

Федеральное государственное бюджетное учреждение
"ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНОИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ"
(ФГБУ "ГИДРОМЕТЦЕНТР РОССИИ")

На правах рукописи

Ладохина Екатерина Михайловна

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

1.6.18 — Науки об атмосфере и климате

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

Рубинштейн Константин Григорьевич

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Обзор исследований о влиянии городской застройки на метеорологические поля	10
Раздел 1.1. Влияние застройки крупных городов, расположенных в зоне умеренно-континентального климата, на нижнюю тропосферу.....	10
Раздел 1.2. Аномалии метеорологических условий в Санкт-Петербурге: обобщение существующих научных материалов.....	18
Раздел 1.3. Исследования о влиянии застройки крупных городов на метеорологические условия с помощью численных прогностических моделей атмосферы.....	25
Выводы к главе 1	35
Глава 2. Определение периодов высокоинтенсивных аномалий метеорологических условий в Санкт-Петербурге по данным наблюдений.....	37
Раздел 2.1. Физико-географическая характеристика района и станций наблюдений.....	37
Раздел 2.2. Определение периодов проявления ГОТ высокой интенсивности	40
Раздел 2.3. Анализ влияния Санкт-Петербурга на осадки	48
Раздел 2.4. Анализ влияния Санкт-Петербурга на приземный ветер.....	54
Раздел 2.5. Периоды комплексного проявления высокоинтенсивных аномалий метеорологических условий в Санкт-Петербурге.....	57
Выводы к главе 2	60
Глава 3. Анализ чувствительности прогностических полей численной модели к изменению параметров подстилающей поверхности, характеризующих урбанизированные районы Санкт-Петербурга	62
Раздел 3.1. Методы анализа чувствительности	62
Раздел 3.2. Локальный анализ чувствительности	66
Раздел 3.3. Полный анализ чувствительности прогностических полей к изменению параметров подстилающей поверхности Санкт-Петербурга	75
Выводы к главе 3	80
Глава 4. Численное моделирование влияния Санкт-Петербурга на метеорологические поля	81
Раздел 4.1. Проявление эффектов влияния городской застройки на поля приземной температуры, влажности и скорости ветра по данным стационарных наблюдений.....	82
4.1.1. Оценка репрезентативности данных автоматических метеорологических	

<i>станций</i>	82
<i>4.1.2. Городской остров тепла по данным стационарных наблюдений</i>	85
<i>4.1.3. Остров сухости в Санкт-Петербурге по данным наземных наблюдений за относительной влажностью</i>	86
<i>4.1.4. Отрицательная пространственная аномалия скорости ветра в Санкт-Петербурге по данным наземных наблюдений</i>	87
Раздел 4.2. Моделирование с использованием простой параметризации урбанизированной поверхности	88
<i>4.2.1. Методика уточнения параметров урбанизированной поверхности</i>	88
<i>4.2.2. Верификация результатов моделирования по данным наземных наблюдений</i>	93
Раздел 4.3. Моделирование с использованием схемы городского подслоя ВЕР_ВЕМ.....	102
<i>4.3.1. Уточнение и интеграция данных о геометрических свойствах зданий Санкт-Петербурга в многоуровневую модель городского подслоя</i>	103
<i>4.3.2. Верификация результатов моделирования по данным наземных наблюдений</i>	108
<i>4.3.3. Верификация результатов моделирования температуры подстилающей поверхности по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ)</i>	117
Выводы к главе 4	124
Заключение.....	127
Список сокращений и условных обозначений	129
Список литературы.....	131
Приложение	143

Введение

Санкт-Петербург – город федерального значения, крупнейший мегаполис Северной Европы с населением 5,6 млн человек (по данным на 01.01.2024) и площадью 1 447,67 км². Город расположен в восточной части Финского залива, в дельте реки Невы, являющейся частью густой сети естественных и искусственных водных артерий. Протяжённость городской агломерации достигает 32 км с севера на юг и около 50 км с северо-запада на юго-восток в пределах КАД. Сложные гидрогеологические условия, обусловленные близостью акваторий, создают специфические требования к оценке влияния городской застройки на атмосферные процессы.

