.

Глава 4. Моделирование процессов осаждения частиц

В четвертой главе проведено комплексное исследование процессов сухого осаждения аэрозолей на подстилающую поверхность, с особым акцентом на роль вертикальных фасадов зданий – фактора, который часто игнорируется в моделях дисперсии примесей и влияние которого на качество воздуха слабо изучено.

В первой части главы представлена серия численных экспериментов, направленных на разделение вклада различных типов поверхностей в очищение атмосферы городского полога. С использованием конфигураций реальной застройки Москвы для типов ЛКЗ 2, 4, 5 и 6 была проведена оценка чувствительности полей концентрации к вероятности осаждения частиц при их контакте с горизонтальными (P_h) и вертикальными (P_v) преградами. Анализ пространственной структуры стоков (рис. 6) наглядно демонстрирует, что плотность осаждения на фасадах крайне неоднородна: ярко выраженные максимумы локализуются на наветренных сторонах зданий и боковых гранях в зонах отрыва потока.

Анализ бюджета осаждения (рис. 7) демонстрирует, что стены зданий выступают мощным стоком для всех рассмотренных типов ЛКЗ и доминирующим стоком примеси для ЛКЗ 2, 4, 5 за счёт большой площади вертикальных поверхностей в данных типах ЛКЗ. В условиях открытой многоэтажной застройки (ЛКЗ 4) и плотной среднеэтажной (ЛКЗ 2) на долю фасадов может приходиться до 70% всех осаждённых частиц.

Установлено, что зависимость приземной концентрации от вероятности осаждения на стены (P_v) носит выраженный нелинейный характер: введение даже минимальной вероятности осаждения на стены ($P_v = 10\%$) обеспечивает быстрое снижение

концентрации на удалении от источника на 25-30%, а переход к режиму полного поглощения ($P_v = 100\%$) снижает уровень загрязнения вдали от источника в среднем в два раза.

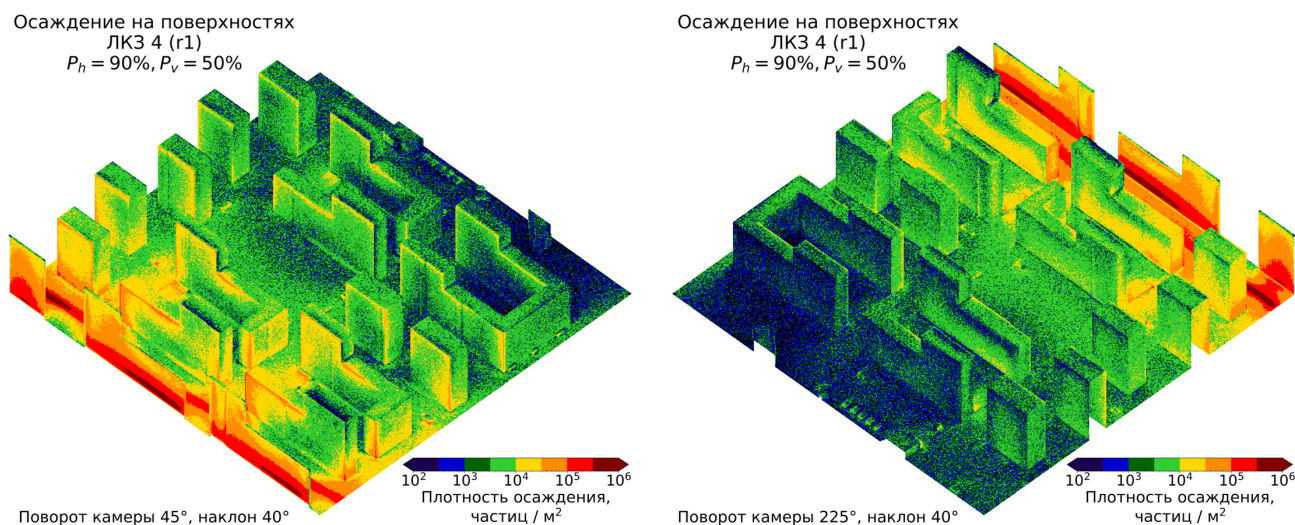


Рисунок 6 – Трёхмерная визуализация плотности суммарного количества осевших частиц на поверхностях зданий и земли (при $P_h = 90\%$, $P_v = 50\%$, нейтральная стратификация), конфигурация ЛКЗ 4 (r1), жилой комплекс «Люблинский парк».

