

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 « » августа 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 здоровья населения. Загрязнение атмосферы в городах характеризуется выраженной пространственной неоднородностью, обусловленной сложной морфологией застройки и физико-химическими свойствами подстилающей поверхности [Sokhi et al., 2022]. Различия в условиях переноса и накопления примесей формируют контрасты качества воздуха между районами и кварталами. Поэтому исследование переноса и сухого осаждения аэрозолей представляет не только физическую, но и географическую задачу выявления пространственных закономерностей качества воздуха на неоднородной урбанизированной территории.

Для анализа и прогноза качества воздуха применяется иерархия моделей. Глобальные и региональные химико-транспортные модели из-за грубого пространственного разрешения сглаживают градиенты концентраций и напрямую не учитывают городскую геометрию [Monks et al., 2009]. Сетевые уличные и гауссовы модели часто ошибаются в сложной реалистичной морфологии, а перспективные методы машинного обучения требуют детальных данных и обладают ограниченной физической интерпретируемостью. Поэтому востребовано микромасштабное вихреразрешающее моделирование (LES) в связке с лагранжевым подходом, позволяющее описывать турбулентность и физику движения частиц в городской среде [Guha, 2008; Blocken, 2018].

В качестве пространственного каркаса для анализа и моделирования городской вентиляции и загрязнения воздуха всё активнее используется классификация локальных климатических зон (ЛКЗ) [Stewart, Oke, 2012], типизирующая застройку по морфометрическим свойствам. Однако применимость ЛКЗ как предиктора переноса и накопления примесей остаётся слабо изученной. Неясно, какие процессы определяются типом ЛКЗ, а какие – внутренней структурой застройки [Li et al., 2021; Gál et al., 2025].

Другим важным фактором, часто игнорируемым или упрощаемым в моделях качества воздуха, является сухое осаждение аэрозолей на вертикальные фасады зданий [Mohan, 2016; Farmer et al., 2021]. Большая площадь стен превращает их в мощный фильтр, а отсутствие количественных оценок этого стока для разных типов застройки искажает расчёты локального баланса массы примеси.

Таким образом, системное исследование влияния городской морфологии (на основе ЛКЗ) и фасадного осаждения на дисперсию аэрозолей с использованием современных методов моделирования является актуальной задачей, имеющей фундаментальное и прикладное геоэкологическое и метеорологическое значение.

Степень разработанности темы. Теория атмосферной диффузии и лагранжевых стохастических моделей, в том числе для неоднородной турбулентности, заложена в работах O. Sutton, D. Thomson, B. Sawford, P. Durbin, J.-P. Minier, М.Е. Берлянда, А.В. Глазунова. Структура воздушных потоков и обтекание зданий исследованы Т. Oke, R. Britter, S. Hanna, B. Blocken.

Для анализа качества воздуха используются эйлеровы химико-транспортные (CHIMERE, CMAQ, SILAM и др.), гауссовы уличные (AERMOD, OSPM, SIRANE), микромасштабные модели (PALM, ENVI-met и др.) и методы машинного обучения. Их ограничения в сложной морфологии обобщены Р. Monks, А. Baklanov и R. Sokhi. Для воспроизведения турбулентности в городском полого развиваются LES-модели PALM (B. Maronga), uDALES (T. Grylls) и др., описанные в обзорах B. Blocken и Y. Tominaga.

Классификация локальных климатических зон I. Stewart и Т. Oke всё шире применяется в задачах вентиляции и качества воздуха (M. Demuzere, T. Gál, R. Jiang, M. Amoui). Влияние структуры застройки на аэродинамику и перенос примесей изучено Р. Kastner-Klein, J. Hang, N. Nazarian, R. Plotnick, G. Boeing, а сухое осаждение аэрозолей на городские поверхности, включая фасады, – J. Seinfeld и S. Pandis, S. Mohan, W. Slinn, A. Petroff, L. Thouron и M. Kurppa.

Однако применимость ЛКЗ как предиктора дисперсии примесей с учётом внутренней структуры застройки и роль фасадного осаждения изучены лишь частично. Их комплексное исследование на основе 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 осаждение.

Цель работы – системное исследование и количественная оценка влияния морфологии городской застройки и осаждения на перенос и распределение аэрозольных частиц с различными физическими свойствами на основе вихреразрешающего моделирования.

Задачи работы:

- 1) Разработать, верифицировать и внедрить в вихреразрешающий гидродинамический комплекс лагранжеву численную модель переноса и осаждения частиц, применимую в сложной геометрии городской застройки.
- 2) Сформировать набор идеализированных и реальных (на примере г. Москвы) конфигураций городской застройки различных классов локальных климатических зон (ЛКЗ) для исследования их влияния на атмосферное перемешивание и дисперсию примесей.
- 3) Выявить количественные связи характеристик поля концентрации аэрозолей с типом ЛКЗ и оценить применимость классификации ЛКЗ как предиктора характеристик аэрозольного загрязнения.
- 4) Оценить роль осаждения на вертикальные фасады зданий в формировании пространственной структуры загрязнения и сопоставить её с влиянием физических свойств частиц – размера и массы.

Методы исследования. Основой работы является численное моделирование физических процессов. Атмосферные течения и турбулентность рассчитывались с помощью вихреразрешающей модели НИВЦ МГУ и ИВМ РАН, а траектории аэрозольных частиц — разработанной автором лагранжевой стохастической моделью. Влияние геометрии застройки на перенос аэрозолей исследовалось на основе классификации локальных климатических зон и морфометрических параметров городской геометрии. Результаты численных экспериментов анализировались методами математической статистики.

Научная новизна:

- 1) Разработана новая численная модель переноса и осаждения аэрозольных частиц, сопрягающая лагранжев подход с вихреразрешающей гидродинамической моделью пограничного слоя атмосферы. Доказана её применимость для исследования пространственной структуры концентраций и сухого осаждения частиц в сложной геометрической среде города.
- 2) Впервые количественно выявлена смена доминирующих факторов переноса аэрозолей в зависимости от морфологической упорядоченности застройки. В регулярных конфигурациях с выраженным направлением городских каньонов ключевую роль играют 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 служит не только инструментом параметризации, но и устойчивой географической основой для типизации условий формирования качества воздуха. Для высокоточного анализа классификацию ЛКЗ как предиктор следует дополнять метриками пространственной хаотичности, анизотропии застройки и зависимой от направления ветра фронтальной площади.

4) Получены новые количественные оценки роли фасадов зданий как значимого стока примеси, обеспечивающего до 70 % суммарного потока осаждения и формирующего внутригородскую неоднородность концентраций аэрозолей фракций UFP, PM_{2.5} и PM₁₀. Для данных фракций неопределённость параметризации взаимодействия частиц со стенами может влиять на изменчивость полей концентрации значительно сильнее, чем вариации размера и массы частиц. Формирование загрязнения фасадов в реальной застройке высокочувствительно 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, и развивать методы геоэкологического анализа и районирования территорий по условиям самоочищения атмосферы. Они могут использоваться для совершенствования прогностических моделей качества воздуха, включая методы машинного обучения, за счёт учёта связей ЛКЗ с характеристиками концентраций в городском пологе и ограничений применимости ЛКЗ в регулярной и хаотичной застройке. Показатели затухания шлейфа для разных ЛКЗ применимы в территориальном планировании для минимизации рисков при размещении жилых массивов. Разработанная модель может использоваться для 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 полого 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 разработана и программно реализована лагранжева модель, проведены её тестирование, верификация и интеграция в вихреразрешающую модель НИВЦ МГУ и ИВМ РАН. Выбраны территории моделирования, созданы и проанализированы конфигурации застройки, разработан генератор псевдослучайной застройки. Автором спланированы и проведены все серии численных экспериментов, выполнены анализ и интерпретация результатов, сформулированы выводы и положения, выносимые на защиту.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность обеспечивается применением строгого физико-математического моделирования процессов переноса и осаждения аэрозолей, многоуровневой верификацией лагранжевой модели по аналитическим решениям, натурным измерениям и путём кросс-верификации с независимой эталонной LES-моделью. В качестве пространственного каркаса для классификации застройки применяется принятая в городской климатологии система локальных климатических зон. Результаты основаны на статистической обработке и анализе данных численных экспериментов.