Процесс урбанизации Санкт-Петербурга продолжает интенсивно развиваться. В 2022 году введено в эксплуатацию 1 461 жилой дом общей площадью 3 474,17 тыс. м². Согласно прогнозам, объём нового жилищного строительства с 2019 по 2040 год составит 67 млн м², при этом около 66 % нового строительства уже размещается на ранее свободных от застройки территориях. Такая масштабная трансформация подстилающей поверхности неизбежно влияет на локальные метеорологические условия и микроклимат города, усиливая комплекс взаимосвязанных эффектов: городской остров тепла, остров «сухости», изменение режима ветра и перераспределение осадков.

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 и др.) 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, 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.

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 (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.

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 полученных результатов заключается в следующем:

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».

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 ВЕР_ВЕМ, 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 упрощённом алгоритме, обученном по созданной выборке результатов мезомасштабного моделирования.

По результатам анализа чувствительности, выполненного для модели SLAB, для эксперимента с ВЕР_ВЕМ 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 ВЕР_ВЕМ 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.

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 ($ST = 0,6$), альbedo – 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.

Достоверность результатов работы подтверждается использованием моделей городского подслоя, проанализированных в предшествующих научных работах и успешно применяемых для решения задач 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 эффектов влияния Санкт-Петербурга на метеорологические поля, а также для верификации результатов численного моделирования; верификацией результатов численного моделирования в соответствии с методическими рекомендациями по верификации метеорологических прогнозов (Киктев и др., 2021); докладами автора на научных конференциях и семинарах Гидрометцентра России; публикацией основных результатов в рецензируемых российских научных изданиях, входящих в перечень ВАК.

Апробация работы

Автор лично представлял результаты своей работы на 5-и **российских** (IV Всероссийская научно-практическая конференция, приуроченная к Году науки и технологий – Иркутск, 2021; Всероссийская конференция, посвящённая памяти академика Александра Михайловича Обухова «Турбулентность, динамика атмосферы и климата» – Москва, 2022, 2024; V Всероссийская научно-практическая конференция «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России» — Иркутск, 2023; Всероссийская конференция с международным участием «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования» – Москва, 2023) и 2-х **международных** (Международная научно-практическая конференция, посвящённая 90-летию Российского государственного гидрометеорологического университета – Санкт-Петербург, 2020; CITES'2021: Международная молодёжная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде, посвящённые памяти члена-корреспондента РАН Василия Николаевича Лыкосова – Томск, 2021) научных **конференциях**, а также на научных **школах** (Школа молодых учёных Российского государственного гидрометеорологического университета – Санкт-Петербург, 2024, 2025). Основные итоги диссертации опубликованы в 4-х научных статьях, включенных в перечень Высшей Аттестационной Комиссии (по состоянию на 25.11.2025 года).

Реализация работы

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

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 уточненных значений параметров урбанизированной поверхности с применением результатов полного анализа чувствительности; для современной параметризации выполнена интеграция 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.

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 объем 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 143 страницах текста, включая 45 рисунков, 11 таблиц и 1 приложение.

Глава 1. Обзор исследований о влиянии городской застройки на метеорологические поля

Раздел 1.1. Влияние застройки крупных городов, расположенных в зоне умеренно-континентального климата, на нижнюю тропосферу

Урбанизированные территории оказывают существенное влияние на состояние атмосферы над городом и в его окрестностях. Концентрация населения в городских районах, где происходит развитие сложной инфраструктуры, сопровождается неизбежными выбросами загрязняющих веществ от промышленных предприятий, объектов теплоэнергетики и транспорта. Наряду с этим, процесс урбанизации сопряжен с трансформацией природного ландшафта под воздействием градостроительных решений и производственно-хозяйственной деятельности человека, в результате чего формируется урбанистический ландшафт, обладающий специфическими характеристиками, отличными от первоначального состояния местности. Эти факторы приводят к ухудшению качества атмосферного воздуха, изменениям в радиационном, тепловом и водном балансе системы «городская атмосфера-подстилающая поверхность». Для того чтобы охарактеризовать влияние урбанизированных территорий на поля метеорологических элементов, часто используют термин «urban effects» [Lowry, 1977] или микроклиматические (локальные) эффекты урбанизированной территории [Климат Москвы..., 2017]. Совокупность устойчивых отклонений метеорологических величин в городе от их фоновых значений на прилегающей незастроенной территории в дальнейшем будем называть аномалиями метеорологических условий города.