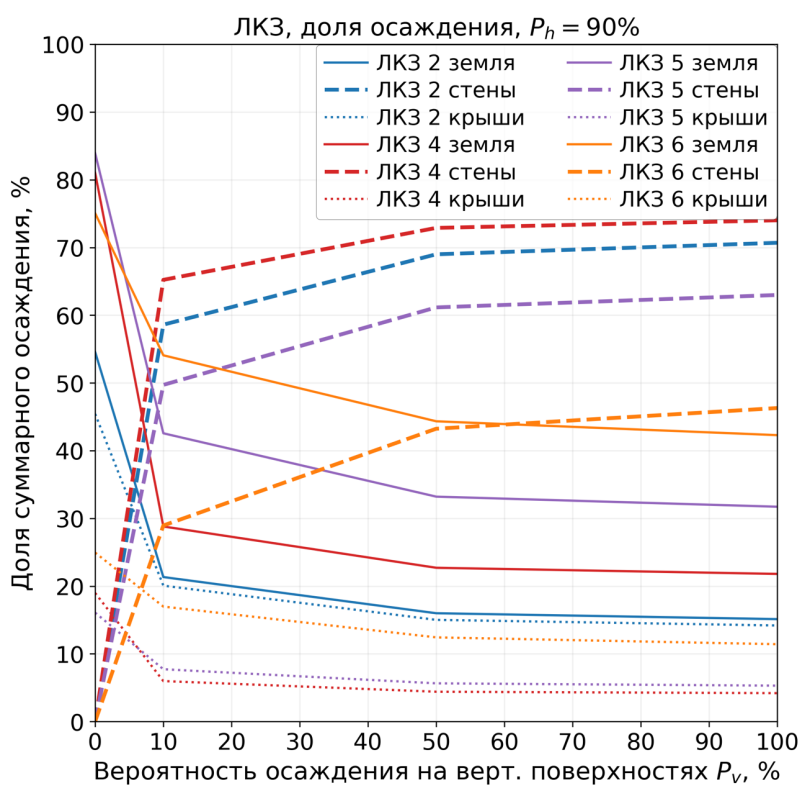


Рисунок 7 – Вклад различных поверхностей в суммарное осаждение $PM_{2.5}$ в среднем по конфигурациям реальной Московской застройки для разных типов ЛКЗ при нейтральной стратификации.

Сравнительный анализ скорости затухания шлейфа (показателя степенной зависимости концентрации от расстояния от источника) для частиц разных размеров показал, что для рассмотренных видов аэрозоля с аэродинамическим диаметром не более 5 мкм (фракции UFP, PM_{2.5}, PM₁₀) неопределённость, вносимая параметризацией граничных условий на стенах (вероятности осаждения), вносит на порядок больший вклад в итоговую изменчивость полей концентрации, чем вариации физических свойств (массы и размера) самих частиц (рис. 8). Это подсвечивает, что корректный учёт фасадного осаждения критически важен для достоверного моделирования переноса и накопления аэрозолей в городе.