Основные результаты диссертации докладывались на 12 всероссийских и международных конференциях, семинарах и школах, включая ICUC-11 и ICUC-12 (Сидней, 2023; Роттердам, 2025), генеральные ассамблеи EGU (Вена, 2021, 2022), школу ERCA-2024 (Гренобль, 2024), семинар Гидрометцентра России, конференции CITES и ENVIROMIS. Результаты 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 в их решении; 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.; и своим близким: 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 цель и задачи, показана научная новизна и практическая значимость исследования, представлены защищаемые положения и апробация работы.

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

В главе представлен обзор методов исследования и моделирования качества городского воздуха с акцентом на аэрозольное загрязнение. Показано, что

наземный мониторинг не обеспечивает полной пространственно-временной картины распределения примесей в сложной городской застройке, что обуславливает необходимость физико-математического моделирования.

Проанализирована иерархия моделей состава атмосферы и переноса примесей. 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 воспроизводить городскую геометрию и процессы в ней. Гауссовы модели (например, AERMOD), макро-лагранжевы траекторные модели (HYSPLIT, FLEXPART) и модели уличных сетей (OSPM, SIRANE) эффективны для отдельных задач, но могут давать существенные ошибки в сложной морфологии реальных городов.

Перспективными для городских условий являются подходы на основе машинного обучения, например регрессия землепользования, случайный лес, нейросети. При относительно низкой вычислительной стоимости применения они требуют детальных данных для обучения и обоснованного выбора предикторов, целей прогнозирования и ограничений. Это подчёркивает востребованность микромасштабных моделей вычислительной гидродинамики (CFD), предоставляющих детальные данные и позволяющих изучать локальные процессы в городском пограничном слое атмосферы. В городских условиях вихреразрешающее моделирование (LES-модели: PALM, uDALES и др.) во многом превосходит модели на основе осреднённых уравнений (RANS-модели, например, ENVI-met), так как явно учитывает крупные нестационарные вихри.

Рассмотрены физико-математические основы расчёта дисперсии частиц. Эйлеров подход, описывающий диффузию концентраций между ячейками расчётной сетки, не позволяет явно учитывать силы, взаимодействия и столкновения частиц и не воспроизводит их траектории. Лагранжев подход рассчитывает положения и скорости отдельных частиц, позволяя учитывать физику их движения и детальные граничные условия взаимодействия с поверхностями. Обосновано, что инструменты, совмещающие LES и лагранжевы частицы, оптимальны для микромасштабных исследований дисперсии аэрозолей в городской среде. Описаны также подходы к верификации моделей, включая сопоставление с эталонными LES-расчётами.

Для описания морфологии городской застройки введена концепция локальных климатических зон. Классификация применяется при исследовании атмосферных параметров на региональном масштабе, когда отдельные здания явно не разрешаются, и включает 17 классов подстилающей поверхности: 10 городских (рис. 1) и 7 природных. Изначально разработанные для изучения энергетического баланса и температуры в городе, ЛКЗ всё чаще используются как пространственный каркас для моделирования вентиляции и качества воздуха. Однако применимость ЛКЗ в этих задачах требует дальнейшего изучения. Каждый класс задаёт лишь диапазоны геометрических параметров, в пределах которых упорядоченность и анизотропия застройки могут существенно различаться и влиять на воздушные течения и концентрации примесей. Поэтому при оценке ЛКЗ как предиктора переноса и накопления аэрозолей необходимо учитывать внутреннюю структуру застройки.

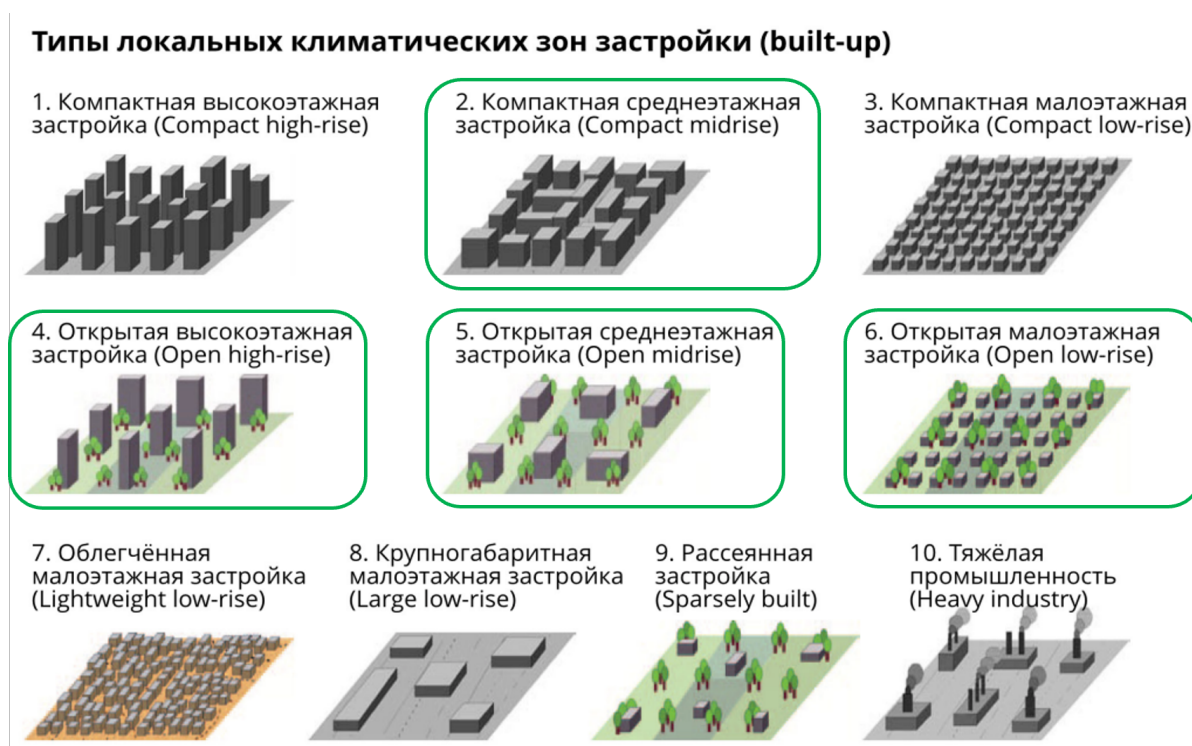


Рисунок 1 – Типы локальных климатических зон для городской застройки [Stewart, Oke, 2012; Самсонов, Тригуб, 2018]. Зелёным выделены исследуемые далее типы.

Отдельно рассмотрено сухое осаждение аэрозолей на городские поверхности, включая стены зданий. В масштабе города потоки осаждения на стены могут быть сопоставимы с потоками на крыши. Микромасштабные эксперименты показывают образование зон активного осаждения вблизи областей сильной турбулентности на

зданиях, а учёт фасадного осаждения может более чем на 20 % снижать концентрацию частиц в уличных каньонах. Однако единый подход к параметризации этого процесса отсутствует, а в микромасштабных моделях он часто игнорируется. Это определяет необходимость численных экспериментов для оценки влияния фасадного осаждения на перенос и накопление примесей в городском пологее.