Спектр метеорологических аномалий, характерных для крупного города умеренных широт, удобно рассмотреть на примере Москвы (55°45' с.ш.). Наличие разнообразных источников данных наблюдений, а также компактная эллипсоидная форма города, ровный рельеф и отсутствие крупных водоёмов вблизи застроенной территории минимизируют влияние посторонних факторов, что делает Москву практически идеальным объектом для изучения городских аномалий метеорологических условий. Погодный режим Санкт-Петербурга существенно отличается от московского: расположение непосредственно на берегу Финского залива придаёт его климату черты морского, тогда как климат Москвы носит умеренно континентальный характер. В связи с этим к рассмотрению привлекаются два контрастных

примера: Торонто (43°42' с.ш.) и Новосибирск (55°03' с.ш.). Торонто – крупный североамериканский город, климат которого, формируясь под влиянием озера Онтарио, приобретает черты, сближающие его с морским. Этот город отличается высокой плотностью высотной застройки – здесь сосредоточено больше небоскребов, чем в любом другом городе Северной Америки. Город считается экономическим центром страны, в нем проживает порядка 2,8 млн человек на площади более 630 км². Новосибирск – крупнейший город Сибири по количеству населения (1,4 млн. чел.) и занимаемой площади (более 500 км²). Он расположен на юго-востоке Западно-Сибирской равнины по обоим берегам р. Оби. Левобережная его часть имеет плоский рельеф, правобережная изрезана оврагами и балками с перепадом высот до 214 м. Для города характерна сверхвысокая концентрация промышленного производства; три четверти всей промышленной продукции Новосибирской области производится в городе.

Приземный городской остров тепла теоретически определяется как разность температур между городом и сельской местностью, взятая на границе раздела системы «атмосфера–подстилающая поверхность» [Oke et al., 2017]. Характеристики приземного городского острова тепла Москвы подробно рассмотрены в [Климат Москвы., 2017] на основе данных наблюдений с городских и фоновых метеорологических станций за два периода: 1977–1986 гг. и 2007–2016 гг. Средняя интенсивность ГОТ, определяемая как разность температур между 6-ю (8-ю в 2007–2016 гг.) городскими и 9-ю фоновыми станциями наблюдений, составила 1,6°С в период 1977–1986 гг. и 2°С в 2007–2016 гг. Согласно результатам исследования, суточный ход интенсивности ГОТ Москвы подчиняется общей закономерности, характеризующейся минимумом в дневные часы и максимумом в ночное время [Oke et al., 2017]. Данная особенность наиболее отчетливо проявляется в тихую и безоблачную погоду, при этом интенсивность ГОТ в летний период в среднем выше, чем в зимний.

При исследовании межгодовой изменчивости городского острова тепла Москвы [Климат Москвы., 2017] в период 1977–2016 гг. отмечается существенный рост интенсивности летнего ГОТ, начиная с 1990-х годов. Возможными объяснениями данной тенденции могут служить как увеличение повторяемости синоптических ситуаций, благоприятных для формирования ГОТ, так и урбанистические изменения, такие как рост количества автотранспорта [Lokoshchenko, 2014]. Гипотеза об урбанистической причине аномального ускорения потепления климата Москвы подкрепляется высокими значениями коэффициентов наклона линейных трендов температур для метеорологических станций Московского региона [Климат Москвы., 2017].

