

Ладохина Екатерина Михайловна

**Численное моделирование  
влияния свойств городской застройки Санкт-Петербурга  
на метеорологические поля**

**1.6.18 – Науки об атмосфере и климате**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации».

**Научный руководитель:** **Рубинштейн Константин Григорьевич,** доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации», ведущий научный сотрудник.

**Официальные оппоненты:** **Гинзбург Александр Самуилович,** доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук», заведующий лабораторией, главный научный сотрудник.

**Мортиков Евгений Валерьевич,** кандидат физико-математических наук, Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, старший научный сотрудник.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет».

Защита диссертации состоится «6» октября 2026 г. в 15 часов на заседании Диссертационного совета 26.1.002.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (ФГБУ «Гидрометцентр России») по адресу: 123376, Россия, г. Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 11.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУ «Гидрометцентр России» и на сайте <https://meteoinfo.ru>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук



М.В. Шатунова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Санкт-Петербург – город федерального значения, крупнейший мегаполис Северной Европы с населением 5,6 млн человек и площадью 1 447,67 км<sup>2</sup> (по данным на 01.01.2024). Город расположен в восточной части Финского залива, в дельте реки Невы, являющейся частью густой сети естественных и искусственных водных артерий мегаполиса. Протяжённость городской агломерации достигает 32 км с севера на юг и около 50 км с северо-запада на юго-восток в пределах КАД. Процесс урбанизации Санкт-Петербурга продолжает интенсивно развиваться. Согласно прогнозам, объём нового жилищного строительства с 2019 по 2040 год составит 67 млн м<sup>2</sup>, при этом около 66% нового строительства уже размещается на ранее свободных от городской застройки территориях. Такая масштабная трансформация подстилающей поверхности неизбежно влияет на локальные метеорологические условия и микроклимат города.

В контексте изменения климата стремительная урбанизация требует развития новых видов метеорологического обслуживания, направленных на повышение устойчивости городов к опасным погодно-климатическим воздействиям (ВМО, 2020), поскольку до 90% природных бедствий, угрожающих урбанизированным территориям, имеют гидрометеорологическое происхождение (Baklanov et al., 2020).

Современные мезомасштабные прогностические модели (COSMO, ICON, WRF, HIRLAM) оснащены специализированными параметризациями городского подслоя, позволяющими учитывать влияние фактических свойств урбанизированной поверхности на атмосферные процессы. Однако эффективное применение этих параметризаций требует тщательной подготовки входных данных и корректного задания специфических параметров городской застройки<sup>1</sup>, которые часто отсутствуют в профильных базах данных или представлены с недостаточным пространственным разрешением. Для Санкт-Петербурга с его темпом нового строительства, а также контрастным сочетанием урбанизированных и водных поверхностей, проблема учета реальных характеристик его застройки в мезомасштабной прогностической модели актуальна.

**Объектом** исследования являются мезомасштабные процессы в атмосфере над территорией Санкт-Петербурга. **Предметом** исследования выступает оценка влияния свойств урбанизированной поверхности Санкт-Петербурга на метеорологические величины с помощью параметризаций городского подслоя в мезомасштабной прогностической модели.

---

<sup>1</sup> здесь и далее под городской застройкой понимается упорядоченное размещение зданий и сооружений на территории города, формирующее жилые кварталы, общественные центры и улично-дорожную сеть.

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

Для достижения цели работы были поставлены и решены 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 (BEP\_VEM).
7. Провести сравнительный анализ результатов численных экспериментов с использованием параметризаций SLAB и BEP\_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.

### **Научная новизна работы**

В рамках данного исследования получены следующие новые результаты:

- 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 ВЕР\_ВЕМ и уточненными данными о реальных геометрических характеристиках городской застройки.
- 3) получены количественные оценки отклика мезомасштабной прогностической модели в полях приземных метеорологических величин в зависимости от сезонов года и полноты описания городской застройки при использовании параметризаций городского подслоя различной сложности.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. 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.
2. Практическая значимость работы подтверждается внедрением конфигурации мезомасштабной модели WRF-ARW с горизонтальным шагом сетки 0,6 км, многоуровневой параметризацией городского подслоя и уточненными параметрами урбанизированной поверхности в оперативную практику ФГБУ «Северо-Западное УГМС».

### **Основные 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  $1,2..2,0 \text{ м}^2/\text{с}^2$ ); 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.

### **Методология и методы исследования**

В работе использована мезомасштабная модель WRF-ARW, последовательно объединенная с двумя параметризациями городского подслоя: простой моделью SLAB, описывающей урбанизированную поверхность пятью параметрами (альbedo, излучательная способность, шероховатость поверхности, влагосодержание и тепловая инерция почвы), и многоуровневой моделью BEP\_VEM, которая позволяет учитывать информацию о реальных свойствах городской застройки.

Разработана методика для определения параметров урбанизированной поверхности, в наибольшей степени влияющих на результаты моделирования метеорологических величин (методика анализа чувствительности). Для создания выборки расчетов WRF-ARW использовался метод Морриса, для количественной оценки чувствительности метеорологических величин к изменению параметров урбанизированной поверхности применялся метод Соболя. Учитывая высокие вычислительные затраты количественного анализа, для снижения числа запусков WRF-ARW было применено суррогатное моделирование, при котором численные эксперименты заменялись быстрыми приближенными расчетами, основанными на упрощенном алгоритме, обученном по созданной выборке результатов мезомасштабного моделирования.

По результатам анализа чувствительности, выполненного для модели SLAB, для эксперимента с BEP\_VEM были уточнены следующие реальные характеристики городской застройки Санкт-Петербурга (использовалась база данных OpenStreetMap): отношение суммарной площади оснований зданий к площади ячейки, вертикальное распределение площади зданий по высотам от 0 до 75 м, а также средняя высота зданий, взвешенная по площади оснований. Помимо этого, уточнена доля непроницаемых поверхностей в ячейках сетки мезомасштабной модели. Верификация результатов численных экспериментов проведена за четыре месяца 2021 года с контрастными внешними условиями (уровень инсоляции, облачность, наличие снежного покрова т.д.).

Оценка мастерства прогноза температуры подстилающей поверхности BEP\_VEM выполнена путем сопоставления полей модели со спутниковыми данными MODIS Terra с использованием показателя Fractions Skill Score (FSS). Преимуществами FSS являются учёт ошибки пространственного смещения,

определение пространственного масштаба, на котором прогноз становится полезным и возможность дифференцированной оценки качества прогноза для территорий с различной степенью урбанизации.

### **Достоверность результатов работы подтверждается:**

- 1) использованием моделей городского подслоя, проанализированных в предшествующих научных работах и успешно применяемых для решения задач численного моделирования влияния урбанизации на метеорологические величины;
- 2) использованием данных действующей сети метеорологических наблюдений ФГБУ «Северо-Западное УГМС» и спутниковых данных MODIS для определения периодов максимальной интенсивности эффектов влияния Санкт-Петербурга на метеорологические поля, а также для верификации результатов численного моделирования;
- 3) верификацией результатов численного моделирования в соответствии с методическими рекомендациями по верификации метеорологических прогнозов (Киктев и др., 2020);
- 4) докладами автора на научных конференциях и семинарах Гидрометцентра России;
- 5) публикацией основных результатов в рецензируемых российских научных изданиях, входящих в перечень ВАК.

### **Апробация работы**

Автор лично представлял результаты своей работы на российских и международных научных конференциях, а также на научных школах и семинарах. Основные итоги диссертации опубликованы в 11 публикациях, из которых 4 были размещены в рецензируемых изданиях, включенных в перечень Высшей Аттестационной Комиссии (по состоянию на 30.10.2024 года).

### **Реализация работы**

Результаты проведенного исследования были внедрены в ФГБУ «Северо-Западное УГМС», что подтверждается актом о внедрении.

### **Личный вклад автора**

Автором лично выполнены: 1) обработка и анализ данных метеорологических стационарных 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 значений параметров урбанизированной поверхности Санкт-Петербурга с применением результатов полного анализа

чувствительности; для современной параметризации выполнена интеграция данных о реальных свойствах городской застройки; 3) расчеты численных экспериментов по оценке влияния параметров урбанизированной поверхности на прогностические метеорологические поля, анализ и интерпретация полученных результатов, разработка программного обеспечения для визуализации результатов.

### **Благодарности**

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю д.ф.-м.н., в.н.с. Рубинштейну К. Г. за постоянное внимание к работе, ценные советы и всестороннюю поддержку на всех этапах исследования. Автор благодарит сотрудников Гидрометцентра России и лично к.ф.-м.н. Шатунову М.В., д.ф.-м.н. Муравьева А.В., д.г.н. Кузнецову И.Н. за плодотворное обсуждение результатов работы, конструктивные замечания и советы по улучшению исследования; коллег ООО «МикроСтеп-МАК» за понимание и поддержку научной деятельности автора; коллег ФГБУ «Северо-Западное УГМС» и лично Колесова А.М., Рудык Е.В., Сергеева Д.С. и Кириченко О.Г. за помощь в получении доступа к необходимым ресурсам и данным; сотрудников ФГБОУ ВО «РГГМУ» и лично к.ф.-м.н., доц. Анискину О.Г., к.г.н. Цепелева В.Ю., к.ф.-м.н. Неробелова Г. М. за экспертные консультации по теме диссертации; Евсикова И. А. и к.ф.-м.н. Фролькиса В. А. за помощь в подготовке данных о городской застройке Санкт-Петербурга; сотрудника МГУ имени М.В. Ломоносова к.г.н. Варенцова М.И. за наставничество, ценные комментарии и живое обсуждение результатов работы. Автор выражает благодарность семье, мужу Сергею и друзьям за моральную поддержку, терпение и понимание.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 142 наименований работ отечественных и зарубежных авторов, списка сокращений и обозначений. Она изложена на 142 страницах текста, включая 45 рисунков, 11 таблиц и 1 приложение.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель, основные задачи и использованные методы их решения, представлены положения, выносимые на защиту, сведения об апробации и реализации работы и личном вкладе автора.

В **первой главе** проведен обзор исследований о влиянии городской застройки на метеорологические характеристики атмосферы, проведенных с использованием данных наблюдений и численных прогностических моделей, с фокусом на исследования такого рода для Санкт-Петербурга.