В заключении главы отмечены основные пробелы: недостаточная изученность применимости ЛКЗ с учётом внутренней структуры и хаотичности застройки, а также неопределённость роли фасадного сухого осаждения. Эти вопросы определяют актуальность и направления дальнейших исследований, представленных в диссертации.

Глава 2. Модель лагранжева переноса частиц

В главе представлены описание и результаты верификации разработанной модели лагранжева переноса частиц. Выбор лагранжева подхода обусловлен его информативностью и возможностью явно учитывать силы, действующие на отдельные частицы, что важно для моделирования в сложной геометрической среде города.

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

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

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

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, F_D – коэффициент силы аэродинамического сопротивления среды, рассчитываемый на основе закона Стокса.

Для описания не разрешаемой на сетке мелкомасштабной турбулентности реализованы стохастические параметризации различных порядков. Для пассивных аэрозолей (без инерции) используется модель случайных смещений (RDM), в которой система (1)–(2) упрощается: изменение координаты частицы x_i^p по i -ой оси рассчитывается с учётом явно разрешённой скорости потока $\bar{u}_i$, скорости

гравитационного оседания $u_{s,i}$ по закону Стокса и подсеточной турбулентности с дрейфовой коррекцией (для предотвращения нефизического скопления 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 для i -ой оси, K_s – коэффициент турбулентной диффузии. Также реализована в нескольких вариантах стохастическая модель первого порядка на базе уравнения Ланжевена (LSM), 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, $\sigma_{u_i}^2$ – дисперсия компоненты скорости потока для i -ой оси.

Модель включает блоки расчёта распада частиц с ограниченным временем жизни (для биоаэрозолей), параметризацию обратного влияния экстремальных концентраций на стратификацию атмосферы, механизмы вероятностного осаждения и упругого отскока от твёрдых поверхностей. Поддерживаются высокоточная «полигональная» геометрия зданий и оптимизированная «сеточная» аппроксимация объектов. Для расчёта ансамблей до сотен миллионов частиц код оптимизирован с применением параллельного программирования.

Многоуровневая верификация подтвердила точность модели. Сравнение с аналитическими решениями для логарифмического пограничного слоя и течения Куэтта показало качественное совпадение и высокую корреляцию ($r = 0.96$ – 0.99) расчётных и теоретических профилей концентрации. Валидация по данным натурных измерений в песчаных бурях (рис. 2б) показала хорошее согласие с эмпирическими профилями массовой концентрации песчаных частиц (рис. 2в). Кросс-верификация с независимой эталонной LES-моделью IBM RAN [Glazunov, 2018] для регулярной застройки показала, что RDM и один из вариантов LSM корректно воспроизводят структуру шлейфа примеси при нейтральной и устойчивой термической стратификации.

Разработанный код интегрирован в вихреразрешающую модель НИВЦ МГУ и IBM RAN (MSU LES) [Varentsov et al., 2025] как отдельный программный модуль (рис. 2а). Прямой доступ лагранжева блока к мгновенным трёхмерным полям

метеовеличин и турбулентности «на лету» позволил исследовать взаимодействие частиц с явно разрешёнными нестационарными вихревыми структурами в городской застройке.

В заключении главы определены обусловленные принятыми допущениями границы применимости метода: не учитываются коагуляция частиц, фазовые переходы, химические превращения, влажное осаждение и сальтация. Созданный и верифицированный инструментарий является надёжным средством исследования переноса аэрозолей в городском воздухе.

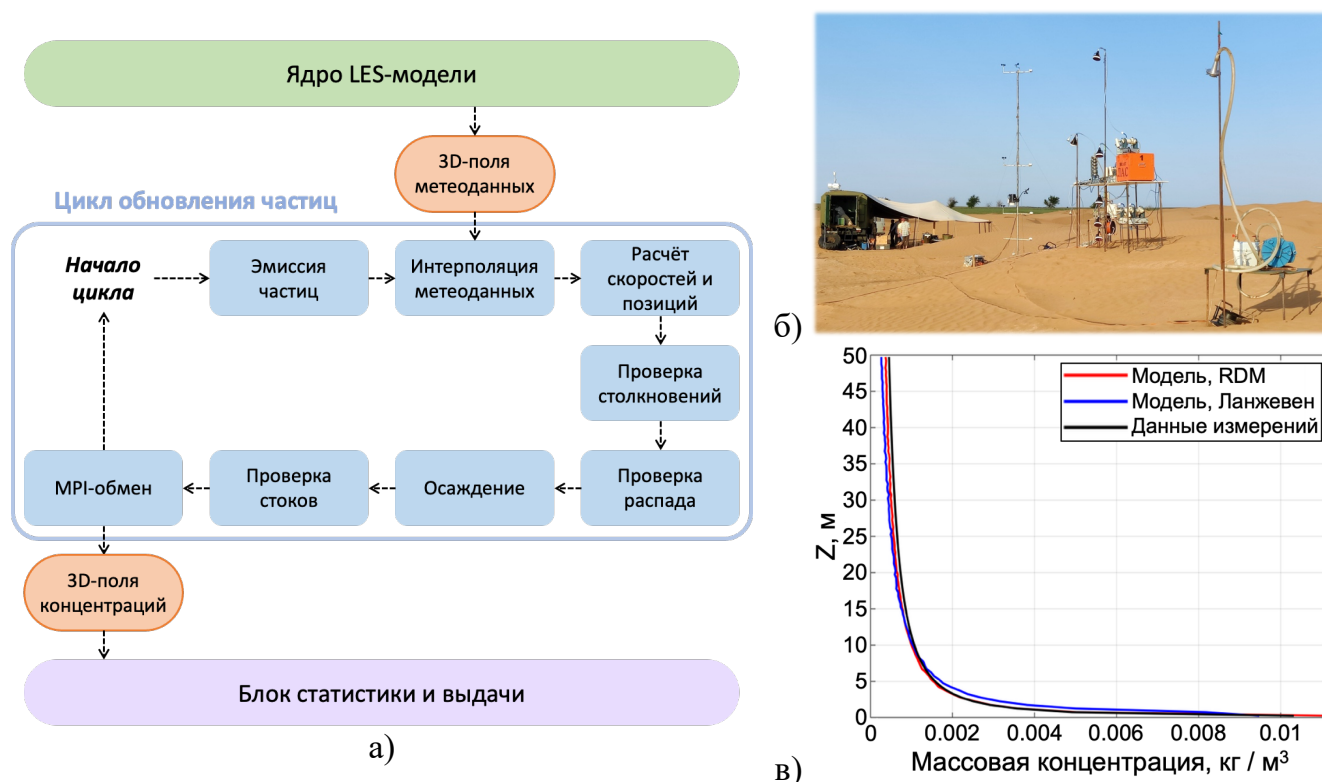


Рисунок 2 – Алгоритм работы модуля лагранжева переноса частиц в LES-модели НИВЦ МГУ и ИВМ РАН (а). Комплекс для измерения концентраций частиц в полупустыне, п. Нарын-Худук, Калмыкия (б). Эмпирические (аппроксимация данных измерений) и рассчитанные лагранжевой моделью профили концентрации песчаных частиц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

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

В третьей главе представлены результаты численных экспериментов в вихреразрешающей модели НИВЦ МГУ и ИВМ РАН по исследованию влияния городской морфологии на дисперсию аэрозолей. Выбраны четыре типа локальных

климатических зон, характерные для Москвы: ЛКЗ 4 (открытая многоэтажная застройка, 44 % застроенной площади Москвы), ЛКЗ 6 (открытая малоэтажная, 26 %), ЛКЗ 5 (открытая среднеэтажная, 10 %) и ЛКЗ 2 (компактная среднеэтажная, 28 % застройки в центре города). Для каждого типа отобрано по пять реальных локаций, соответствующих заданным морфометрическим критериям (рис. 3).