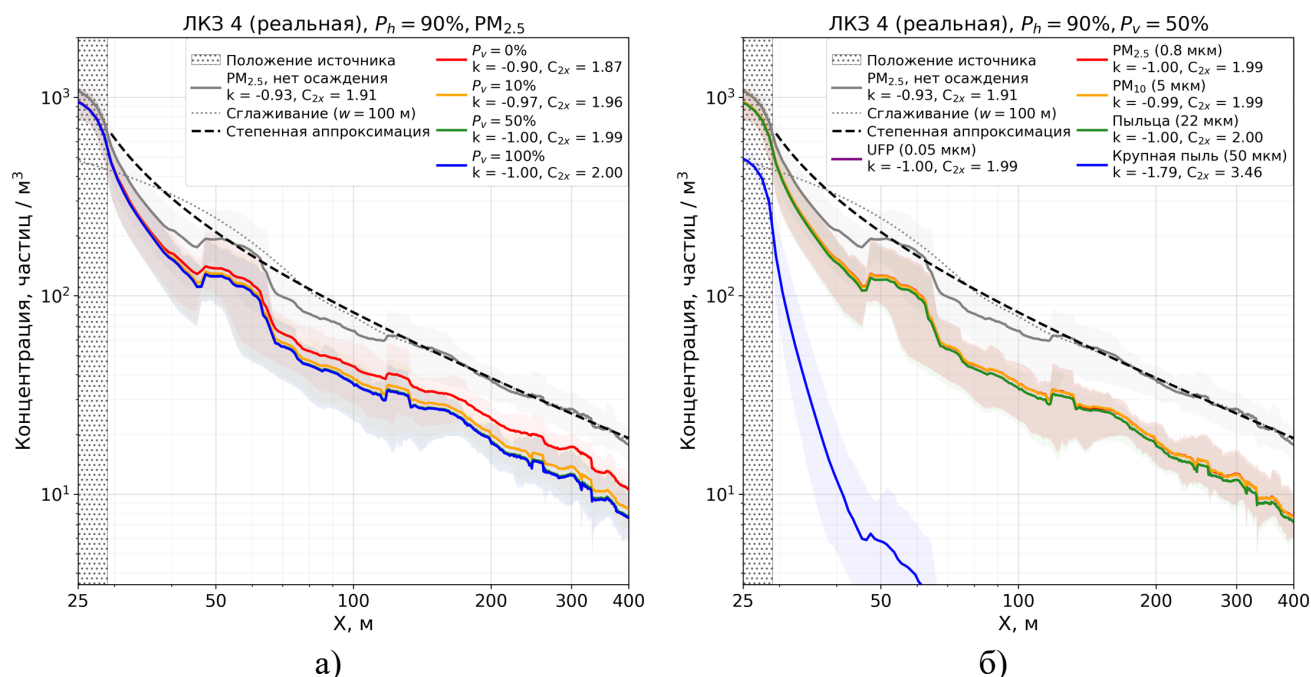


Рисунок 8 – Горизонтальные профили средней концентрации в слое 0-4 м для реальных Московских конфигураций ЛКЗ 4 при нейтральной стратификации. PM_{2.5} с разной вероятностью осаждения на стенах P_v и фиксированной $P_h = 90\%$ (а) и частицы разных размеров и масс с фиксированными $P_v = 50\%$ и $P_h = 90\%$ (б).

Во второй части главы представлена апробация модели на примере жилого комплекса «Люблинский парк» (г. Москва), территория которого относится к типу ЛКЗ 4. Результаты моделирования сопоставлялись с данными натурных измерений накопления частиц фракции PM₁₀ на вертикальных поверхностях – стёклах, расположенных на пяти высотных уровнях противоположных стен уличного каньона (рис. 9). Модельные расчеты подтвердили высокую чувствительность процесса формирования загрязнения фасадов к направлению ветра. Выявлено, что использование осреднённой за длительный период розы ветров даёт слишком сглаженную картину, не соответствующую измерениям – это указывает на то, что для точного сопоставления модельных данных с измерениями

фасадного осаждения необходимо иметь детальные данные о пространственно-временной структуре близлежащих источников и метеорологической обстановки. В то же время для юго-западных (правая часть рис. 9) и южных румбов модель продемонстрировала хорошее качественное согласие с натурными данными, корректно воспроизведя сильную асимметрию загрязнения между сторонами каньона и отсутствие выраженного вертикального градиента осаждения.