В **разделе 1.1** рассмотрены наиболее хорошо описанные в литературе пространственные аномалии метеорологического режима, связанные с урбанизацией, для некоторых городов умеренно-континентального климата. Проанализированы особенности городского острова тепла (ГОТ) Москвы. Представлены сравнительные характеристики ГОТ других крупных городов (Новосибирск, Монреаль, Торонто). Описаны иные эффекты влияния урбанизации на нижнюю атмосферу: возникновение городского острова влажности/сухости, положительная аномалия осадков и снижение средних скоростей ветра. Сделан вывод о том, что урбанизованная среда порождает комплекс взаимосвязанных аномалий в полях основных метеорологических характеристик (температура воздуха и почвы, влажность воздуха, скорость ветра, осадки). Однако уникальное сочетание макроклиматических, географических и градостроительных факторов каждого города исключает прямой перенос установленных закономерностей на условия Санкт-Петербурга и определяет необходимость самостоятельного анализа аномалий его метеорологических условий.

В **разделе 1.2** обобщены результаты длительных метеорологических наблюдений в Санкт-Петербурге по данным существующих научных материалов. Описаны основные аномалии метеорологического режима мегаполиса: в полях температуры, влажности, скорости ветра и осадков, а также в распределении солнечной радиации. Рассмотрены методологические подходы к исследованию городского климата, включая использование микроклиматических съемок и высокоплотных сетей автоматических датчиков. Представлены результаты анализа многолетних данных, подтверждающие устойчивость выявленных аномалий городского метеорологического режима и их зависимость от сезона, времени суток и синоптических условий.

В **разделе 1.3** рассмотрено применение численных прогностических моделей атмосферы для исследования влияния крупных городов на нижнюю атмосферу. Описаны мезомасштабные модели WRF-ARW и COSMO, их математическая основа и особенности, а также альтернативный подход к моделированию метеорологических условий в городской среде с помощью вихреразрешающего моделирования. Особое внимание уделено эволюции моделей деятельного слоя суши, которые стали фундаментом для появления моделей городского подслоя в мезомасштабных моделях атмосферы. Рассмотрены такие модели городского подслоя как TEB, SLUCM, BEP и TERRA\_URB, позволяющие учитывать специфические свойства городской застройки: антропогенные выбросы тепла, неравномерное распределение высот зданий, теплофизические характеристики строительных материалов.

Приведены примеры влияния параметров урбанизированной поверхности на метеорологические величины для различных городов, методы оценки антропогенных потоков тепла.

Во **второй главе** проведено исследование, направленное на выявление периодов наиболее заметного влияния городской застройки Санкт-Петербурга на метеорологические поля по данным станционных наблюдений.

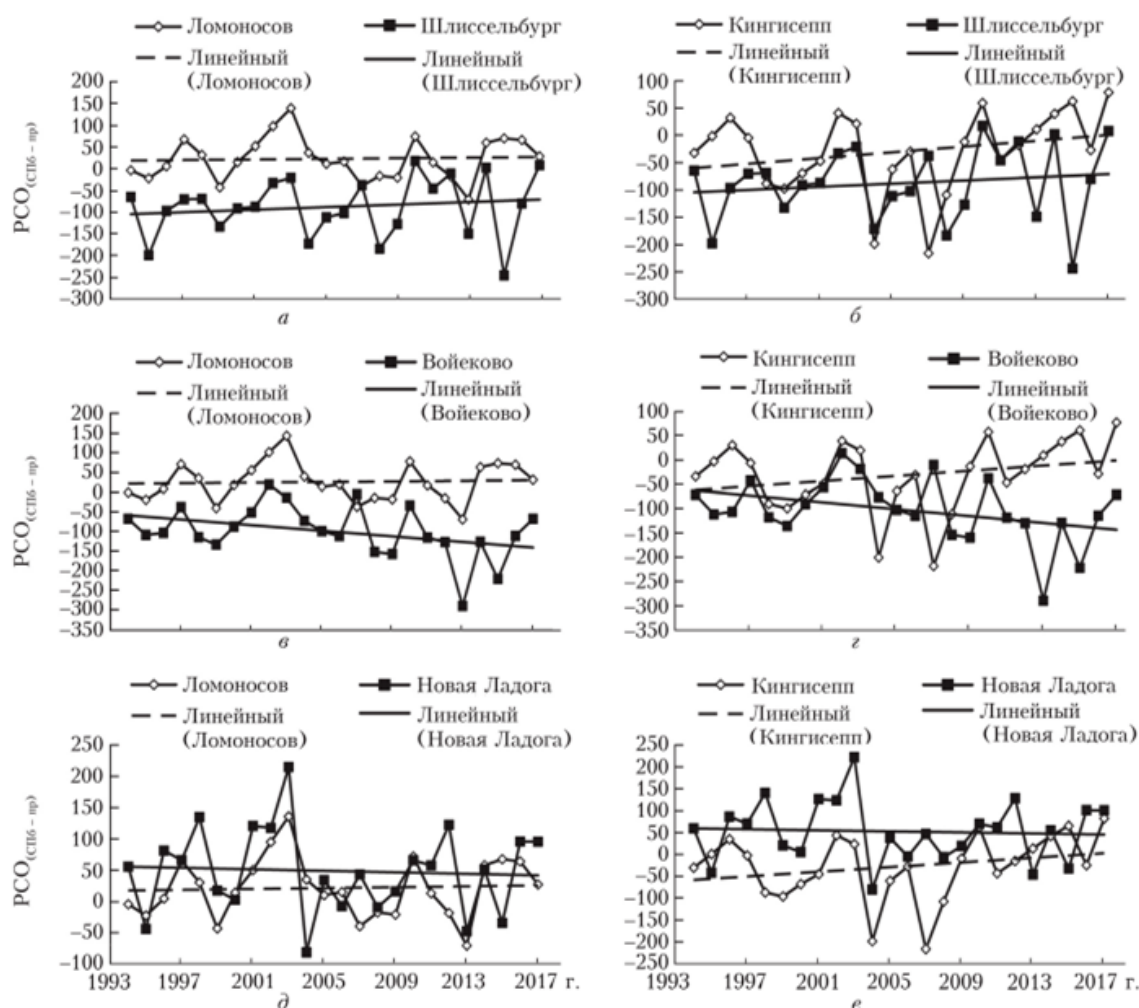
Раздел **2.1** посвящен характеристике сети станций наблюдения Санкт-Петербурга и Ленинградской области, охватывающей площадь около 250 000 км<sup>2</sup>. Для определения периодов времени, когда влияние Санкт-Петербурга на метеорологические поля было максимальным, использованы данные 15 станций в радиусе 150 км от города за 25 лет (1994–2018 гг). Станции были условно разделены на две группы: "ближние" (до 50 км от города) и "дальние". В качестве станции, отражающей метеорологические условия в мегаполисе, использовались данные ОГМС «Санкт-Петербург» (также известной как Информационный Центр погоды – ИЦП) расположенной в одном из центральных районов города на Аптекарском острове, в непосредственной близости от открытого моря и рукавов дельты Невы.

Даны физико-географические характеристики

- загородных станций ближней группы: Шлиссельбург и Воейково к востоку от мегаполиса, Озерки и Ломоносов на побережье Финского залива. Отмечается, что в последние годы произошло зарастание окрестностей станции Шлиссельбург молодыми деревьями, что может повлиять на оценки влияния мегаполиса на поля приземного ветра и другие метеорологические величины.
- более удаленных загородных станций: Новая Ладога на южном берегу Ладожского озера, Белогорка и Сосново, расположенные к югу и северу от Санкт-Петербурга, и Выборг на северо-восточной оконечности Финского залива.

В разделах **2.2–2.4** проведён анализ воздействия застройки Санкт-Петербурга на метеорологические характеристики (приземную температуру, осадки и скорость ветра) по данным станционных наблюдений за период 1994–2018 гг. Интенсивность городского острова тепла рассчитывалась как разность между наблюдаемой температурой на станции ИЦП и температурой невозмущенной влиянием мегаполиса местности, воссозданной методом пространственной интерполяции (Менжулин, Павловский, 2016) по данным 15 окружающих город станций. Вычислено, что средняя годовая температура на станции ИЦП превышает осредненную по загородным станциям на 1,13 °С, результат согласуется с результатами предыдущих исследований. Анализ сезонного хода интенсивности ГОТ > 2 °С показал, что максимальные значения наблюдаются зимой (до 6,4 °С), а минимальные – летом. Выявлен характер суточного хода интенсивности ГОТ по данным станционных наблюдений: минимум обнаруживается днем (12:00 ВСВ), максимум ночью (00:00 ВСВ, до 5,2 °С).

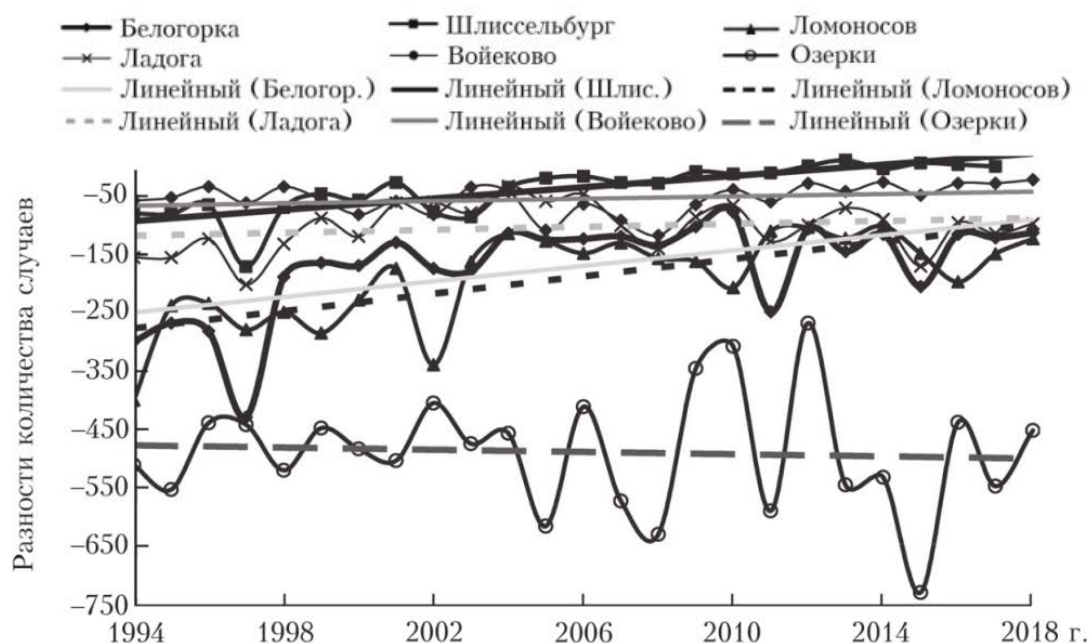
Анализ воздействия мегаполиса на атмосферные осадки проводился с учетом преобладающих направлений переноса воздушных масс. Путем сравнения повторяемостей направлений ветра за весь исследуемый период для ИЦП и загородных станций ближней группы установлено, что в Санкт-Петербурге и его окрестностях наблюдаются преимущественно западные и юго-западные направления ветра. Станции Шлиссельбург, Воейково и Новая Ладога были отнесены к группе подветренных, а станции Озерки, Ломоносов и Кингисепп – к наветренным. Выявлено значимое (согласно результатам расчета критерия Стьюдента) увеличение годовой суммы осадков в пределах 80–100 мм в восточном (подветренном по отношению к мегаполису) секторе на расстоянии до 100 км от центра Санкт-Петербурга. Превышение количества осадков над средними многолетними значениями нивелируется на удалении свыше 100 км по направлению преобладающего переноса воздушных масс.