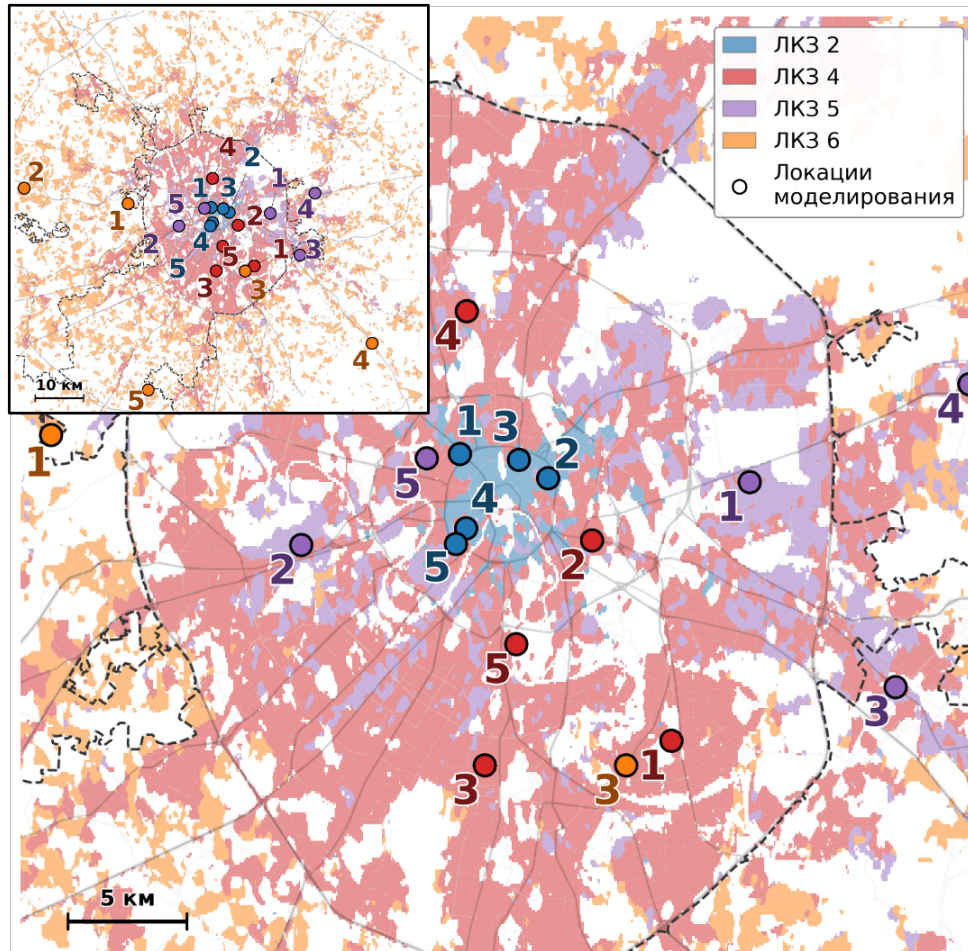
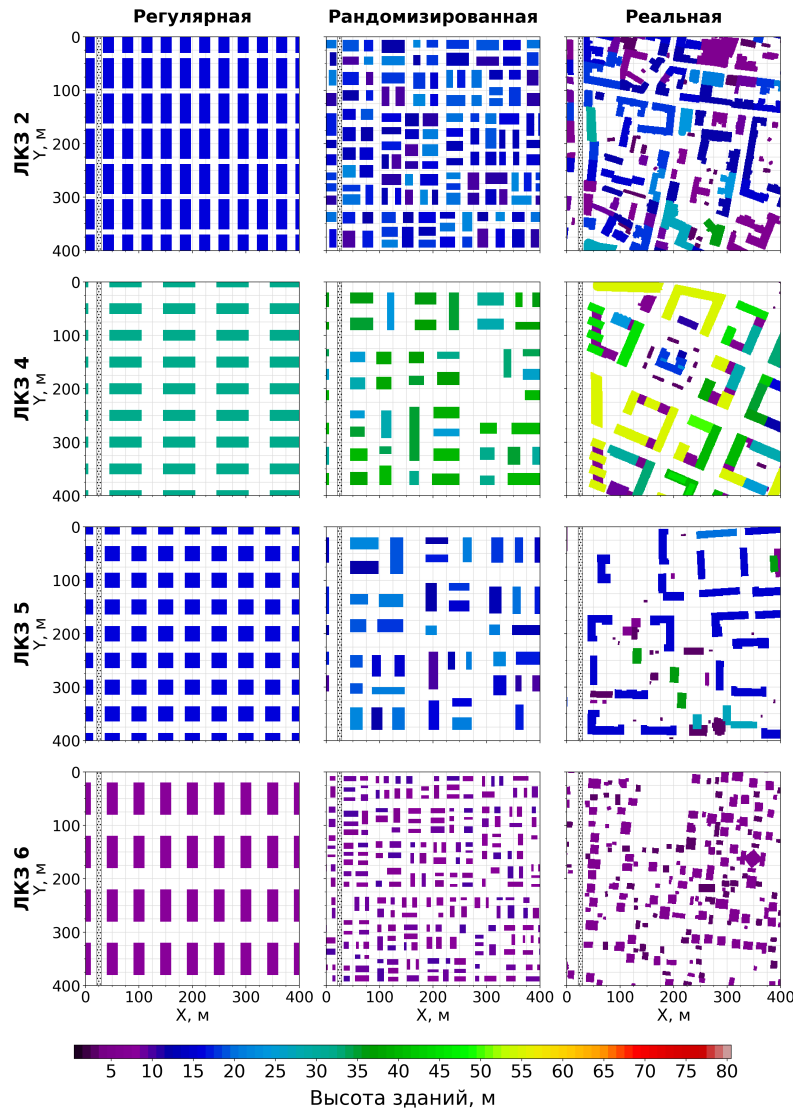


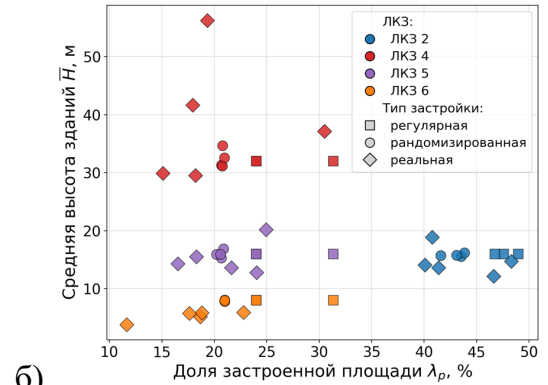
Рисунок 3 – Карта типов ЛКЗ в Москве и области; точки – локации моделирования реальной застройки (по 5 для каждой выбранной ЛКЗ). Карта построена по данным региональной карты ЛКЗ Москвы и окрестностей [Varentsov et al., 2020] и глобальной карты ЛКЗ [Demuzere et al., 2022].