В заключении главы формулируется вывод, что сухое осаждение на фасады является самостоятельным и важным механизмом самоочищения воздуха в городском пологее, который следует учитывать при моделировании переноса и осаждения аэрозолей и исследовании аэрозольного загрязнения в городских условиях.

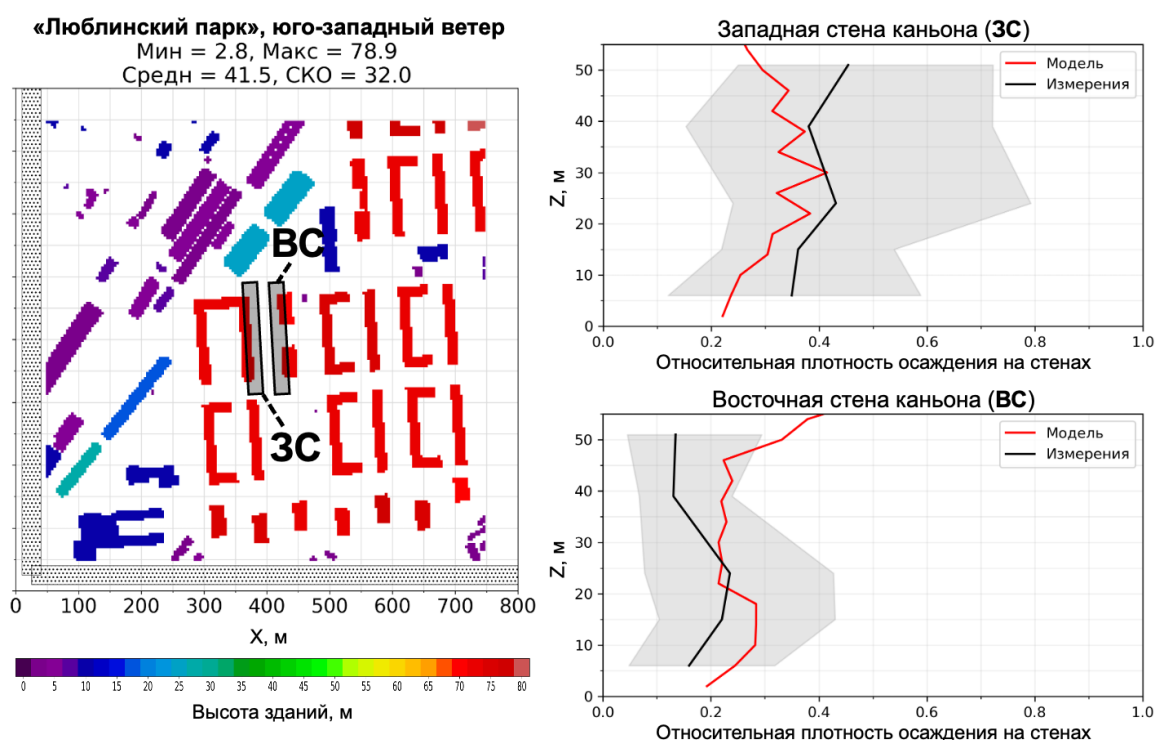


Рисунок 9 – Карта высот застройки в районе жилого комплекса «Люблинский парк», штриховкой обозначены источники (слева). Вертикальные профили выпадения частиц PM_{10} при юго-западном ветре по данным модели и измерений (справа). Серая заливка – диапазон измеренных выпадений за разные периоды. ЗС и ВС – западная и восточная стены каньона, на которых проводились измерения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного диссертационного исследования, посвященного системному изучению закономерностей переноса и осаждения аэрозолей в различных морфологических типах городской среды, получены следующие основные результаты и выводы:

1) Разработана, верифицирована и внедрена в состав вихреразрешающего (LES) гидродинамического комплекса НИВЦ МГУ и ИВМ РАН лагранжева численная модель, описывающая перенос и осаждение аэрозольных частиц. Доказано, что она обеспечивает физически корректное воспроизведение пространственной структуры переноса аэрозолей и применима для решения задач микромасштабного геоэкологического анализа и исследования аэрозольного загрязнения в сложной городской среде.