**Рисунок 1** – Временной ход разностей годовых сумм осадков (PCO) между Санкт-Петербургом и станциями Ленинградской области и их линейные тренды

Анализ данных наблюдений за ветром показал, что значимого воздействия

застройки Санкт-Петербурга на слабые (менее 1 м/с) и средние скорости ветра в городе не обнаружено. Однако для умеренных и сильных ветров (более 5 м/с) выявлено достоверное уменьшение их повторяемости на подветренных станциях. Максимальные разности количества ветренных дней в сравнении с данными с ИЦП наблюдаются на наветренной ст. Озерки (500 случ./год), на ст. Ломоносов и Белогорка (около 200 случ./год), а минимальные – на подветренной ст. Шлиссельбург (57 случ./год).



**Рисунок 2** – Распределение разности случаев умеренного и сильного ветра (более 5 м/с) между Санкт-Петербургом и станциями Ленинградской области

Раздел **2.5** посвящен определению периодов наиболее заметного проявления комплекса аномалий метеорологических условий в Санкт-Петербурге (городского острова тепла, увеличения осадков на подветренной стороне мегаполиса и ослабления умеренных и сильных скоростей ветра в городе) для верификации результатов численных экспериментов.

Случаи интенсивных температурных возмущений в городской черте были найдены по комбинированному критерию поиска ГОТ: с помощью пространственной интерполяции рассчитывалась фоновая температура воздуха в точке виртуального аналога городской станции Санкт-Петербурга, как если бы города не существовало; ГОТ высокой интенсивности фиксировался при условии, что разность между значениями температуры на станции ИЦП и ее виртуальном аналоге превышала 2 градуса, но при этом была меньше, чем разность температур на станциях Санкт-Петербург и Белогорка. Проявление эффекта увеличения количества осадков на подветренной стороне рассчитывалось при условии, что суточные разности сумм количества осадков

между Санкт-Петербургом и ст. Озерки, а также Санкт-Петербургом и ст. Ломоносов, были меньше, чем разности между мегаполисом и станциями Шлиссельбург и Воейково. И наконец, для обнаружения эффекта ослабления скорости ветра в самом городе использовалось условие наблюдения более сильных (более 5 м/с) скоростей ветра как на станции Озерки, так и на станции Ломоносов, чем на станции ИЦП.

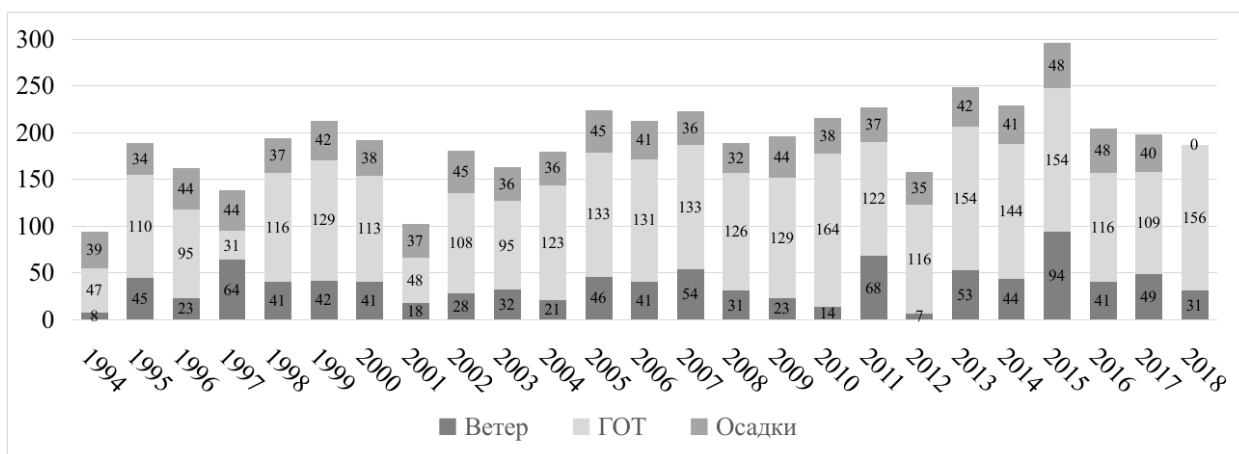
**Таблица 1** – Среднегодовое и среднесезонное количество случаев проявления высокоинтенсивных аномалий метеорологических условий в Санкт-Петербурге

Сезон	ГОТ	Осадки	Ветер	Всего
Зима	16	4	13	33
Весна	31	12	10	53
Лето	49	12	6	67
Осень	23	10	9	42
Год	119	38	38	195

*Пояснения к таблице: Колонки «ГОТ», «Осадки» и «Ветер» обозначают количество случаев интенсивного ГОТ, увеличения количества осадков на подветренных станциях и ослабления скорости ветра в самом городе соответственно*

Анализ среднегодового и среднесезонного количества случаев проявления аномалий метеорологических условий в Санкт-Петербурге, выявил их сезонную изменчивость (**Таблица 1**). В среднем за 1994–2018 гг. наибольшее количество случаев зафиксировано в летний период (67 случаев), при этом ГОТ является доминирующим эффектом во все сезоны, достигая максимума летом (49 случаев). Увеличение осадков на подветренной стороне города наиболее выражено весной и летом (по 12 случаев), а ослабление скорости ветра чаще наблюдается зимой (13 случаев).

Для проведения численных экспериментов выбрано лето 2015 года на основании анализа межгодовой и внутригодовой изменчивости эффектов влияния городской застройки Санкт-Петербурга на метеорологические величины (**Рисунок 3**). Этот год характеризуется высоким суммарным количеством исследуемых аномалий (296 случаев), при этом количество случаев увеличения осадков (48) и ослабления ветра (94) является абсолютным максимумом за весь рассматриваемый период наблюдений. Внутригодовая динамика распределения количества случаев за 2015 г. соответствует средней многолетней (**Таблица 1**) и характеризуется максимумом в летние месяцы.



**Рисунок 3** – Распределение количества обнаруженных по данным наблюдений эффектов влияния застройки Санкт-Петербурга на метеорологические величины по годам. «ГОТ», «Осадки» и «Ветер» обозначают количество случаев интенсивного ГОТ, увеличения сумм осадков на подветренных станциях и ослабления скорости ветра в самом городе соответственно.

**Третья глава** посвящена анализу чувствительности прогностических полей численной модели к изменению параметров подстилающей поверхности, характеризующих свойства городской застройки Санкт-Петербурга.

В разделе **3.1** проведен обзор методов анализа чувствительности<sup>2</sup> направленных на исследование того, как неопределенность в выходных данных модели может быть распределена между различными источниками неопределенности во входных параметрах модели.

Существующие методы анализа чувствительности можно разделить на локальные и полные. Локальные методы, несмотря на свою ограниченность, эффективны для предварительного отбора наиболее значимых параметров и требуют минимальных вычислительных ресурсов. Полные методы анализа чувствительности обеспечивают более глубокое понимание поведения модели за счет оценки чувствительности выходных данных модели ко всем возможным комбинациям значений отдельных, заранее выбранных входных параметров, однако требуют проведения большого числа численных экспериментов.

Более подробно описаны два метода полного анализа чувствительности. Метод Морриса представляет собой эффективный компромисс между вычислительными затратами и полнотой анализа, позволяя качественно оценить, как индивидуальное влияние входных параметров на

<sup>2</sup> Здесь и далее под чувствительностью понимается чувствительность прогностических полей численной модели к изменению параметров подстилающей поверхности, характеризующих урбанизированные районы Санкт-Петербурга

прогностические поля, так и нелинейность их взаимодействия. Метод Соболя обеспечивает количественную оценку индивидуального и совместного влияния параметров на выходные данные модели, но требует существенно больших вычислительных ресурсов. Для оптимизации вычислительных затрат в работе применен 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.

В разделе 3.2 проведен локальный анализ чувствительности прогностических полей к изменению параметров урбанизированной поверхности в простой модели деятельного слоя суши SLAB.

Для проведения численных экспериментов использовалась прогностическая региональная модель WRF-ARW версии 4.0. В качестве начальных и граничных условий использовались поля глобальной прогностической системы GFS (Global Forecast System) на регулярной сетке с шагом 0,25 градуса. Для достижения высокого пространственного разрешения использовалась модельная область, покрывающая Балтийское море и часть Европейской территории России, с горизонтальным шагом сетки 9 км, с последовательно вложенными областями 3 км для территории Ленинградской области и 1 км для Санкт-Петербурга с ближайшими окрестностями. По вертикали задано 46  $\sigma$ -уровней, из них 17 слоев расположено до уровня 500гПа. Для описания мелкомасштабных атмосферных процессов использовались параметризации на основе анализа научной литературы (по тематике разработки конфигурации WRF-ARW для Санкт-Петербурга) и предварительных численных экспериментов: коротковолновая и длинноволновая радиация – RRTMG (Iacono et al., 2008), микрофизика облаков – Thompson (Thompson et al., 2008), планетарный пограничный слой – MYJ (Janjic, 1994). Параметризация конвекции использовалась только для области с шагом 9 км по схеме Tiedtke (Zhang et al., 2011).

Моделирование влияния свойств городской поверхности на метеорологические поля осуществлялось путем модификации специальных параметров в 5-слойной модели термической диффузии SLAB (Kusaka et al., 2012). В системе WRF-ARW эта схема (Dudhia, 1996) является наиболее простой и вычислительно эффективной моделью деятельного слоя суши. В ней профиль температуры почвы рассчитывается на 5-и вертикальных уровнях, на глубинах 1, 2, 4, 8 и 16 см; ниже, на глубине 31 см и далее, слой почвы имеет постоянную температуру.