Интенсивность городского острова тепла в Москве, как и во многих других крупных городах, демонстрирует тенденцию к усилению в последние годы, особенно в летний период во время наиболее жарких дней. Это явление усугубляет тепловой стресс и увеличивает нагрузку на здоровье жителей. Ключевым фактором негативного воздействия на городское население

является повышение минимальных температур в суточном цикле, так как ГОТ наиболее выражен в ночное время. Сравнительный анализ [Климат Москвы., 2017] показывает, что характерные значения летних ночных максимумов интенсивности ГОТ в Москве возросли с примерно 7 °С в 1977–1986 гг. до порядка 10 °С в 2007–2016 гг. При этом дневные показатели, как средние, так и экстремальные, изменились незначительно. В контексте сопоставления ГОТ городов в зоне умеренно-континентального климата интересно отметить недавнее исследование ГОТ Монреаля [Lauer et al., 2023]: повышение приземной температуры воздуха в отдельных случаях достигало 4..5 °С в ночные часы, что ниже показателей Москвы.

В ходе исследования пространственного распределения температуры на территории Москвы по данным сети автоматических метеорологических станций ФБГУ "Центральное УГМС" и станций комплексного загрязнения атмосферы ГБУ "Мосэкомониторинг" [Климат Москвы., 2017] было установлено, что пространственная структура Московского острова тепла соответствует классической концентрической схеме, с максимумом интенсивности ГОТ в центре города. При этом, пространственная аномалия температуры демонстрирует плавный переход от окраин к центру города, четко выраженного "уступа" (отмечаемого на границе подстилающих поверхностей «город–сельская местность» [Оке, 1982; Ландсберг, Гельмут, 1983]) не прослеживается.

Города с континентальным климатом, являются крупнейшими потребителями энергии из-за значительной потребности в отоплении и охлаждении помещений [Оке et al., 2017]. С учетом высоких широт региона и повышенной потребности в отоплении максимальная интенсивность ГОТ может приходиться на зимний период. Например, исследования ГОТ Торонто [Allen et al., 2014] показывают значительное снижение числа холодных ночей в зимний, весенний и летний периоды, а также существенное уменьшение рекордно низких минимальных температур в период 1971–2000 гг. на метеостанциях в городской черте. Анализ среднесезонной интенсивности городского острова тепла с 1984 по 2014 год также подтверждает, что его наибольшие значения, достигающие 7,1 °С в 2003 году, наблюдаются преимущественно зимой [Ye et al., 2017]. В среднем центральная часть города теплее сельских районов примерно на 3°С с некоторыми сезонными вариациями. Оценивается, что как минимум 30 % потепления с 1840 года связано с развитием городского острова тепла [Mohsin et al., 2010]. Новые высотные конструкции в центре города способны снизить дневную температуру воздуха почти на 1°С за счет создания затенения, но ночью здания удерживают больше тепла, уменьшая эффект ночного охлаждения [Berardi, Wang, 2016]. В Москве экстремально большие разности приземных температур «город–сельская местность» отмечаются зимой в предрассветные часы [Кузнецова и др., 2017].

ГОТ Новосибирска также наиболее отчетливо проявляется зимой, при этом на поле приземной температуры влияют особенности рельефа левобережной и правобережной частей

города [Лучицкая и др., 2014]. На левобережье, застроенном жилищной инфраструктурой, средняя температура января на 1,5 °С выше по сравнению с окрестностями. В северной части города, в районе бывшего аэропорта, также теплее, чем в пригороде, но на 1 °С. Весной городские районы прогреваются быстрее, а акватории водоемов оказывают охлаждающее влияние. Так, апрельская средняя месячная температура в городе и вблизи водохранилища разнится почти вдвое. В летнее время искусственные покрытия в городе прогреваются сильнее, чем почва под естественным покровом. Значительному нагреву способствуют и малые затраты тепла на испарение, которые в самом городе уменьшаются почти на 20 % по сравнению с пригородом. Температура июля (левобережье Новосибирска) выше на 0,7 °С, чем вдали от города. В районе аэропорта летняя температура несколько ниже.