Выборка позволяет изолированно оценить влияние высоты зданий при фиксированной плотности (ЛКЗ 4, 5, 6) и плотности при фиксированной высоте (ЛКЗ 2 и 5). По открытым геоданным (OpenStreetMap, Яндекс Карты) для выбранных территорий сформированы карты высот. Дополнительно созданы конфигурации для крайних случаев пространственной упорядоченности: идеализированные регулярные (по 3 варианта для каждого типа ЛКЗ) и

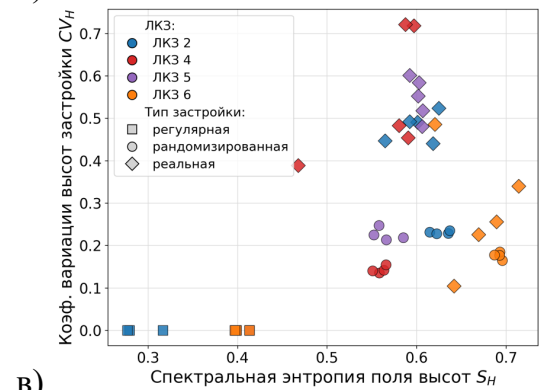
рандомизированные (по 4 варианта). Последние формировались разработанным генератором псевдослучайной геометрии при сохранении основных морфометрических индексов целевой ЛКЗ: средней высоты, доли застроенной площади и отношения аспекта каньона. Объединённая выборка составила 48 конфигураций (рис. 4а).



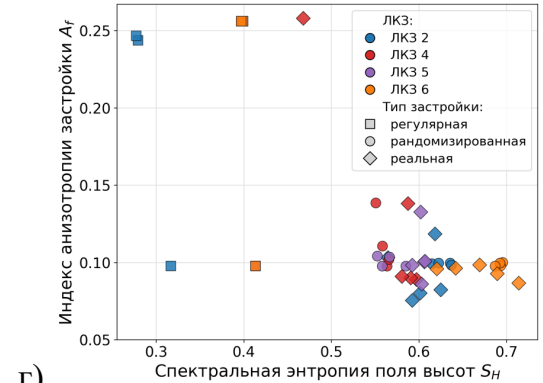
а)



б)



в)



г)

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

Полученные конфигурации характеризуются широким разбросом средней высоты и плотности застройки в пределах значений каждой ЛКЗ (рис. 4б). Структурная неоднородность оценивалась метриками пространственной хаотичности (рис. 4в): коэффициентом вариации высот зданий CV_H (относительный разброс высот) и спектральной энтропией Шеннона двумерного поля высот S_H (мера многомасштабности и нерегулярности застройки; низкие значения соответствуют регулярной решётке, высокие – нерегулярной застройке разной высоты). Индекс анизотропии A_f (рис. 4г), равный коэффициенту вариации индекса фронтальной площади по направлениям ветра, характеризует направленность застройки: $A_f = 0$ соответствует изотропной геометрии, а высокие значения – выражено ориентированным каньоном.

По CV_H и S_H конфигурации разделяются на три кластера (рис. 4в): регулярные с минимальной хаотичностью, рандомизированные с высокой энтропией и умеренной дисперсией высот, реальные с максимальной хаотичностью по обоим показателям. Высокая анизотропия A_f характерна преимущественно для регулярной застройки с выраженной ориентацией каньонов (рис. 4г), тогда как в хаотичной застройке она снижается вследствие усреднения по разным масштабам и ориентациям зданий. Таким образом, при одинаковых средних морфометрических параметрах, определяющих тип ЛКЗ, внутренняя структура застройки может существенно различаться.

По рассчитанным полям концентрации $PM_{2.5}$ проведён статистический анализ пространственного распределения частиц с расчётом вертикальных профилей коэффициента вариации (рис. 5). Выявлен двойственный характер влияния городской морфологии. В регулярной застройке поля концентрации сильно зависят от ориентации улиц и анизотропии: изменчивость между конфигурациями одного типа ЛКЗ (внутриклассовая) может превышать различия между типами ЛКЗ (межклассовую изменчивость) (рис. 5а) или быть сопоставимой с ними (рис. 5б). В перпендикулярных ветру каньонах вертикальное перемешивание выносит аэрозоли выше крыш, а в параллельных каньонах каналирование вдоль улиц усиливает горизонтальный перенос, повышая концентрации внутри полого и снижая их над ним. Поэтому максимумы изменчивости расположены у земли и высоко над городским пологом, а точка перегиба – немного выше крыш.

В рандомизированной застройке пространственная неоднородность

сглаживает локальные аэродинамические эффекты, поэтому межклассовая изменчивость стабильно доминирует над внутриклассовой (рис. 5а, 5б, по центру). Реальная застройка занимает промежуточное положение: межклассовая изменчивость доминирует для фоновых источников и сопоставима с внутриклассовой для уличного. Эти закономерности сохраняются при переходе от нейтральной к слабоустойчивой стратификации атмосферы.