Модель SLAB применялась для описания взаимодействия как природных, так и урбанизированных поверхностей с атмосферой. Оценивалось влияние изменения значений альбедо ( $A$ ), излучательной способности ( $E$ ), шероховатости ( $Z_0$ ) поверхности, а также влагосодержания ( $M$ ) и тепловой инерции ( $C$ ) почвы на отдельные приземные прогностические поля – температуру ( $T_2$ ), скорость ветра ( $W_{10}$ ) и относительную влажность ( $RH_2$ ).

Численные эксперименты проведены за интервал с 14 по 22 июня 2015 г., когда в Санкт-Петербурге наблюдались случаи интенсивного ГОТ согласно результатам, полученным в разделе 2.5. Рассчитывались серии прогнозов за каждый день указанного периода с заблаговременностью 30 часов. Суточные оценки чувствительности получены путем осреднения статистик за период с 06 до 06 ВСВ (соответствует заблаговременности прогноза с 6 до 30 часов), ночные – с 18 до 06 ВСВ (соответствует заблаговременности прогноза с 18 до 30 часов).

Для определения влияния изменения физических параметров поверхности на прогностические поля, эксперименты проводились по следующей схеме. Сначала был рассчитан контрольный эксперимент с заданными по умолчанию значениями параметров:  $A=0.15$ ,  $M=0.1$ ,  $Z0=0.5 \times 10^{-2}$ ,  $C=3.0$ ,  $E=0.88$ . Затем проведена серия экспериментов с последовательным изменением параметров городской застройки (*Таблица 2*). Оценки локального анализа чувствительности в Таблице 2 получены путем расчета разности между значениями среднеквадратического отклонения (СКО) контрольного эксперимента и экспериментов с измененными параметрами от данных наблюдений на станциях ИЦП и Пулково. Значения прогностических полей извлекались из выходных файлов модели для области моделирования с горизонтальным шагом сетки 1 км.

**Таблица 2** – Направление изменения значений прогностических метеоэлементов в точке станции ИЦП в ходе последовательного изменения значений параметров урбанизированной поверхности

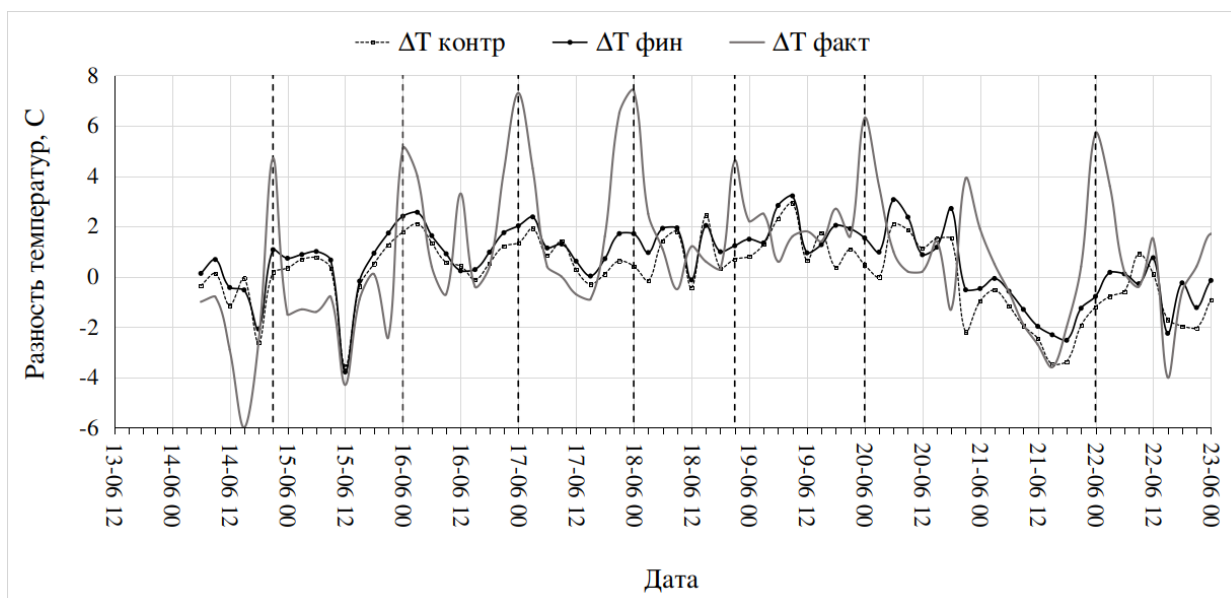
Знач. по умолчанию	Тестовые знач.	T2		W10		RH2		
		↓*	↑*	↓*	↑*	↓*	↑*	
A	0,15	0,05; 0,30	A↓T2↑	A↑T2↓	A↓W10↑	A↑W10↓	A↓RH2↓	A↑RH2↑
M	0,1	0,05; 0,20	M↓T2↑	M↑T2↓	M↓W10↑	M↑W10↓	M↓RH2↓	M↑RH2↑
Z0	0,5	1		Z0↑T2↓		Z0↑W10↓		Z0↑RH2↓
C	3,0	2; 4	C↓T2↓	C↑T2↓	C↓W10↑	C↑W10↓	C↓RH2↑	C↑RH2↑
E	0,88	0,78	E↓T2↑		E↓W10↑		E↓RH2↓	

\*Примечание к Таблице 2: направление стрелок указывает, какое тестовое значение параметра использовалось – ниже (↓) или выше (↑) значения по умолчанию.

По результатам анализа чувствительности последовательных экспериментов выбраны значения параметров, которые ближе к оптимальным, чем заданные в модели по умолчанию:  $A=0.05$ ,  $M=0.05$ ,  $Z0=1$ ,  $E=0.78$ . Они были использованы для финального эксперимента с комплексным изменением параметров урбанизированной поверхности.

По результатам контрольного и финального экспериментов проанализированы разности температур между городской (ИЦП) и сельской

(Белогорка) станциями (*Рисунок 4*). Из графика следует, что изменение параметров поверхности города оказало наибольшее влияние на прогноз температуры в сроки проявления ГОТ высокой интенсивности, которые отмечены на графике вертикальными пунктирными линиями. Максимальная разница в величине ГОТ между финальным и контрольным экспериментами наблюдается в ночь с 17 на 18 июня: 1,3 °С и 19 июня (18 ВСВ): 1,6 °С.



**Рисунок 4** – Временной ход разности приземных температур по данным наблюдений ( $\Delta T_{\text{факт}}$ ) и результатам контрольного ( $\Delta T_{\text{контр}}$ ) и финального ( $\Delta T_{\text{фин}}$ ) экспериментов

В разделе 3.3 проведен полный анализ чувствительности отдельных прогностических полей, рассчитанных с помощью модели WRF-ARW, к изменению основных параметров, характеризующих урбанизированную поверхность Санкт-Петербурга. Численные эксперименты были проведены за 12 мая, 18 июня, 25 августа и 15 октября 2015 г. В выбранные даты максимальная интенсивность ГОТ составила 3,5..4,6 °С, а погодные условия были благоприятными его для развития: не наблюдалось порывов ветра, погода преимущественно была безветренная, облачность слабая, суточный ход температуры характеризовался большими перепадами.

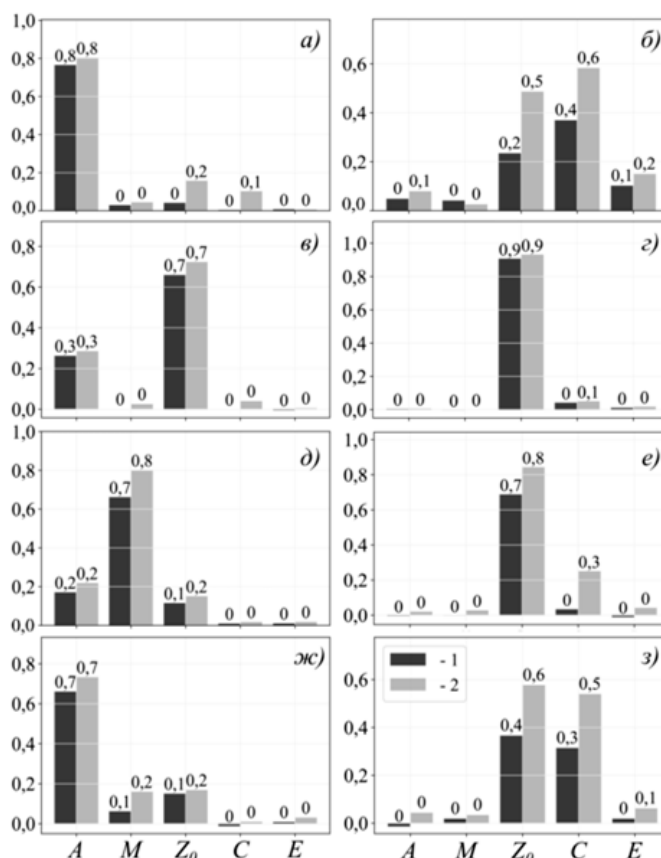
Количественная оценка отдельного и совместного вклада параметров урбанизированной поверхности выполнена методом Соболя с применением машинного обучения для построения суррогатных моделей. Для создания обучающей выборки суррогатной модели, проведено 240 индивидуальных расчетов модели WRF-ARW с последовательным изменением параметров урбанизированной поверхности в пределах [0,01..1], [0,02..1], [0,05..3], [1..7] и [0,5..1] для A, M, Z0, C и E соответственно. Мерой точности описания процесса суррогатной моделью выбрана величина коэффициента детерминации  $R^2$  при перекрестной проверке.  $R^2$  показывает долю дисперсии выходного решения (в

данном случае СКО), которую объясняет суррогатная модель.

$$СКО = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (f_{ind}^{ijn} - f_{def}^{ijn})^2}{N * I * J}}$$

Здесь, СКО – среднеквадратическое отклонение в 10-и километровой окрестности станции ИЦП;  $f_{ind}$  – значение метеорологического параметра по данным индивидуального эксперимента;  $f_{def}$  – значение метеорологического параметра по данным эксперимента с параметрами поверхности, заданными по умолчанию;  $N$  – количество случаев ГОТ,  $I * J$  – количество точек расчётной сетки (11\*11).