Значительны различия экстремальных температур воздуха в черте города и в пригороде. По данным за период 1966–2007 гг., в январе 1969 г. разница зафиксированных экстремумов «город–пригород» составила 3,5 °С [Лучицкая и др., 2014]. В аномально жаркую погоду мая 2004 г. разность температуры в городе и в зоне влияния Новосибирского водохранилища также достигла 3..3,5 °С. Анализ межгодовой изменчивости разницы экстремально холодных температур между Новосибирском и пригородами позволяет предположить возможное дальнейшее «потепление» городского климата вследствие повышения плотности застройки, замены природных поверхностей на искусственные, а также роста энергопотребления. За период 1966–2009 гг. максимальная разность между городом и пригородом в самый холодный день января 2006 г. составила 8,0 °С, тогда как в прежние годы не превышала 6,5 °С.

Подробное исследование **вертикальной структуры городского острова** тепла представляет значительную сложность вследствие ограниченных возможностей наблюдательной сети метеорологических станций. Результаты, полученные с помощью одновременных наблюдений ночного ГОТ в Монреале в приземном слое с использованием автомобильных измерений и в пограничном слое атмосферы путем аэрозондирования с вертолета, стали одним из первых описаний вертикальной структуры данного явления [Oke, East, 1971]. Измерения, проведенные в Монреале 7 и 12 марта при погодных условиях, благоприятствующих формированию городского острова тепла, позволили получить вертикальное распределение температурной аномалии в нижнем 1-километровом слое над подстилающей поверхностью города. У земли интенсивность ГОТ составила 4..4,5 °С; на наветренной сельско-городской границе сформировался внутренний городской пограничный слой (ГПС), толщина которого росла к центру города, где поверхность наиболее шероховатая и теплая. В центре города внутренний ГПС достигал толщины 250–300 м (высота самых высоких зданий), а ближе к реке по обеим сторонам острова Монреаль, утончался, исчезая за пределами центра города. Инверсия, наблюдавшаяся в сельской местности, разрушалась в результате турбулентного перемешивания, в центре Монреаля нижние слои ГПС

были неустойчивы, а верхние нейтральны или слегка устойчивы.

Для некоторых городов в верхней части ГОТ существует слой небольшой толщины, где город холоднее, чем на той же высоте в сельской местности (приподнятый слой холода или кросс-овер эффект) [Oke et al., 2017]. Современные системы спутникового зондирования позволяют значительно расширить сведения о вертикальной структуре ГОТ. Так по данным измерений с полярно-орбитальных систем MetOp была проанализирована разность температур между Москвой и ее окрестностями в слое 0–3000 м на основе среднемесячных значений (2015–2017 гг.) [Варенцов и др. 2017; Горлач и др., 2017]. В январе значимые положительные разности температур наблюдаются днем до высоты 1000 м, в вечерние часы – до высоты 800 м. в мае (2000 м и 1750 м) в декабре и июле – до 3000 м вечерние часы. В декабре статистически подтверждается гипотеза о кросс-овер эффекте – на высотах 1500–1750 м в предполуденные часы разности температур около $-0,2$ С.

Подземный остров тепла формируется вследствие передачи тепла от городской поверхности и городской инфраструктуры (метро, канализационные системы, отопительные коммуникации) в почву. По данным 1960–1961 гг. [Lokoshchenko, Korneva, 2015] подземный остров тепла Москвы проявляется в слое почвы и грунта на глубинах по меньшей мере до 320 см. Максимум интенсивности этого явления наблюдается зимой и весной, а минимум – летом. Амплитуда городского хода подземного острова тепла Москвы последовательно уменьшается с глубиной.

По данным [Горбатенко, 2003] над восточными районами Москвы с 1955 г. существовал **остров аэрозольной мутности (городской аэрозольный остров)**. Влияние города на аэрозольное загрязнение атмосферы, в основном связанное с промышленным производством, обнаруживалось во все сезоны года при ветрах с восточной составляющей (со стороны центра мегаполиса и его промышленных районов). Наибольшие разности между средними суточными показателями мутности атмосферы над Москвой и пригородом наблюдались при господстве чистых арктических воздушных масс в регионе.