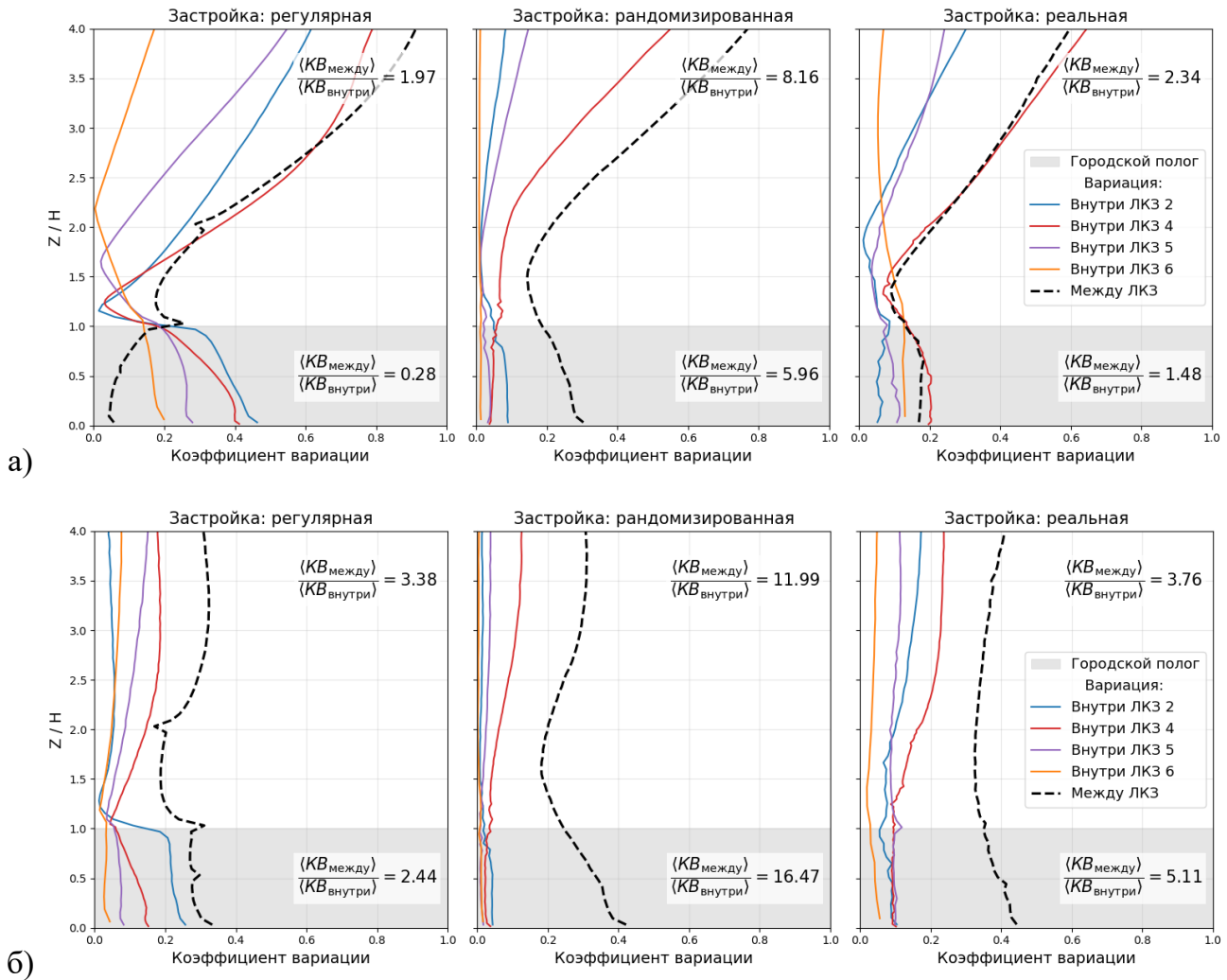


Рисунок 5 – Вертикальные профили коэффициента вариации (KV) концентрации для приповерхностного источника (а, «выбросы с дороги») и перемешанного по высоте источника (б, «фоновое загрязнение»). Цветные линии – изменчивость между конфигурациями внутри одного типа ЛКЗ (внутриклассовая), чёрная – между типами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

Для проверки необходимости учёта внутренней структуры застройки наряду с классификацией ЛКЗ построены линейные регрессионные модели. Характеристики поля концентрации – средняя концентрация в слое 0–4 м над землёй $\bar{C}_{0-4м}$ и доля частиц в городском пологе $\bar{C}_H/\bar{C}_{4H}$ – аппроксимировались по типу ЛКЗ и морфометрическим индексам: A_f , S_H и относительному индексу фронтальной площади $\tilde{\lambda}_f$, характеризующему ориентацию каньонов относительно ветра. В модели регрессии последовательно добавлялись физически интерпретируемые предикторы:

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

где α_{LCZ} – категориальный эффект класса ЛКЗ (индикаторные переменные).

Модель М2 добавляет к ЛКЗ-классификации направленность застройки: используется отклонение $\tilde{\lambda}_f$ от среднего по всем румбам, равного единице. Это позволяет описать переход 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 прямую зависимость эффекта направленности от A_f , поскольку выраженные оси застройки могут усиливать канализирующий или блокирующий эффект каньонов, и обратную – от S_H , поскольку хаотичность размывает направленный геометрический эффект. Поэтому член $(\tilde{\lambda}_f - 1)$ умножается на A_f и делится на S_H , объединяя три морфометрические характеристики в единый физически интерпретируемый предиктор.

Качество моделей оценивалось с помощью скорректированного коэффициента детерминации R^2 (табл. 1). Базовая ЛКЗ-модель М1 имеет низкую описательную способность для регулярной застройки ($R^2 < 0$ для $\bar{C}_{0-4м}$ при уличном источнике), поскольку не учитывает ориентацию каньонов относительно ветра. Сравнение строк «Все» и «Регулярные» в табл. 1 показывает, что информативность ЛКЗ значительно ниже в регулярной выборке, но в полной выборке с рандомизированными и реальными конфигурациями ЛКЗ-классификация даёт значимый вклад. Это согласуется с доминированием межклассовой изменчивости над внутриклассовой в нерегулярной среде (рис. 5).

Учёт ориентации каньонов в М2 повышает R^2 с -0.35 до 0.46 , а включение в М3 A_f и $1/S_H$ в единый предиктор – до 0.71 в регулярной и полной выборках. Приповерхностная концентрация при уличном источнике чувствительнее к геометрии застройки, чем доля частиц в каньоне: для неё вклад М2 и М3 максимален. При фоновом загрязнении классификация ЛКЗ сама по себе остаётся достаточно надёжным предиктором, а роль направленных морфометрических характеристик снижается.

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 пологе). Источники: «уличный» – приповерхностный; «фоновый» – перемешанный по высоте. Модели из уравнения (5): М1: $y = f(\text{ЛКЗ})$, М2: $y = f(\text{ЛКЗ}, \tilde{\lambda}_f)$, М3: $y = f(\text{ЛКЗ}, \tilde{\lambda}_f, A_f, S_H)$. Зелёным выделены лучшие модели в ряду. R^2 рассчитан на той же выборке, на которой подгонялись модели, и характеризует долю объяснённой дисперсии, а не прогностическое качество.

Источник	Метрика	Выборка конфигураций	Модель		
			М1	М2	М3
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

В заключении главы отмечено, что классификация ЛКЗ может служить предиктором различий в переносе и накоплении аэрозолей между территориями города. Для более точного описания полей концентрации, особенно при локальных источниках внутри застройки, её следует дополнять параметрами ориентации каньонов относительно ветра, анизотропии и пространственной хаотичности застройки.

Глава 4. Моделирование процессов осаждения частиц

В четвёртой главе исследовано сухое осаждение аэрозолей на городские поверхности с акцентом на вертикальные стены (фасады) зданий – фактор, часто игнорируемый в моделях дисперсии примесей и слабо изученный с точки зрения влияния на качество воздуха.

В первой части главы проведены численные эксперименты по разделению вклада разных поверхностей в очищение атмосферы городского полога. Для конфигураций реальной застройки Москвы (ЛКЗ 2, 4, 5, 6) оценена чувствительность полей концентрации к вероятности осаждения частиц на горизонтальные (P_h) и вертикальные (P_v) поверхности.

Плотность осаждения на фасадах крайне неоднородна: максимумы локализуются на наветренных сторонах зданий и боковых гранях в зонах отрыва потока (рис. 6).

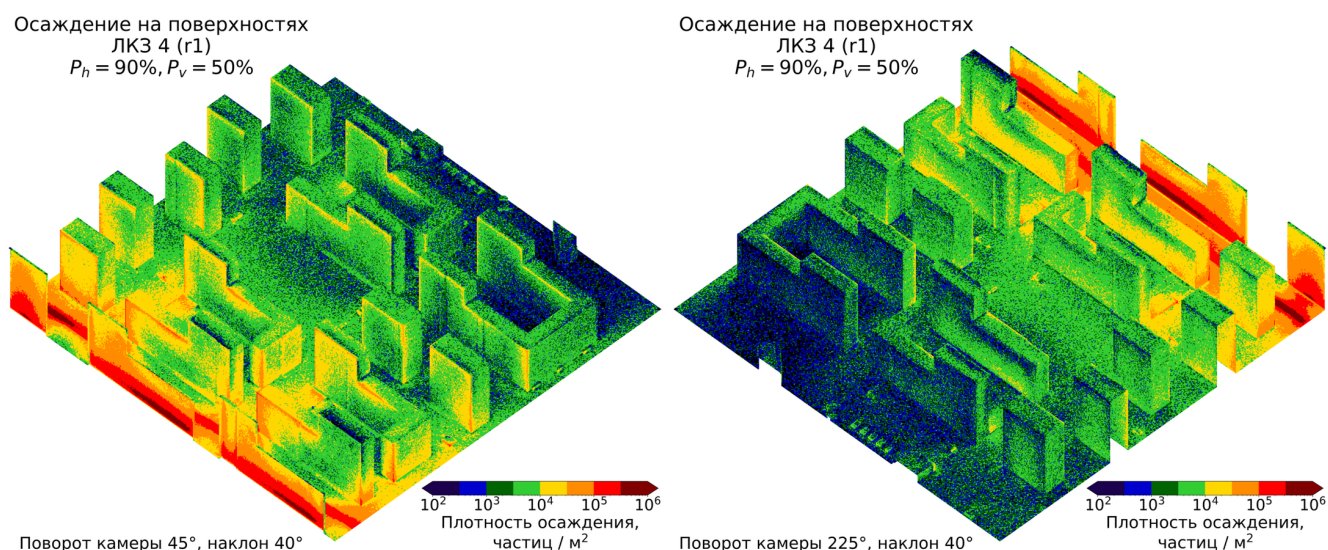


Рисунок 6 – Трёхмерная визуализация плотности суммарного числа осевших частиц на поверхностях зданий и земли ($P_h = 90\%$, $P_v = 50\%$, нейтральная стратификация), конфигурация ЛКЗ 4 (r1), жилой комплекс «Люблинский парк».