Чем ближе коэффициент детерминации к 1, тем более точно суррогатная модель способна воссоздать поведение СКО метеоэлементов при изменении входных параметров в численной модели. Были протестированы Гауссова модель регрессии (GP), метод опорных векторов (SVR), деревья решений с градиентным усилением (GBR) и некоторые другие модели. После адаптации наилучших моделей к решаемой задаче удалось достичь средних значений коэффициентов детерминации  $\geq 80\%$ . Эти модели можно признать достаточно хорошими для проведения анализа чувствительности методом Соболя. Применение суррогатных моделей позволило сократить количество индивидуальных расчетов WRF-ARW более чем в 10 раз (с 3072 до 240). Количественная оценка влияния параметров подстилающей поверхности на метеорологические поля (на приземную температуру (T2), скорость приземного ветра (W10), относительную влажность (RH2) и высоту пограничного слоя (PBL) выполнена с использованием индексов чувствительности Соболя (**Рисунок 5**). Индекс первого порядка (S1) определяет вклад отдельных параметров, индекс второго порядка (S2) – взаимное влияние двух параметров, а индекс суммарного эффекта (ST) учитывает индивидуальный и совместный вклад параметров в изменение метеорологических полей. Сравнение S1 и ST позволяет оценить только взаимное влияние всех параметров на метеорологические поля.



**Рисунок 5** – Чувствительность приземных а) температуры, б) скорости ветра, в) относительной влажности и г) высоты пограничного слоя к изменению параметров подстилающей поверхности по методу Соболя. Рисунки слева относятся к результатам за дневные часы, справа – за ночные.

Анализируя результаты расчетов индексов Соболя, видно, что для ряда выбранных метеоэлементов хорошо выделяется 1 наиболее influential параметр – это альbedo (для T2 и PBL), шероховатость (для W10) и влагосодержание (для RH2) днем, а также шероховатость (для W10, RH2 и PBL) и тепловая инерция (для T2) ночью.

Анализ индексов Соболя позволяет выделить доминирующий параметр для каждого из рассматриваемых метеоэлементов в дневное время: альbedo оказывает наибольшее влияние на температуру воздуха и высоту пограничного слоя, шероховатость – на скорость ветра, влагосодержание – на относительную влажность (RH2). В ночные часы роль шероховатости существенно возрастает: к ее изменению становится наиболее чувствительна не только величина W10, но и RH2 и PBL, тогда как определяющее влияние на температуру воздуха переходит к тепловой инерции подстилающей поверхности. Можно выделить ряд параметров, к изменению которых чувствительность метеоэлементов была средней – это альbedo для W10 и альbedo для RH2 днем, а также тепловая инерция для RH2 ночью. Последние 2 параметра допустимо отнести к этой категории лишь за счет их значений ST. Остальные параметры можно признать наименее influentialными – даже

суммарная доля отдельного и совместных влияний параметра на метеорологическую величину (индекс ST) не превосходит 0,2.

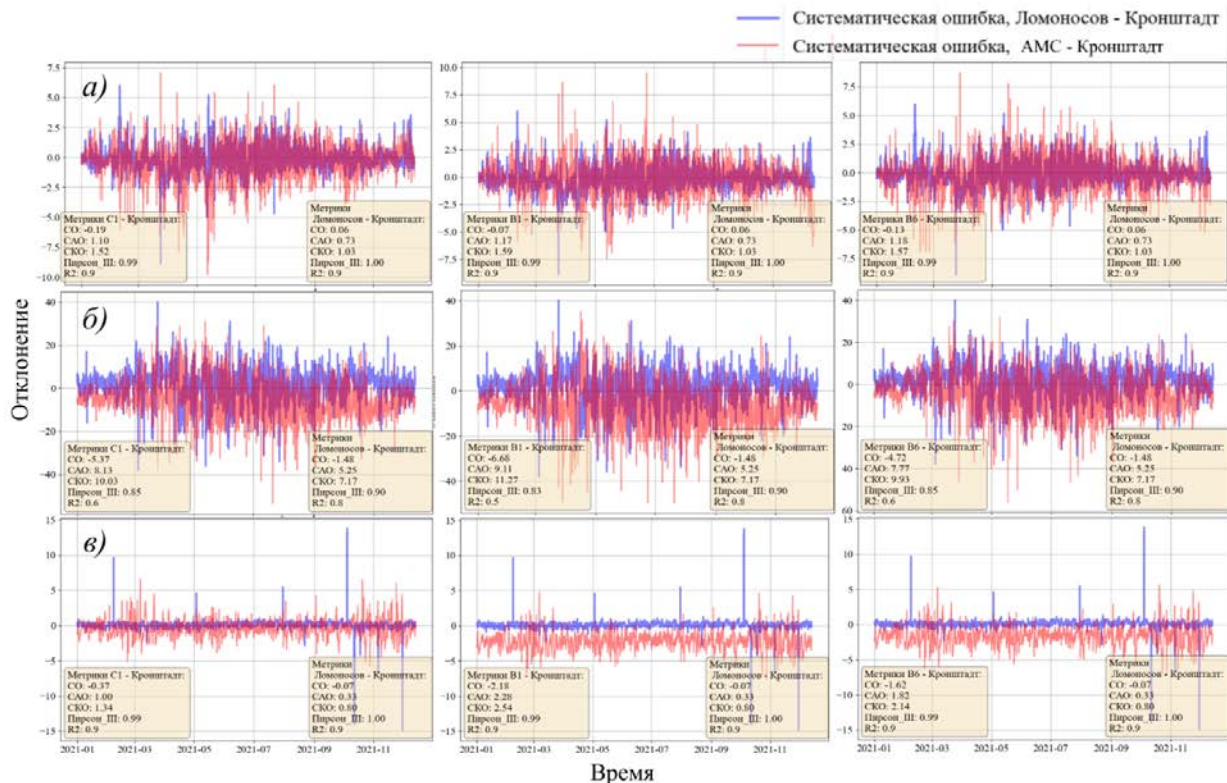
Днем значения S1 в среднем на 0,05 меньше значений индексов суммарного показателя чувствительности ST, что говорит о том, что совместное влияние параметров подстилающей поверхности на выходные величины было слабым. Ночью средняя доля совместного влияния параметров на метеоэлементы больше (0,21 согласно разности ST и S1).

**Четвертая глава** посвящена численному моделированию влияния Санкт-Петербурга на метеорологические поля.

Возможности прогностической мезомасштабной модели WRF-ARW воспроизводить аномалии городского метеорологического режима проанализированы на расширенной серии численных экспериментов для четырёх месяцев 2021 года: января, марта, июня и октября. Выбранные временные интервалы позволяют исследовать отклик параметризации городского подслоя в модели на контрастные внешние условия (уровень инсоляции, облачность, наличие снежного покрова т.д.). Выбор периодов также обоснован необходимостью использования независимой выборки с выраженными положительными температурными аномалиями относительно климатической нормы (1961–1990 гг.) во все исследуемые месяцы. Так, на момент проведения исследования лето 2021 года стало самым жарким в Санкт-Петербурге за всю историю инструментальных метеорологических наблюдений. Среднемесячная температура воздуха в июне достигла 21,4°C, что на 5,8°C выше климатической нормы.

В разделе 4.1 проведен анализ данных стационарных наблюдений за 2021 г на предмет проявления эффектов влияния городской застройки на поля приземной температуры, влажности и скорости ветра. Набор данных наблюдений за приземной температурой для верификации результатов моделирования был дополнен измерениями с трех станций автоматической сети, принадлежащей ФКП «Дирекция КЗС г. Санкт-Петербург Минстроя России».

В подразделе 4.1.1. проведена оценка репрезентативности данных автоматических метеорологических станций. Автоматические метеостанции С1, В1 и В6 расположены к западу от мегаполиса на створах дамбы, защищающей город от наводнений. Оценка репрезентативности данных АМС за 2021 г. выполнена путём сопоставления их измерений с данными станций Кронштадт и Ломоносов. Пара Ломоносов–Кронштадт служит мерой естественной пространственной изменчивости метеорологических параметров: если средние и среднеквадратические отклонения метеорологических величин пар АМС–Кронштадт сопоставимы с аналогичными показателями пары Ломоносов–Кронштадт, расхождения считаются находящимися в пределах естественной изменчивости; существенное превышение указывает на инструментальные погрешности или калибровочные отклонения АМС.



**Рисунок 6** – Сравнительный анализ показателей репрезентативности данных АМС С1 (левая колонка), В1 (центральная колонка), В6 (правая колонка); а) приземной температуры, б) относительной влажности, в) давления на уровне моря

Результаты анализа (**Рисунок 6**), позволяют сделать следующие выводы: данные о температуре воздуха с АМС обладают достаточной репрезентативностью для исследования аномалий городского метеорологического режима. При этом в данных об относительной влажности выявлено систематическое смещение, а в данных об атмосферном давлении обнаружены смещение и разброс, выходящие за пределы естественной изменчивости. В связи с этим, в анализ влияния Санкт-Петербурга на метеорологические поля и в верификацию численных экспериментов будут включены только данные о температуре воздуха с АМС.

В подразделах **4.1.2–4.1.4** проанализированы отклонения температуры воздуха, относительной влажности скорости приземного ветра на метеорологических станциях относительно ИЦП по данным наблюдений за январь, март, июнь и октябрь. Из анализа следует, что во все исследуемые месяцы температура на ИЦП в среднем выше, а относительная влажность и скорость приземного ветра ниже, чем на соседних станциях. Таким образом, для верификации аномалий городского метеорологического режима по данным численного моделирования в качестве репрезентативной городской станции принята ИЦП.

В разделе **4.2** проведен анализ результатов численного эксперимента с простой моделью городского подслоя SLAB.

Для уточнения параметров, характеризующих поверхность Санкт-Петербурга в разработанной конфигурации модели, рассчитывалось СКО данных прогноза от данных наблюдений на станциях ИЦП, аэропорт Пулково, Белогорка. Использовались результаты численных экспериментов, полученные при анализе чувствительности приземных прогностических полей к изменению параметров урбанизированной поверхности Санкт-Петербурга. Полученные значения СКО были использованы для построения суррогатной модели. В результате был определен набор параметров, при использовании которого СКО прогнозов T2, W10 и RH2 в указанные даты были минимальны.

**Таблица 3** – Значения уточненных параметров урбанизированной поверхности и СКО, полученных при расчете суррогатной модели

A	M	Z <sub>0</sub>	C	E	СКО <sub>T2</sub>	СКО <sub>W10</sub>	СКО <sub>RH2</sub>
0,041	0,080	2,330	6,359	0,559	1,05	1,82	6,78

Выбор новых значений параметров обоснован:

- 1) минимальными значениями СКО среди всех возможных комбинаций параметров;
- 2) качественным соответствием изменений значений параметров в сторону ожидаемых (низкое альbedo и влагосодержание; высокая шероховатость и тепловая инерция; низкая излучательная способность).

Количественное отклонение параметров от физически реалистичных значений в сторону экстремальных обусловлено попыткой суррогатной модели компенсировать рост СКО, вызванный отсутствием в простой модели городского подслоя явного описания трёхмерной структуры городской застройки и антропогенных источников тепла.

