

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ФГБУ «Гидрометцентр России»

по диссертационной работе Ладохиной Екатерины Михайловны
«Численное моделирование влияния свойств городской застройки Санкт-Петербурга на
метеорологические поля»,
подготовленной для представления на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.6.18 – Науки об атмосфере и климате

Диссертационная работа Ладохиной Екатерины Михайловны «Численное моделирование влияния свойств городской застройки Санкт-Петербурга на метеорологические поля» выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (ФГБУ «Гидрометцентр России»).

Соискатель Ладохина Екатерина Михайловна в 2018 году с отличием **окончила** магистратуру Российского Государственного Гидрометеорологического Университета по специальности «Прикладная метеорология». В период с 2020 по 2024 гг. обучалась в аспирантуре ФГБУ «Гидрометцентр России». С 2017 года **работает** ведущим инженером в отделе новых технологий ФГБУ «Северо-Западное УГМС».

Научный руководитель — **Рубинштейн Константин Григорьевич**, доктор физико-математических наук, ФГБУ «Гидрометцентр России», Отдел долгосрочных прогнозов погоды, ведущий научный сотрудник.

Актуальность выполненного исследования

Актуальность исследования обусловлена растущей потребностью в повышении устойчивости городов к опасным погодно-климатическим воздействиям, прогнозировании неблагоприятных метеорологических условий для городов, в том числе с помощью численного моделирования. Для Санкт-Петербурга с его темпом нового строительства, а также контрастным сочетанием урбанизированных и водных поверхностей, проблема учета реальных характеристик городской застройки в мезомасштабной прогностической модели стоит особенно остро.

Целью работы являлось создание оптимальной конфигурации мезомасштабной прогностической модели для территории Санкт-Петербурга, учитывающей реальные характеристики городской застройки.

Для достижения цели работы решались следующие задачи:

1. Собрать и проанализировать данные метеорологических наблюдений, чтобы выявить локальные эффекты влияния городской застройки Санкт-Петербурга на приземные метеорологические поля, а также определить периоды их максимальной интенсивности для проведения численных экспериментов.
2. Разработать методику анализа чувствительности приземных метеорологических полей к параметрам урбанизированной поверхности Санкт-Петербурга.
3. Применить метод оптимизации численных расчётов для сокращения вычислительных затрат при анализе чувствительности мезомасштабной модели к параметрам урбанизированной поверхности Санкт-Петербурга.
4. На основе анализа чувствительности метеорологических полей мезомасштабной модели к изменению параметров подстилающей поверхности выявить параметры, оказывающие наибольшее влияние и, как следствие, требующие уточнения для последующего

проведения численных экспериментов с моделями городского подслоя различной сложности в регионе Санкт-Петербурга.

5. Провести серию численных экспериментов с использованием простой параметризации городского подслоя (SLAB) и оценить возможности и ограничения ее применения для прогноза эффектов влияния городской застройки на поля метеорологических величин.

6. Подготовить данные о трёхмерной структуре городской застройки Санкт-Петербурга и провести численные эксперименты с многоуровневой моделью городского подслоя (VER_VEM).

7. Провести сравнительный анализ результатов численных экспериментов с использованием параметризаций SLAB и VER_VEM.

8. Провести верификацию результатов численных экспериментов с разработанной конфигурацией мезомасштабной прогностической модели по данным наблюдений.

9. Выработать рекомендации к внедрению в практику ФГБУ «Северо-Западное УГМС» результатов работы.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработана методика анализа чувствительности приземных метеорологических полей к пяти параметрам урбанизированной поверхности Санкт-Петербурга на основе индексов Соболя (ST). Установлено, что в течение суток шероховатость оказывает наибольшее влияние на скорость ветра (ST = 0,7 днём; 0,9 ночью), а также – на относительную влажность (ST = 0,8) и высоту пограничного слоя (ST = 0,6) в течение ночи. Тепловая инерция оказывает доминирующее влияние на температуру ночью (ST = 0,6), альбедо – на температуру и высоту пограничного слоя днём (ST = 0,8 и ST = 0,7), влагосодержание почвы – на относительную влажность днём (ST = 0,8).

2. Выявлены ограничения мезомасштабной модели с простой параметризацией городского подслоя: упрощенное представление геометрии застройки приводит к систематическому завышению скорости ветра на городской станции (дисперсия ошибки относительно наблюдений 1,2..2,0 м²/с²); упрощённое описание влагообмена и отсутствие учета антропогенных источников тепла обуславливает завышение относительной влажности и занижение интенсивности острова тепла Санкт-Петербурга.