В условиях, благоприятных для формирования ГОТ, были получены особенности вертикальной структуры острова городской мутности в атмосфере над Монреалем [Oke, East, 1971; Oke et al., 2017]. Анализ вертикального профиля концентраций диоксида серы в центральной части города выявил наличие узкого приподнятого слоя с высокими концентрациями в диапазоне высот 125–200 м, верхняя граница которого совпадала с инверсионным слоем атмосферы. Ниже этого слоя располагался неустойчивый слой, где наблюдался эффект городского "задымления", – равномерного перемешивания загрязняющих веществ вплоть до приземного уровня. Результаты исследований, проведенных в Монреале, свидетельствуют о незначительной роли загрязнителей атмосферы в формировании городского

острова тепла.

Городской остров влажности/сухости представляет собой комплексное явление, характеризующееся различиями в содержании атмосферной влаги между городскими и сельскими территориями. Исследование этого явления осложняется многообразием показателей содержания влаги в атмосфере, таких как абсолютная и относительная влажность, которые зависят не только от содержания водяного пара, но и от давления и температуры воздуха, что затрудняет прямое сравнение влажности воздуха в различных регионах. Тем не менее, как правило в дневное время воздух в городе часто оказывается суше, чем в сельской местности, что обусловлено пониженными скоростями испарения из-за меньшей доли растительного покрова в городских районах. Напротив, ночью и зимой в городах средних и высоких широт обычно наблюдается избыток влаги [Оке et al., 2017].

Исследование городского острова влажности/сухости в Московском регионе выявило значительные различия в содержании водяного пара между городской и сельской средой [Локощенко и др., 2016; Варенцов и др., 2017b; Lokoshchenko, 2017]. Анализ данных, полученных с помощью интерферометра IASI, основывался на измерении удельной влажности, что позволило исключить влияние вариаций температуры и давления на результаты. В теплый период года наблюдалась отчетливая суточная динамика: в предполуденные часы формировался остров сухости с отрицательной аномалией влажности около $-0,4$ г/кг, распространяющийся от поверхности земли до высоты 1000 м, тогда как в вечерние часы на высотах 1000–3000 м образовывался остров влажности с положительной аномалией порядка $0,3$ г/кг. В холодный период абсолютные величины аномалий удельной влажности были существенно меньше, в среднем, не превышая $0,1$ г/кг за месяц. Несмотря на это, удалось идентифицировать характерные структуры: днем остров сухости наблюдался на высотах 300–1250 м, ночью – 1000–2500 м, в то время как остров влажности формировался в ночные часы в нижнем 150-метровом слое атмосферы.

В поле относительной влажности ее значения для городских станций Москвы (ВДНХ и МГУ) практически всегда ниже, чем на фоновых станциях, как зимой, так и летом, что свидетельствует о наличии острова сухости. Летом в ночные часы остров сухости проявляется сильнее, чем днем. В среднем за год наблюдается отрицательная городская аномалия относительной влажности как для среднесуточных, так и для среднегодовых значений, причем сильнее всего она выражена летом и слабее всего зимой.

В Новосибирске [Лучицкая и др., 2014] различия парциального давления водяного пара в городе и пригороде не прослеживаются в холодный период. Они начинают проявляться с апреля и сохраняются все лето. Весной, причиной служит более быстрый прогрев освобожденной от снежного покрова территории города, где формируется остров влажности, достигающий

максимальной интенсивности в мае (2,5 гПа). В июле парциальное давление в черте города ниже в среднем на $-1,9$ гПа по сравнению с пригородом, однако это связано в большей степени с тем, что пригородные станции расположены в непосредственной близости к водоему, и воздух в их окрестностях более обеспечен влагой. К сентябрю значения парциального давления в городе и за его пределами практически не отличаются.

В поле относительной влажности зимой в атмосфере Новосибирска отмечена ее положительная аномалия в сравнении с пригородом, чему способствуют более высокая температура воздуха и усиление испарения со снежного покрова. Различия относительной влажности с ноября по февраль составляют 1..3 %. В теплый период года городской воздух характеризуется более высокой температурой и низким влагосодержанием, аномалии относительной влажности в городе отрицательные. С мая по июль отклонения достигают $-4..-6$ %. Среднегодовые величины относительной влажности в городе и пригороде практически не различаются.