Стены служат значимым стоком для всех рассмотренных типов ЛКЗ и доминирующим – для ЛКЗ 2, 4 и 5 вследствие большой площади вертикальных поверхностей (рис. 7). В открытой многоэтажной (ЛКЗ 4) и плотной среднеэтажной застройке (ЛКЗ 2) на фасады приходится до 70 % всех осажжённых частиц.

Зависимость приземной концентрации от вероятности осаждения на стены нелинейна: уже при $P_v = 10\%$ концентрация на удалении от источника снижается на 25–30 %, а при полном поглощении ($P_v = 100\%$) – в среднем вдвое.

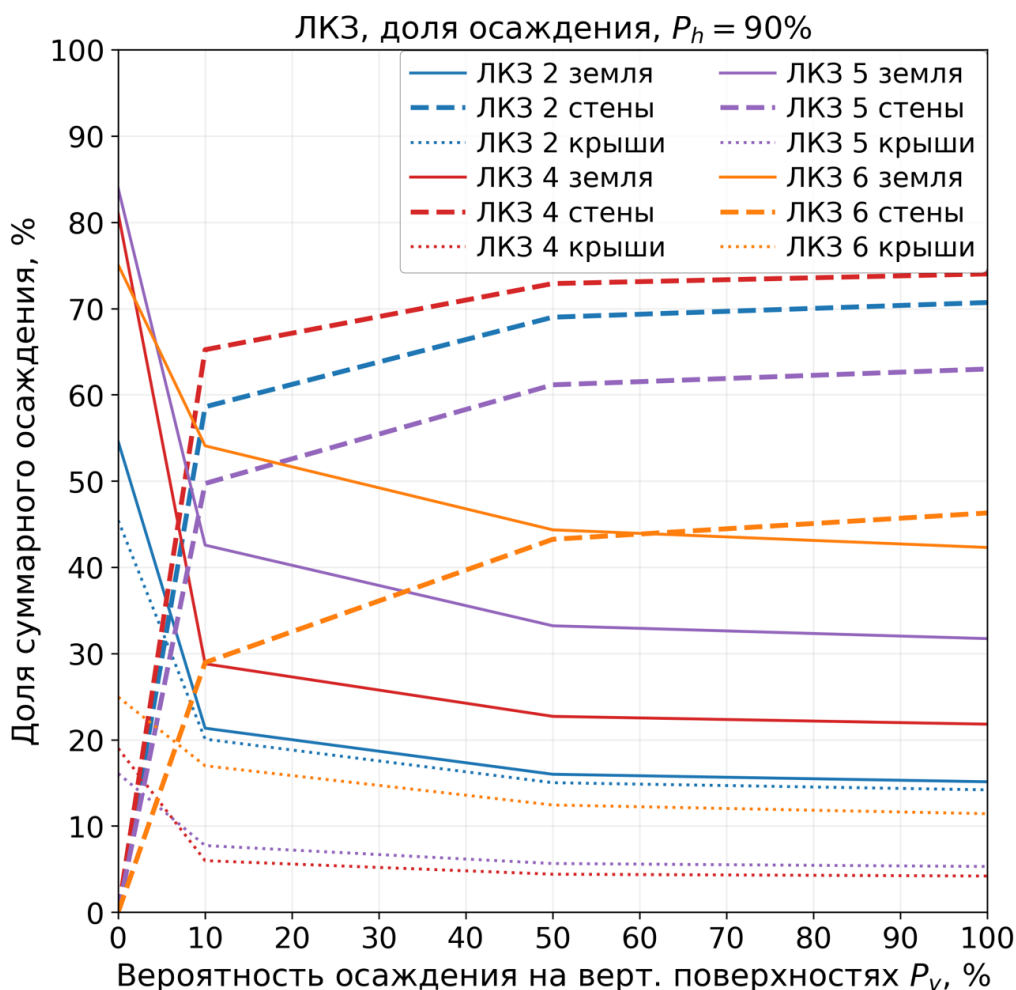


Рисунок 7 – Вклад различных поверхностей в суммарное осаждение $PM_{2.5}$ в среднем по конфигурациям реальной московской застройки для разных типов ЛКЗ, нейтральная стратификация.

Анализ скорости затухания шлейфа – показателя степенной зависимости концентрации от расстояния до источника – показал, что для рассмотренных аэрозолей с аэродинамическим диаметром не более 5 мкм (фракции UFP, $PM_{2.5}$, PM_{10}) параметризация граничных условий на стенах вносит в изменчивость полей концентрации на порядок больший вклад, чем вариации массы и размера частиц (рис. 8). Следовательно, корректный учёт фасадного осаждения критически важен для достоверного моделирования переноса и накопления аэрозолей в городе.

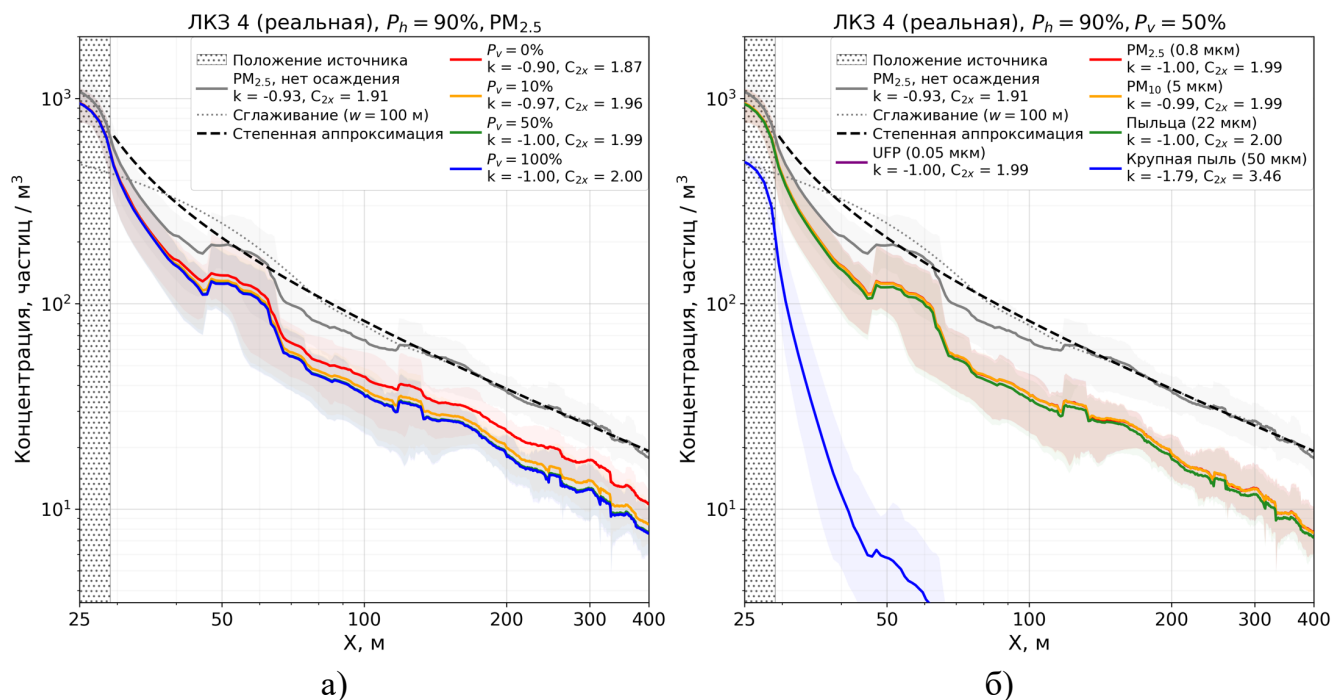


Рисунок 8 – Горизонтальные профили средней концентрации в слое 0–4 м для реальных московских конфигураций ЛКЗ 4 при нейтральной стратификации: $PM_{2.5}$ при разных P_v и фиксированной $P_h = 90\%$ (а); частицы разных размеров и масс при $P_v = 50\%$ и $P_h = 90\%$ (б).