3. Создана конфигурация мезомасштабной прогностической модели высокого пространственного разрешения с многоуровневой параметризацией городского подслоя, учитывающая данные о геометрических свойствах застройки Санкт-Петербурга. Результаты верификации подтверждают устойчивое преимущество разработанной конфигурации перед моделью с простой параметризацией городского подслоя при прогнозе температуры воздуха, скорости и аномалий ветра в городе.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в том, что:

1. разработана методика анализа чувствительности прогностических полей к параметрам урбанизированной поверхности в простой модели городского подслоя, основанная на адаптации метода полного анализа чувствительности Соболя с применением приближенного (суррогатного) моделирования для сокращения вычислительных затрат, необходимых при прямом вычислении индексов чувствительности;

2. впервые для Санкт-Петербурга разработана конфигурация мезомасштабной прогностической модели с многоуровневой параметризацией городского подслоя VER_VEM и уточненными данными о реальных геометрических характеристиках городской застройки;

3. получены количественные оценки отклика в полях приземных метеорологических величин в зависимости от сезонов года и полноты описания городской застройки при использовании параметризаций городского подслоя различной сложности в мезомасштабной прогностической модели.

Теоретическая значимость состоит в том, что результаты сравнительного анализа моделей городского подслоя различной сложности вносят вклад в понимание возможностей и ограничений существующих подходов к параметризации влияния городской застройки Санкт-

Петербурга на нижнюю атмосферу и указывают на необходимость дальнейшего уточнения данных о характеристиках урбанизированной поверхности.

Практическая значимость работы подтверждается внедрением конфигурации мезомасштабной модели WRF-ARW с горизонтальным шагом сетки 0,6 км, с многоуровневой параметризацией городского подслоя и уточнёнными параметрами урбанизированной поверхности в оперативную практику ФГБУ «Северо-Западное УГМС».

Методология и методы исследования

Основным инструментом исследования является метод математического моделирования, реализованный в мезомасштабной модели WRF-ARW, последовательно объединенной с двумя параметризациями городского подслоя SLAB и BEP_BEM. Для определения оптимальных значений параметров схемы SLAB разработан метод на основе суррогатного моделирования, при котором ресурсоёмкие запуски WRF-ARW заменяются быстрыми приближёнными расчётами с использованием упрощённого алгоритма, обученного по результатам ограниченного числа запусков мезомасштабной модели. Характеристики городской застройки Санкт-Петербурга в схеме BEP_BEM были уточнены по данным OpenStreetMap. Результаты численного моделирования сравнивались с данными современных метеорологических наземных и спутниковых измерений. Анализ результатов проводился с использованием методов математической статистики.

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов работы подтверждается использованием моделей городского подслоя, успешно применяемых для численного моделирования влияния урбанизации на метеорологические величины; использованием данных действующей сети метеорологических наблюдений ФГБУ «Северо-Западное УГМС» и спутниковых данных MODIS для определения периодов максимальной интенсивности городских климатических эффектов и верификации результатов моделирования; проведением верификации в соответствии с методическими рекомендациями по верификации метеорологических прогнозов (Киктев и др., 2020); апробацией результатов на научных конференциях и семинарах Гидрометцентра России; публикацией основных результатов в рецензируемых российских научных изданиях, входящих в перечень ВАК.

Личный вклад автора

Автором лично выполнены: 1) обработка и анализ данных метеорологических станционных наблюдений ФГБУ «Северо-Западное УГМС», спутниковых данных MODIS и данных автоматических метеостанций сети ФКП «Дирекция КЗС г. Санкт-Петербург Минстроя России»; 2) адаптация и настройка параметризаций городского подслоя в мезомасштабной прогностической модели для территории Санкт-Петербурга: для простой параметризации выполнен подбор оптимальных значений параметров урбанизированной поверхности с применением результатов полного анализа чувствительности; для современной параметризации выполнено уточнение данных о реальных свойствах городской застройки; 3) проведение серии численных экспериментов по оценке влияния параметров урбанизированной поверхности на прогностические метеорологические поля, анализ и интерпретация полученных результатов, разработка программного обеспечения для визуализации результатов.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы были представлены на следующих научных конференциях, симпозиумах и семинарах:

1. Международная научно-практическая конференция, посвященная 90-летию Российского государственного гидрометеорологического университета. Санкт-Петербург, 2020.

2. IV Всероссийская научно-практическая конференция, приуроченная к Году науки и технологий «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России». Иркутск, 2021.

3. Международная Молодежная Школа И Конференция По Вычислительно-информационным Технологям Для Наук Об Окружающей Среде, Посвященные Памяти Члена-корреспондента РАН Василия Николаевича Лыковского. Томск, 2021.