Городская аномалия осадков. ГОТ может влиять на устойчивость стратификации и усиление сходимости воздушных потоков, что может привести к увеличению количества выпавших осадков. Также при работе промышленных предприятий в воздух над городом могут попадать аэрозольные частицы (например, сернистые и азотистые соединения), которые могут служить хорошими ядрами конденсации, избыток которых благоприятствует развитию облачности и последующему выпадению осадков. Согласно [Оке, 1982] количество осадков в городе может увеличиваться на подветренной по отношению к мегаполису стороне, на расстоянии вплоть до 20–40 км; в некоторых городах отмечен эффект компенсационной тени (уменьшения количества выпавших осадков за городом) [Рубинштейн, Гинзбург, 2003; Бруслова и др., 2019].

Положительная аномалия сезонных сумм осадков отмечена в Москве [Климат Москвы..., 1969] по данным многолетних наблюдений с плотной сети метеостанций (1950–1960 гг.). По данным климатического моделирования также прослеживается положительная аномалия количества осадков над городом и подветренной (восточной) окраиной Москвы. Зимой значения этой аномалии значительно ниже чем летом [Varentsov et al., 2018a].

По данным численного моделирования с помощью мезомасштабной модели атмосферы для Монреаля в случае хорошо организованных синоптических систем не наблюдалось значительного влияния города на суммарное количество осадков за 24 часа. Однако при высокой неустойчивости атмосферы, как в июле 2019 года, отмечались различия в накопленных осадках между городскими и сельскими районами, которые составили порядка 10 мм, причем максимумы осадков смещались в сторону острова Монреаль. В обоих случаях линия шквала теряла значительную интенсивность с подветренной стороны города, но продолжала распространяться в том же направлении, указывая, что присутствие города влияет на систему только с наветренной

стороны острова [Errebai et al., 2022].

Исследование распределения осадков в Торонто по данным с 1849 по 2010 год [Ye et al., 2017] показало, что ГОТ также влиял на фазовое состояние гидрометеоров в городской черте, особенно во время смешанных осадков. В Новосибирске [Лучицкая и др., 2014] напротив доля твердых, жидких и смешанных осадков в городе и пригороде практически равноценна, но в целом за год осадки чаще выпадают в городе, чем в пригороде. Основной вклад вносят зимние осадки с количеством 0,5 мм и менее, с увеличением их количества указанное различие исчезает. Урбанизация территории может быть возможной причиной таких различий, так как ослабление скорости ветра препятствует переносу снега. Однако, минимальные и максимальные осадки в основном наблюдаются синхронно на всех станциях, что говорит о большем влиянии макромасштабных процессов на режим формирования осадков, нежели местных условий.

За счет большей шероховатости городской поверхности и ее большей неоднородности в сравнении с сельской местностью, в мегаполисе отмечено **уменьшение средних скоростей ветра**. По данным численного моделирования для Московского региона [Varentsov et al., 2018a] влияние городской застройки привело к снижению средней скорости ветра над городом, причем эта аномалия сильнее всего была выражена на высоте 200 м над поверхностью в ночные часы. Днем этот эффект проявлялся слабо. При этом вблизи поверхности вечером и ночью обнаруживалась существенная положительная аномалия скорости ветра, соответствующая положительной аномалии центростремительной компоненты скорости ветра (по данным выборки случаев со слабой скоростью ветра – менее 3 м/с), что согласуется с теоретическим положением о наличии в городе городского бриза, – аномалии ветра, связанной с конвергенцией приповерхностного воздушного потока над городом.

В застроенной части города Новосибирска [Лучицкая и др., 2014] в течение всего года средняя скорость ветра была вдвое меньше, чем на станции расположенной в 20 км от города. Благодаря влиянию застройки на городской станции регистрируются наименьшие максимумы скорости ветра: преобладающую часть года ветры менее 10 м/с, в переходные сезоны порывы лишь немногим более 20 м/с.