Перед применением метода разностей для оценки адекватности воспроизведения аномалий метеорологических условий в Санкт-Петербурге были проанализированы систематические ошибки модели в полях приземной температуры, влажности и скорости ветра для каждой станции. Модель характеризуется устойчивым занижением приземной температуры воздуха во все исследуемые месяцы, причём наибольшие отрицательные отклонения наблюдаются в июне на станциях к западу от города, а наименьшие – в октябре на всех станциях. Относительная влажность систематически завышается моделью на всех станциях, за исключением Воейково в зимний период. Ошибки относительной влажности характеризуются высокой пространственной однородностью и достигают максимальных значений в тёплый период года на прибрежных станциях к западу от города (Кронштадт и Ломоносов). Скорость приземного ветра завышена на всех станциях, кроме Пулково, где во все месяцы, за исключением октября, СО отрицательное. Городская станция ИЦП демонстрирует стабильные характеристики ошибок прогноза на протяжении всего исследуемого периода, что свидетельствует об

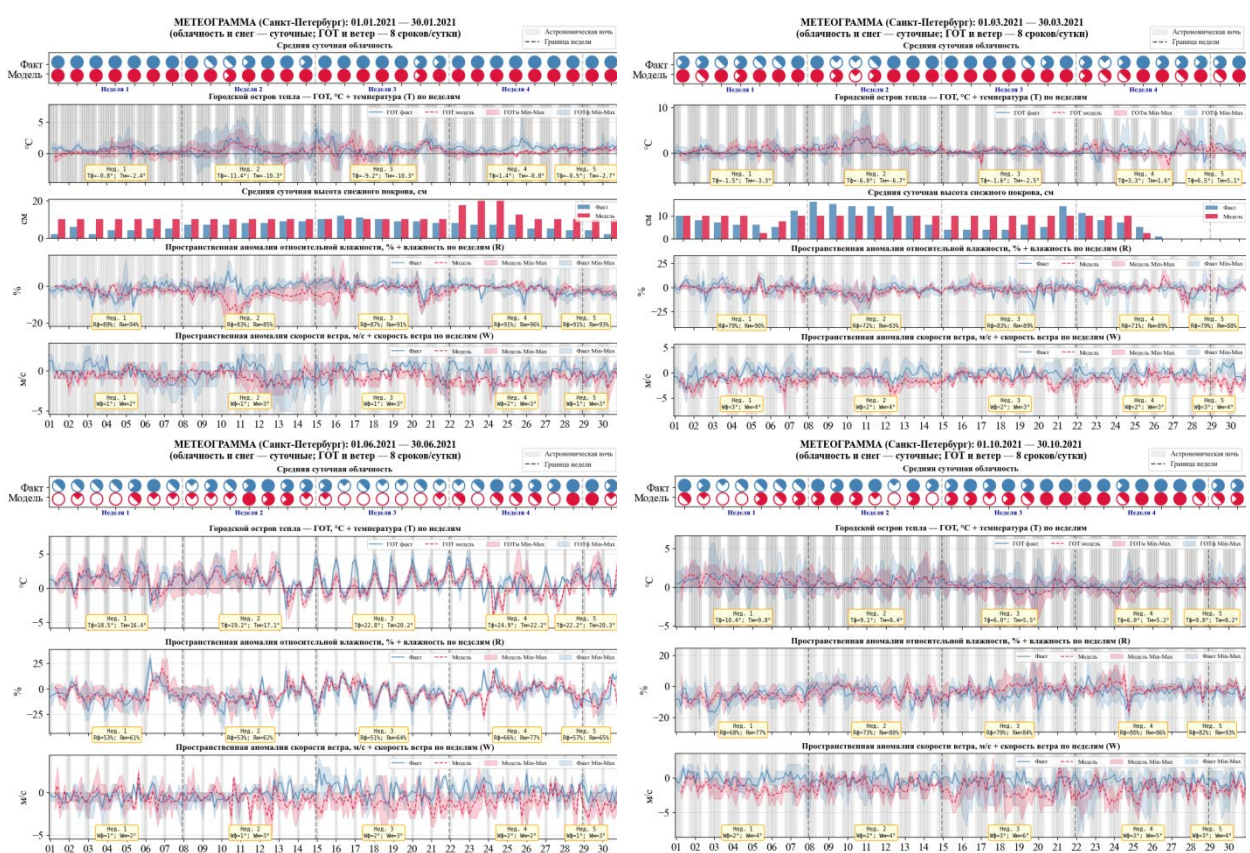
адекватности обновлённых параметров урбанизированной подстилающей поверхности; СКО температуры воздуха варьировалось от 1,5 °С (октябрь) до 3 °С (июнь), относительной влажности – от 6 % (январь) до 16 % (март), скорости ветра – от 1,5 м/с (июнь) до 2,5 м/с (октябрь). Указанные значения соответствуют минимальным или близким к минимальным отклонениям среди всех анализируемых станций за рассматриваемый период.

Выявленные систематические отклонения учтены при подготовке результатов оценки городских аномалий метеорологических условий методом разностей, поскольку они могут вносить вклад в расхождения между модельными и наблюдаемыми значениями разностей метеорологических параметров между городской и окрестными станциями. Так, в январе вследствие значительного систематического смещения ошибок приземной температуры относительно ИЦП из анализа исключена станция Пулково, в июне сравнительный анализ ГОТ по данным наблюдений и модели выполнен только для станций Пулково, Шлиссельбург и Воейково. Для анализа отрицательной аномалии относительной влажности в городе за январь из списка станций исключен пункт Воейково, за июнь – Кронштадт и Ломоносов, за октябрь – только Кронштадт. Из анализа отрицательной аномалии скорости ветра исключена станция Пулково за все месяцы.

Для комплексного анализа временной изменчивости городских эффектов с учетом влияния нескольких факторов (облачности, продолжительности светового дня, наличия и толщины снежного покрова) построены метеограммы, объединяющие разности метеорологических параметров между городской станцией ИЦП и окрестными станциями, а также временные ряды определяющих факторов (*Рисунок 7*). Сплошными линиями показана средняя разность между ИЦП и всеми загородными станциями, заливкой – диапазон значений разностей для различных пар «ИЦП–окрестная станция». В желтых прямоугольниках на графики разностей нанесены осредненные за неделю фактическое и прогностическое значения метеорологического параметра для станции ИЦП. Средняя суточная облачность и средняя суточная толщина снежного покрова также приведены для станции ИЦП.

Согласно результатам анализа, использование модели WRF-ARW с уточненными параметрами урбанизированной поверхности в SLAB позволяет воспроизводить некоторые эффекты влияния застройки Санкт-Петербурга на поля приземных метеорологических величин. Однако конфигурация модели имеет ряд недостатков (перечисленных ниже), из-за которых в дальнейшем для описания взаимодействия городской подстилающей поверхности с атмосферой целесообразно использовать специализированные модели городского подслоя. Во-первых, упрощённая параметризация деятельного слоя с постоянным влагосодержанием почвы (которая применяется как для урбанизированных, так и для природных поверхностей), вероятно, приводит к переоценке относительной влажности на загородных станциях, а при низких температурах, испарение в городе оказывается сильно подавленным. Так, во

вторую неделю января (средняя температура по данным ИЦП =  $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) модель воспроизвела выраженный остров сухости, достигающий максимума в период наибольшего развития ГОТ в ночь на 11 января ( $-15\%$  в среднем, до  $-17\%$  максимально). При этом по данным наблюдений остров сухости отсутствовал, а разность относительной влажности между городом и пригородом была положительной ( $4\%$ ). Во-вторых, даже при задании близких к экстремальным параметрам городской поверхности интенсивность ГОТ в июне оказывается ниже наблюдаемой, хотя именно летом вклад от изменённых свойств урбанизированной поверхности в формирование ГОТ максимален. В-третьих, модель не учитывает выбросы антропогенного тепла, что приводит к систематическому занижению интенсивности ГОТ в январе и в марте.



**Рисунок 7** – Сопоставление аномалий городского метеорологического режима по данным наблюдений и по данным эксперимента с простой моделью городского подслоя за январь, март, июнь и октябрь 2021 г.

В разделе 4.3 проведен анализ результатов численного эксперимента с многоуровневой моделью городского подслоя. Использовалась прогностическая модель WRF-ARW версии 4.3 совместно с многоуровневой параметризацией городского подслоя ВЕР, объединенной с моделью энергопотребления зданий ВЕМ. Для проведения численных экспериментов в разработанную конфигурацию модели были внесены следующие изменения: шаг по пространству для второй вложенной сетки уменьшен с 1 до 0,6 км,

параметризация деятельного слоя природных поверхностей изменена на схему Noah LSM, совместимую с ВЕР\_ВЕМ.

Подраздел 4.3.1 посвящен решению задачи по уточнению данных о геометрических свойствах зданий Санкт-Петербурга и их интеграции в многоуровневую модель городского подслоя.

Урбанизированная территория Санкт-Петербурга была охарактеризована в модели с применением данных различных уровней детализации. На начальном этапе использовались данные уровня L0 из международной базы данных WUDAPT (Ching J., 2018), которые представляют собой карту локальных климатических зон (ЛКЗ) Санкт-Петербурга. Используемая карта (Mansheim T., 2021) характеризуется следующими статистическими показателями качества: общая точность классификации составляет 0,73, точность идентификации городских классов ЛКЗ – 0,67, общая точность разделения урбанизированных зон от природных – 0,97, а взвешенная точность, учитывающая степень сходства между различными типами ЛКЗ, достигает 0,94. Данные уровня L0 были интегрированы во вторую вложенную модельную область. При переходе с исходной сетки данных WUDAPT на модельную сетку произошло закономерное изменение площадей локальных климатических зон. Общая пространственная структура распределения ЛКЗ сохранилась: доминирующей осталась ЛКЗ 6 (открытая малоэтажная застройка), занимающая около 51 % от урбанизированной территории. При интерполяции на модельную сетку наибольшее увеличение доли площади получила ЛКЗ 8, а наибольшее сокращение – ЛКЗ 2 и ЛКЗ 9, за счёт поглощения соседними классами.