4. Всероссийская конференция, посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова «Турбулентность, Динамика Атмосферы и Климата». Москва, 2022.

5. V Всероссийская научно-практическая конференция «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России». Иркутск, 2023.

6. Всероссийская конференция с международным участием Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования. Москва, 2023.

7. Всероссийская конференция, посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова «Турбулентность, Динамика Атмосферы и Климата». Москва, 2024.

Результаты диссертации также докладывались на семинарах в Гидрометцентре России и Школе молодых ученых Российского государственного гидрометеорологического университета.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации представлены в 11 публикациях, из которых 4 в рецензируемых журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией (ВАК):

1. Ладохина Е.М., Рубинштейн К.Г., Цепелев В.Ю. Определение периодов максимальной интенсивности острова тепла в Санкт-Петербурге для валидации модели численных прогнозов погоды в городе // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. №2. С. 109-125.

2. Ладохина Е.М., Рубинштейн К.Г. Анализ влияния мегаполиса Санкт-Петербург на осадки и ветер для валидации численного прогноза погоды // Оптика атмосферы и океана. 2021. №34. 1. С. 36-45. (Ladokhina E.M. and Rubinshtein K.G. Analysis of the Effect of the St. Petersburg Megalopolis on Precipitation and Wind for Validation of Numerical Weather Forecasts // Atmospheric and Oceanic Optics, 2021, V. 34. No. 03. pp. 239–249.)

3. Ладохина Е.М., Рубинштейн К.Г., Кулюшина А.В. Чувствительность численного прогноза метеорологических полей к изменению параметров, характеризующих урбанизированную поверхность Санкт-Петербурга. // Оптика атмосферы и океана. 2022. т. 35. № 11. С. 932-943.

4. Ладохина Е. М. Комплексный анализ чувствительности прогностических полей к изменению параметров подстилающей поверхности Санкт-Петербурга. // Метеорология и гидрология. 2025. №1. С. 70-81.

Специальность, которой соответствует диссертационная работа

По тематике диссертационная работа Ладохиной Е.М. соответствует специальности 1.6.18 – Науки об атмосфере и климате в перечне специальностей, утвержденном ВАК, по направлениям исследований: 14. Гидродинамические, физико-статистические и синоптические методы, модели и технологии прогноза состояния атмосферы различной заблаговременности, включая сверхкраткосрочные прогнозы, а также 19. Прикладная метеорология (городская метеорология, авиационная метеорология, медицинская метеорология, морская метеорология и др.).

Общее заключение

Рассмотрев диссертационную работу Ладохиной Е.М. и заслушав отзывы рецензентов, д.г.н. Кузнецовой И.Н. и к.г.н. Варенцова М.И., семинар пришел к заключению, что диссертация Ладохиной Е.М. является завершенной научно-квалификационной работой, имеющей научную новизну и важные практические приложения. Практическим итогом работы стало создание и внедрение в оперативную практику ФГБУ «Северо-Западное УГМС» оптимальной конфигурации мезомасштабной прогностической модели для территории Санкт-

Петербурга, учитывающей реальные характеристики городской застройки.

Диссертационная работа Ладохиной Екатерины Михайловны «Численное моделирование влияния свойств городской застройки Санкт-Петербурга на метеорологические поля» отвечает требованиям пп. 9-11, 13-14 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям и может быть рекомендована к представлению в диссертационный совет для защиты по специальности 1.6.18 – Науки об атмосфере и климате, после учета редакционных замечаний.

Диссертационная работа Ладохиной Е.М. рассмотрена на заседании общепитетутского семинара по краткосрочным и среднесрочным прогнозам погоды ФГБУ «Гидрометцентр России» 2 апреля 2026 г.

В заседании приняли участие 23 чел., в т.ч. 3 докторов наук и 10 кандидатов наук. В обсуждении результатов, изложенных в диссертации и представленных в докладе, приняли участие д.ф.-м.н., проф. Г.С. Ривин, д.ф.-м.н. А.В. Муравьев, к.г.н. И.А. Горлач, к.ф.-м.н. Е.Д. Астахова, к.ф.-м.н. Р.Ю. Игнатов, к.ф.-м.н. М.В. Шатунова.

Председатель семинара по краткосрочным
и среднесрочным прогнозам,
д.ф.-м.н., проф.

Г.С. Ривин

Секретарь семинара по краткосрочным
и среднесрочным прогнозам,
к.ф.-м.н

М.В. Шатунова

«5» мая 2026 г.