2) Выявлена смена доминирующих факторов переноса аэрозолей в зависимости от структурной упорядоченности застройки. В регулярных конфигурациях с выраженной анизотропией дисперсия критически определяется зависимой от направления ветра аэродинамикой (ориентация уличных каньонов, индекс фронтальной площади). В нерегулярной среде пространственная хаотичность нивелирует упорядоченные локальные эффекты, и определяющим фактором пространственной дифференциации аэрозольного загрязнения становятся изотропные макропараметры района, независимые от направления воздушного потока.

3) Доказано, что тип локальных климатических зон (ЛКЗ) служит надежным количественным предиктором закономерностей дисперсии аэрозолей (в первую очередь для фоновое загрязнение), однако при наличии локальных источников внутри застройки его необходимо дополнять метриками ориентации относительно ветра, пространственной хаотичности и анизотропии. Это открывает возможности для использования данной концепции в задачах геоэкологического районирования, территориального планирования городов и улучшения прогностических моделей.

4) Установлено, что сухое осаждение мелкодисперсных аэрозолей на вертикальные фасады зданий является мощным механизмом очищения городского воздуха, обеспечивающим до 70% суммарного бюджета стока примеси. Доказано, что для рассмотренных моноразмерных аэрозолей с аэродинамическим диаметром не более 5 мкм (представители фракций UFP, PM_{2.5} и PM₁₀) неопределённость вероятности поглощения частиц фасадами может оказывать большее влияние на изменчивость полей концентрации, чем вариация размера и массы самих частиц.

Направления дальнейшей работы. В рамках развития темы исследования предполагается создание базы данных с результатами модельных расчётов для более широкого набора метеоусловий, типов ЛКЗ и комбинаций источников. Эти данные могут быть использованы для углублённого изучения влияния параметров застройки на перенос и осаждение примесей при неблагоприятных метеоусловиях, а также для обучения моделей прогноза аэрозольного загрязнения в городе на основе машинного обучения. Планируется применение разработанной модели и в прикладных исследованиях, связанных с городским планированием и экологией.

РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук:

1. **Варенцов А.И.**, Имеев О.А., Глазунов А.В., Мортиков Е.В., Степаненко В.М. Численное моделирование переноса твёрдых частиц в атмосферном городском пограничном слое с использованием лагранжева подхода: физические задачи и параллельная реализация // Труды Института системного программирования РАН. 2023. Т. 35. № 4. С. 145–164. EDN: YHKSOZ. 2,31 п.л. Импакт-фактор 0,408 (РИНЦ). Доля участия 1/3.
2. Popovicheva O.B., Chichaeva M.A., Kovach R.G., Zhdanova E.Yu., Stepanenko V.M., **Varentsov A.I.**, Kasimov N.S. Impact of wave COVID-19 responses on black carbon air pollution in Moscow megacity background // Aerosol and Air Quality Research. 2024. vol. 24. № 4. p. 230266. EDN: LPMDDL. 2,94 п.л. Импакт-фактор 0,621 (SJР). Доля участия 1/7.
3. **Varentsov A.I.**, Mortikov E.V., Glazunov A.V., Debolskiy A.V., Kuzmicheva M.A., Stepanenko V.M. Large-eddy simulation of aerosol transport over different urban local climate zones // Geography, Environment, Sustainability. 2025. vol. 18. № 3. pp. 68–79. EDN: ОРМОУІ. 1,39 п.л. Импакт-фактор 0,319 (SJР). Доля участия 1/4.
4. **Varentsov A.**, Mortikov E., Stepanenko V., Glazunov A. An overlooked sink: Quantifying the impact of aerosol deposition on building walls with large eddy simulation // Atmosphere. 2026. vol. 17. № 3. p. 293. EDN: QOMFFV. 2,43 п.л. Импакт-фактор 0,633 (SJР). Доля участия 1/2.