На основе результатов раздела 3.3, было установлено, что изменение параметра шероховатости вносит наибольший вклад в изменение полей приземных метеорологических величин. Этот вывод обосновал актуальность уточнения данных о геометрии зданий в модели ВЕР\_ВЕМ, в первую очередь информации о распределении высот зданий. В качестве источника информации о характеристиках городской застройки использовалась база данных OpenStreetMap (OSM). Для ячеек сетки модели вычислялись морфологические параметры, необходимые для работы ВЕР\_ВЕМ: отношение суммарной площади оснований зданий к площади ячейки, вертикальное распределение площади зданий по высотам от 0 до 75 м, а также средняя высота зданий, взвешенная по площади оснований. Помимо этого, уточнялась доля непроницаемых поверхностей, рассчитываемая как сумма площадей оснований зданий, дорожного покрытия (ширина которого оценивалась по атрибуту числа полос) и прочих искусственных объектов с тегом «*man\_made*» в базе OSM.

Уточнение данных о реальных геометрических свойствах зданий должно вносить заметный вклад в расчет приземных прогностических полей модели, поскольку они используются непосредственно в блоке расчета длин перемешивания и в радиационном блоке ВЕР. При активации модели

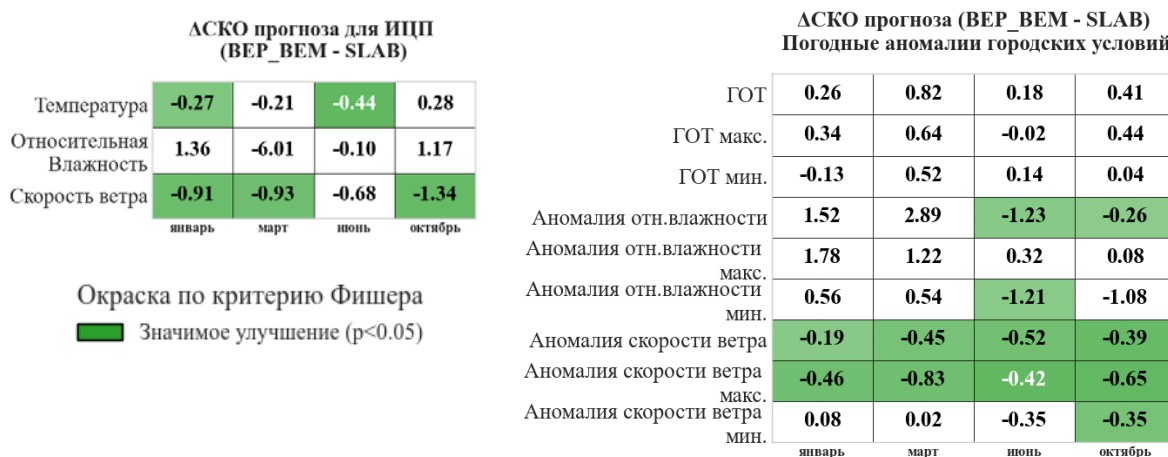
энергопотребления зданий часть уточненных морфологических параметров начинает влиять на расчеты в ВЕМ опосредованно, через предоставление из ВЕР данных о температуре снаружи и о компонентах радиационного баланса. Один из параметров используется ВЕМ непосредственно и влияет, в первую очередь, на компоненты радиационного баланса поверхностей, включая учет пропускания части солнечной радиации через оконные проемы и ее последующего поступления внутрь помещений.

Подраздел 4.3.2 посвящен верификации результатов моделирования с использованием многоуровневой модели городского подслоя по данным наземных наблюдений. Как и в случае верификации результатов моделирования с использованием простой параметризации городского подслоя, перед оценкой городских аномалий метеорологических условий методом разностей, были проанализированы систематические ошибки прогноза модели для точек станций наблюдений. На основании проведенного анализа сформулированы следующие **выводы** касательно набора станций для анализа результатов моделирования городских аномалий в полях приземных метеорологических величин. Для оценки ГОТ в январе и октябре были использованы все доступные данные наблюдений, поскольку пространственная структура ошибок температуры в эти месяцы характеризовалась относительной однородностью. В марте исключены из анализа прибрежные станции Ломоносов и Кронштадт, а в июне – все автоматические метеорологические станции (С1, В1, В6), а также станции Ломоносов и Шлиссельбург. Возможности для оценки качества прогноза **отрицательной аномалии относительной влажности** существенно ограничены несоответствием характера модельных ошибок между ИЦП и окрестными станциями: в январе и марте режиму занижения влажности на городской станции соответствует только станция Воейково; в октябре к перечню станций добавляется Кронштадт, в июне – Кронштадт и Пулково. Поле ошибок скорости ветра является относительно однородным по пространству, что позволяет использовать большинство станций для анализа **отрицательной аномалии скорости ветра**. Исключение составляют станция Шлиссельбург во все месяцы и станция Ломоносов октябре.

Результаты сопоставления интенсивности аномалий городского метеорологического режима с данными наблюдений показали, что использование многоуровневой параметризации городского подслоя существенно изменяет отклик модели в полях приземных метеорологических величин по сравнению с простой параметризацией (**Рисунок 8**). Интенсивность городского острова тепла в конфигурации ВЕР\_ВЕМ завышена в холодный период: среднемесячные значения составили 1,0 °С при 0,6 °С по наблюдениям в январе и 1,7 °С при 0,8 °С по наблюдениям в марте. В июне, напротив, среднемесячная интенсивность ГОТ оказалась заниженной (0,5 °С при 1,0 °С по наблюдениям) вследствие избыточного дневного выхолаживания. Сравнительный анализ СКО прогнозов показал, что приземная температура на

станции ИЦП воспроизводится новой моделью лучше в январе и июне, однако прироста качества прогноза интенсивности ГОТ не наблюдается: среднемесячные СКО средних, минимальных и максимальных значений интенсивности ГОТ в ВЕР\_ВЕМ выше, чем в SLAB.

В отношении относительной влажности воздуха преимущество ВЕР\_ВЕМ, проявилось в сокращении СКО прогноза на станции ИЦП в марте (-6 % относительно SLAB, однако улучшение не значимо согласно расчету критерия Фишера). В поле городской аномалии относительной влажности отчётливо проявилась сезонная зависимость качества прогноза: в тёплый период (июнь, октябрь) СКО среднемесячных аномалий в ВЕР\_ВЕМ ниже, а различия дисперсий статистически значимы по критерию Фишера. Минимумы аномалии влажности значимо лучше воспроизведены ВЕР\_ВЕМ в июне. При этом максимальная интенсивность острова сухости в ВЕР\_ВЕМ воспроизводится сопоставимо со SLAB (критерий Фишера не выявил статистически значимых различий во все месяцы, кроме января).



**Рисунок 8** – Анализ разностей СКО прогноза между экспериментами с современной моделью городского подслоя ВЕР\_ВЕМ и простой параметризацией урбанизированной поверхности

Интенсивность аномалии скорости ветра систематически завышена обеими конфигурациями модели во все сезоны, при этом SLAB переоценивает ослабление ветра в городе, тогда как ВЕР\_ВЕМ стабильно превосходит SLAB при прогнозе скорости ветра на станции ИЦП: во все анализируемые месяцы СКО сократилось примерно на 1 м/с. Расчеты критерия Фишера также указывают на значимое сокращение отклонений результатов ВЕР\_ВЕМ от наблюдений в сравнении со SLAB во все месяцы, кроме июня ( $F =$  от 1,8 в марте до 2,3 в октябре). Также во все месяцы СКО среднемесячных и максимальных значений городской аномалии скорости ветра ниже в ВЕР\_ВЕМ (значения критерия Фишера находятся в диапазоне 1,4..2,3). Минимальные аномалии воспроизведены обеими моделями сопоставимо, значимое преимущество ВЕР\_ВЕМ выявлено в октябре ( $F=1,64$ ).

Таким образом, модель WRF-ARW с параметризацией ВЕР\_ВЕМ и уточненными данными о геометрии зданий Санкт-Петербурга продемонстрировала устойчивое преимущество при прогнозе скорости ветра и её аномалии в городской черте по сравнению с простой параметризацией урбанизированной поверхности.

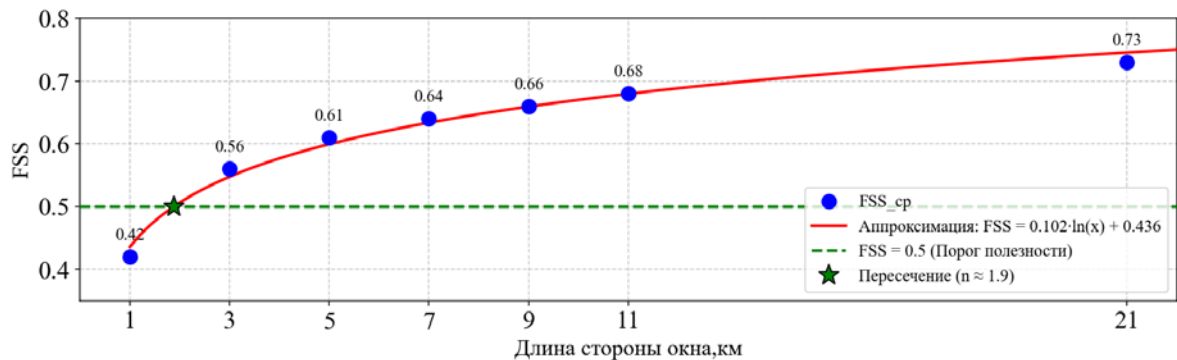
Подраздел **4.3.3** посвящен верификации результатов моделирования температуры подстилающей поверхности в эксперименте с ВЕР\_ВЕМ по данным дистанционного зондирования Земли. Для верификации использован продукт MOD11\_L2 версии 6.1, содержащий данные о температуре (LST) поверхности суши с пространственным разрешением 1000 м и 5-минутным временным интервалом формирования спутниковых сцен. Для анализа результатов моделирования было собрано 1203 изображения, содержащих данные о температуре подстилающей поверхности Санкт-Петербурга и его ближайших окрестностей за январь, март, июнь и октябрь 2021 г. После предварительной фильтрации, направленной на отбор снимков LST мегаполиса, сделанных в безоблачную и малооблачную погоду, выборка данных составила 27 изображений за июнь, 22 за март, 24 за октябрь и лишь 7 изображений за январь (всего 80 снимков). Снимки сопоставлены с результатами прогноза на ближайшем временном шаге модели. Предварительная обработка результатов численных экспериментов включала билинейную интерполяцию данных о температуре поверхности с более подробной сетки модели на более грубую сетку данных наблюдений и наложение маски, соответствующей облачным пикселям и водной поверхности на снимке.