Во второй части главы модель апробирована на примере жилого комплекса «Люблинский парк» (г. Москва), относящегося к ЛКЗ 4. Результаты сопоставлены с натурными измерениями накопления PM_{10} на стёклах, расположенных на пяти высотных уровнях противоположных стен уличного каньона (рис. 9). Расчёты подтвердили высокую чувствительность загрязнения фасадов к направлению ветра. Осреднённая за длительный период роза ветров даёт чрезмерно сглаженную картину, не соответствующую измерениям. Поэтому для точного сопоставления необходимы детальные данные о пространственно-временной структуре близлежащих источников и метеорологической обстановке. Для юго-западного (правая часть рис. 9) и южного ветра модель показала хорошее качественное согласие с натурными данными, воспроизведя сильную асимметрию загрязнения сторон каньона и отсутствие выраженного вертикального градиента осаднения.

В заключении главы отмечено, что сухое осаднение на фасады является самостоятельным значимым механизмом самоочищения городского полога, который необходимо учитывать при моделировании переноса и осаднения аэрозолей.

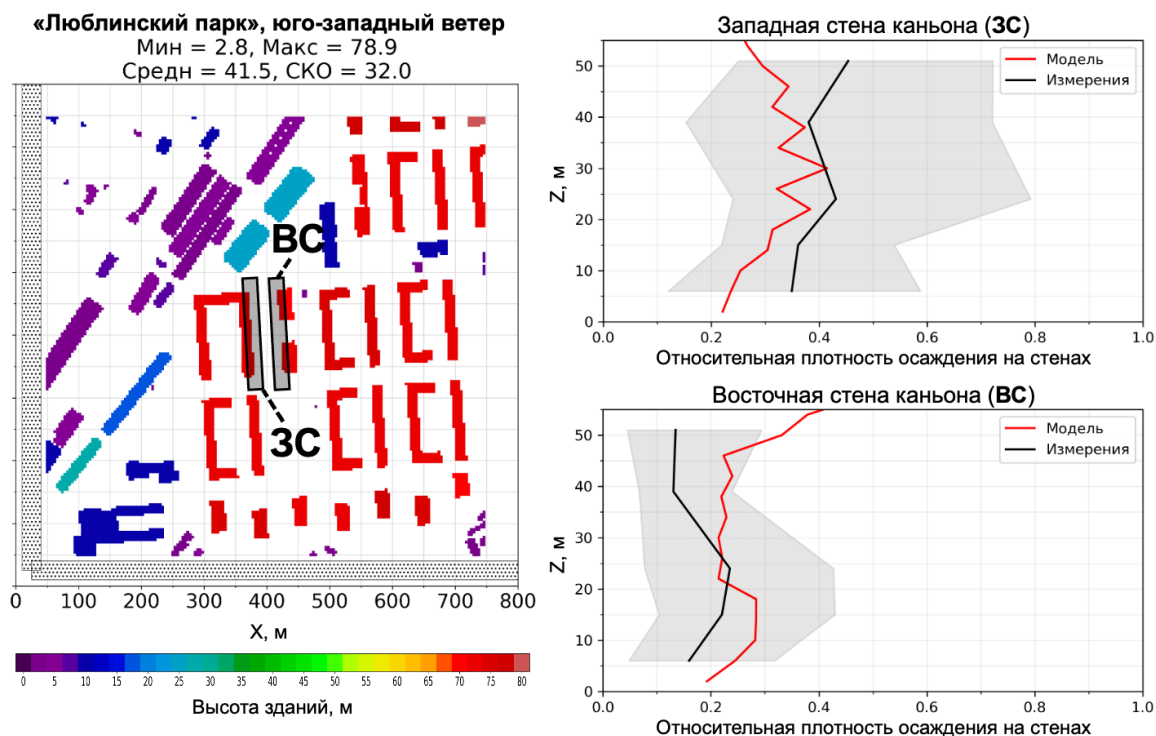


Рисунок 9 – Карта высот застройки в районе жилого комплекса «Люблинский парк», штриховка – источники (слева). Вертикальные профили выпадения частиц PM_{10} при юго-западном ветре по данным модели и измерений (справа). Серая заливка – размах измерений за разные периоды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования закономерностей переноса и осаждения аэрозолей в различных морфологических типах городской среды получены следующие основные результаты и выводы:

1) Разработана, верифицирована и внедрена в вихреразрешающий (LES) гидродинамический комплекс НИВЦ МГУ и ИВМ РАН лагранжева численная модель переноса и осаждения аэрозольных частиц. Она физически корректно воспроизводит пространственную структуру переноса аэрозолей и применима для микромасштабного геоэкологического анализа и исследования аэрозольного загрязнения в сложной городской среде.

2) Выявлена смена доминирующих факторов переноса аэрозолей в зависимости от упорядоченности застройки. В регулярных конфигурациях с выраженной анизотропией дисперсия определяется зависимой от направления ветра аэродинамикой – ориентацией уличных каньонов и индексом фронтальной площади. В нерегулярной среде пространственная хаотичность нивелирует

локальные направленные эффекты, и основными факторами пространственной дифференциации загрязнения становятся изотропные макропараметры района, не зависящие от направления воздушного потока.

3) Доказано, что тип локальной климатической зоны служит важным количественным предиктором дисперсии аэрозолей, прежде всего для фонового загрязнения. При наличии локальных источников внутри застройки его следует дополнять метриками ориентации относительно ветра, пространственной хаотичности и анизотропии. Это позволяет использовать концепцию ЛКЗ в геоэкологическом районировании, территориальном планировании городов и совершенствовании прогностических моделей.

4) Установлено, что сухое осаждение мелкодисперсных аэрозолей на фасады зданий является значимым механизмом очищения городского воздуха, обеспечивающим до 70 % суммарного потока осаждения. Для рассмотренных моноразмерных аэрозолей с аэродинамическим диаметром не более 5 мкм, представляющих фракции UFP, PM_{2.5} и PM₁₀, неопределённость вероятности поглощения частиц фасадами может сильнее влиять на изменчивость полей концентрации, чем вариации размера и массы частиц.

Направления дальнейшей работы. Предполагается создание базы результатов модельных расчётов для более широкого набора метеоусловий, типов ЛКЗ и комбинаций источников. Она может использоваться для изучения влияния параметров застройки на перенос и осаждение примесей при неблагоприятных метеоусловиях и обучения моделей прогноза городского аэрозольного загрязнения на основе машинного обучения. Планируется также применение разработанной модели в прикладных исследованиях городского планирования и экологии.

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: OPMOYI. 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.