Для учёта ошибки пространственного смещения и оценки качества прогноза в зависимости от пространственного масштаба была использована оценка мастерства прогноза по долям (Fractions Skill Score, FSS). Метод расчета FSS требует преобразования непрерывных полей LST в бинарные поля на основе превышения порогового значения. В качестве пороговых значений были приняты:

1.  $LST_{urb}$  – средняя температура подстилающей поверхности в ячейках сетки, классифицированных как урбанизированные;
2.  $LST_{5,2}$  – средняя температура в ячейках, классифицированных как открытые среднеэтажные и компактные среднеэтажные;
3.  $LST_2$  – средняя температура только в ячейках, классифицированных как компактные среднеэтажные.

Для определения оптимального размера окрестности (пространственной области, в пределах которой оценивается совпадение модельных и спутниковых данных) был проведён анализ зависимости FSS от длины стороны окна при пороговом значении, равном средней LST урбанизированной области. В качестве репрезентативного периода были выбраны данные за июнь 2021 года, когда было собрано наибольшее количество спутниковых снимков. Значения FSS рассчитывались за каждый доступный срок для окрестностей

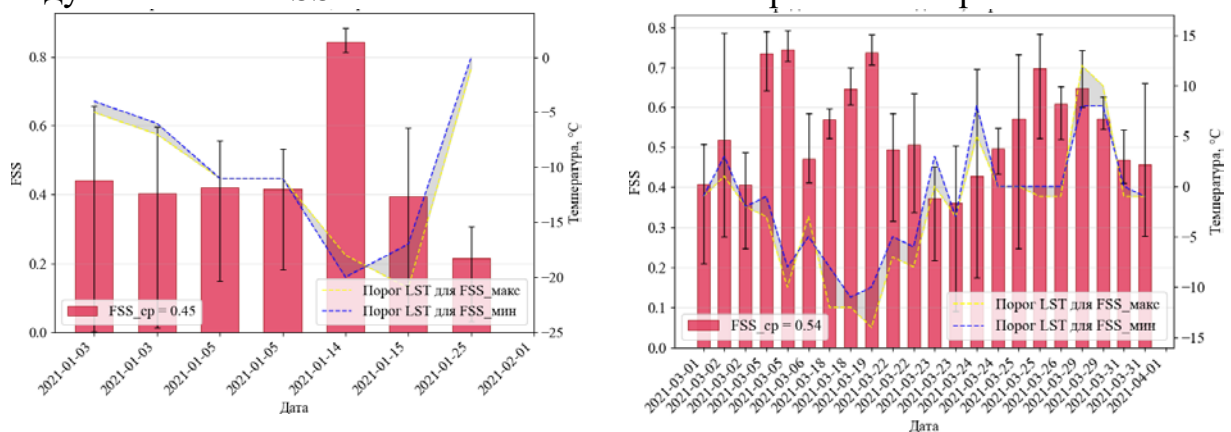
размером 1, 3, 5, 7, 9, 11 и 21 км. Полученные значения были осреднены за выбранный период, после чего был построен график зависимости осреднённого FSS от размера окна (*Рисунок 9*).

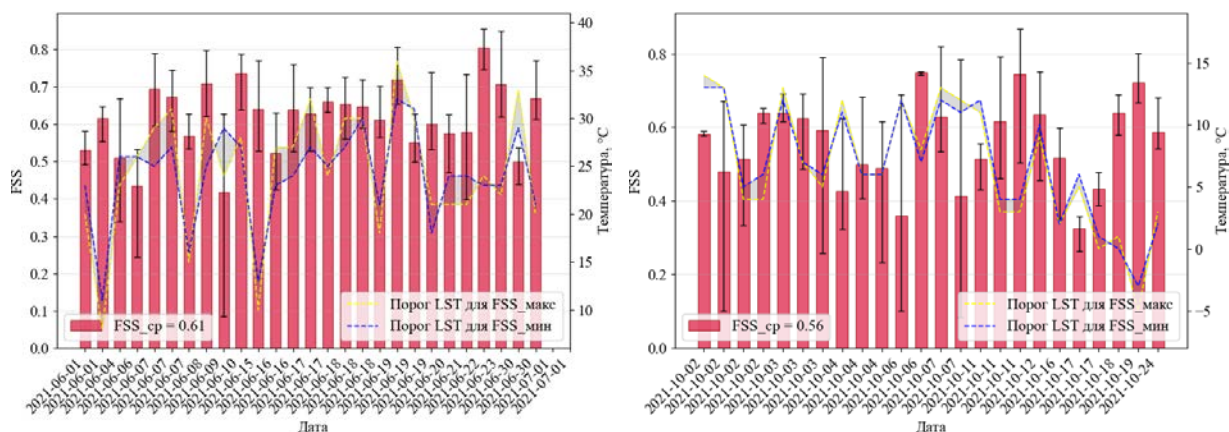


**Рисунок 9** – Зависимость оценки мастерства прогноза LST от размеров окрестности

Пороговое значение мастерства прогноза достигается уже при размере окна около 1,9 км, что соответствует ближайшему целому нечётному значению 3 км. Однако анализ данных за март и октябрь показал, что при размере окна 3 км указанный порог не достигается. С учётом этого обстоятельства оптимальный размер окна для верификации прогноза LST был принят равным 5 км, что обеспечило устойчивое превышение порога полезности прогноза во все рассматриваемые периоды, кроме января (*Рисунок 10*).

Наилучшее мастерство прогноза пространственной структуры полей LST наблюдалось в июне, тогда как в переходные сезоны мастерство прогноза было несколько ниже, хотя и превышало пороговое значение полезности. Установлено, что модель с многоуровневой параметризацией городского подслоя и уточненными данными о реальных характеристиках городской застройки демонстрирует наиболее высокое и стабильное мастерство прогноза в условиях значительного температурного контраста между областями с разной степенью урбанизации, о чём свидетельствует положительная связь между величиной FSS и значениями абсолютной разности порогов LST.





**Рисунок 10** – Временной ход показателя FSS при размере окрестности 5 км

В **заключении** сформулированы основные результаты работы и перспективы дальнейших исследований.

### Наиболее важные результаты работы

1. **Проведен** полный анализ чувствительности прогностических приземных метеорологических характеристик к изменению параметров урбанизированной поверхности в простой параметризации городского подслоя в следующих диапазонах: альbedo поверхности 0,01..1,0, влагосодержание почвы 0,02..1,0, шероховатость 0,05..3,0 м, тепловая инерция почвы 1,0..7,0 Дж·м<sup>-2</sup>·К<sup>-1</sup>·с<sup>-1/2</sup>, излучательная способность поверхности 0,8..1,0. **Показано**, что изменение шероховатости вносит наибольший вклад (суммарное влияние от 0,7 до 0,9) в изменение не только скорости приземного ветра в течение суток, но и в изменение приземной температуры, относительной влажности и высоты пограничного слоя ночью совместно с параметром тепловой инерции почвы.
2. **Уточнены** параметры урбанизированной поверхности в простой параметризации городского подслоя на основе метода полного анализа чувствительности Соболя. Для снижения вычислительных затрат применён метод приближенного (суррогатного) моделирования, который позволил сократить количество расчетов мезомасштабной модели более чем в 10 раз по сравнению с полным перебором.
3. **Проведена** процедура интеграции данных о реальной геометрии городской застройки Санкт-Петербурга в многоуровневую параметризацию городского подслоя ВЕР\_ВЕМ.
4. **Показано**, что уточнение данных о реальной геометрии зданий обеспечило устойчивое улучшение прогноза скорости ветра на городской станции по сравнению с результатами простой модели городского подслоя: снижение среднеквадратического отклонения на ~1 м/с во все месяцы, а также снижение СКО среднемесячных и максимальных значений городской аномалии скорости ветра.

5. Для внедрения в практику ФГБУ «Северо-Западное УГМС» целесообразно использовать конфигурацию мезомасштабной модели WRF-ARW с многоуровневой параметризацией ВЕР\_ВЕМ и уточненными данными о геометрических характеристиках городской застройки. Данная конфигурация будет наиболее полезна для краткосрочного прогноза метеорологических параметров в городской среде, в частности приземного ветра в течение всего года и приземной температуры в тёплый период.
6. Положительный эффект от уточнения данных о геометрии застройки для прогноза скорости ветра свидетельствует о **применимости** аналогичного подхода для улучшения воспроизведения многоуровневой моделью аномалий температуры и влажности воздуха в Санкт-Петербурге путем дальнейшего уточнения параметров, характеризующих свойства городской поверхности.

## Список публикаций автора по теме диссертации

Публикации в изданиях, входящих в список 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.
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, с. 70–81.

Содержание диссертации также отражено в следующих публикациях:

1. Ладохина Е. М. Исследование влияния Санкт-Петербурга на распределение приземной температуры и осадков по данным многолетних измерений / **Ладохина Е. М.**, Рубинштейн К.Г. // Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ. Сборник тезисов Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Российского государственного гидрометеорологического университета. 2020.
2. Ладохина Е. М. Улучшение качества численного прогноза для города с помощью изменения коэффициентов подстилающей поверхности / **Ладохина Е. М.**, Рубинштейн К.Г. // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России. Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, приуроченной к Году науки и технологий. Иркутск, 2021. С. 411–419.
3. Ладохина Е. М. Влияние параметров поверхности Санкт-Петербурга на циркуляцию атмосферы над ним / **Ладохина Е. М.**, Рубинштейн К.Г. // CITES'2021:

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

4. Ладохина Е. М. Предварительные результаты учета реального распределения типов подстилающей поверхности в регионе Санкт-Петербурга / **Ладохина Е. М.**, Рубинштейн К.Г. // Всероссийская конференция, посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова «Турбулентность, Динамика Атмосферы и Климата». Москва, 2022.

5. Ладохина Е. М. Воспроизведение региональных особенностей атмосферных процессов в регионе Санкт-Петербурга с учетом реального распределения типов урбанизированной поверхности / **Ладохина Е. М.**, Рубинштейн К.Г. // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России. Материалы V Всероссийской научно-практической конференции. Отв. редактор Е.Н. Сутырина. Иркутск, 2023. С. 333–338. ISBN 978-5-9624-2119-3

6. Ладохина Е. М. Определение оптимальных параметров урбанизированной поверхности Санкт-Петербурга методами глобального анализа чувствительности / **Ладохина Е. М.**, Рубинштейн К.Г. // Всероссийская конференция с международным участием Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования. Москва, 2023. С. 212–212. ISBN 978-5-89155-397-2. (<https://climate-ras.ru/conf-climate2023>)

7. Влияние урбанизации на атмосферу Санкт-Петербурга: численные эксперименты с различными параметризациями городского полога / **Ладохина Е. М.**, Рубинштейн К.Г. // Всероссийская конференция, посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова «Турбулентность, Динамика Атмосферы и Климата». Москва, 2024. С. 186.