Таким образом, анализ метеорологических аномалий, на примере Москвы, Торонто и Новосибирска показал, что урбанизированная среда порождает целый комплекс взаимосвязанных аномалий, проявляющихся в полях всех основных метеорологических характеристик (температура воздуха и почвы, влажность воздуха, скорость ветра, осадки). Тем не менее прямой перенос закономерностей, установленных для выше перечисленных городов, на условия Санкт-Петербурга не возможен. Каждый из рассмотренных городов обладает собственным сочетанием макроклиматических, географических и градостроительных факторов, что определяет необходимость самостоятельного анализа аномалий метеорологических условий Санкт-

Петербурга.

Раздел 1.2. Аномалии метеорологических условий в Санкт-Петербурге: обобщение существующих научных материалов

Метеорологические наблюдения были начаты в Санкт-Петербурге (бывшем Ленинграде) уже в первые годы после его основания (с 1722 г.). В 1724 г. в Петербурге была учреждена Академия наук, а в 1849 г. в Воейково (20 км к северо-востоку от Санкт-Петербурга) основана Главная физическая обсерватория (ГФО). Под руководством ГФО были проведены важные преобразования метеорологической сети страны, что способствовало унификации метеорологических данных и повышению их качества. Благодаря длительной истории метеорологических наблюдений, на сегодняшний день аномалии метеорологических условий Санкт-Петербурга достаточно подробно описаны [Покровская, Бычкова, 1967; Швер, 1976; Климат Ленинграда..., 1982; Климат Санкт-Петербурга..., 2010]. К основным из них относятся:

- городская аномалия температуры (остров тепла и приподнятый слой холода);
- городская аномалия влажности (снижение относительной влажности в городской черте);
- изменение ветрового режима (снижение скорости ветра);
- снижение солнечной радиации (уменьшение продолжительности солнечного сияния и интенсивности прямой солнечной радиации);
- изменение режима осадков (потенциальное увеличение количества осадков к северу и к востоку от центральной части города).

Важно отметить, что количественная оценка интенсивности аномалий метеорологических условий Санкт-Петербурга в разных исследованиях основывалась на данных различного временного и пространственного охвата, включая как городские, так и пригородные и сельские станции наблюдений (*Таблица 1.1*). В работе [Покровская, Бычкова, 1967] рассматривались различия метеорологических характеристик в городе (станция Информационный центр погоды – ИЦП), и сельской местности (Лесотехнический парк и Воейково). В [Климат Ленинграда..., 1982] использованы данные с 5-и станций в городской черте, а также станций Воейково, Рошино, Лисий Нос и Ломоносов в Ленинградской области. После 1980 г. метеорологические наблюдения в черте города, соответствующие наставлениям гидрометеорологическим станциям и постам [Наставление..., 1985] проводятся только на станции ИЦП в центральной части Санкт-Петербурга [Матвеев, Л. Т., Матвеев, Ю. Л., 2013]. В работе [Матвеев, Л. Т., Матвеев, Ю. Л., 2013] данные ИЦП сопоставлялись с данными станций Белогорка (за 1975–1979 гг.) и Сосново (за 1977–1980 гг.). В [Чернавская, 1985] вклад урбанизации в суммарное повышение температуры воздуха в Санкт-Петербурге был рассчитан по данным станций ИЦП и Лисий Нос, а в [Климат Санкт-Петербурга..., 2010] – по данным ИЦП, Воейково, Белогорка, Гогланд, Лисий Нос, Ломоносов,

Николаевское, Петрокрепость, Рощино, Сосново. Различия радиационных характеристик в Санкт-Петербурге и области [Климат Санкт-Петербурга..., 2010] были получены по данным станций ИЦП, Воейково и Белогорка.

Таблица 1.1 – Информация о станциях наблюдения за погодой на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области

Название станции	Координаты	Длина ряда наблюдений, гг.
ИЦП	59.97 с.ш., 30.28 в.д.	1970–н.в.
Парк Лесотехнической Академии	59.99 с.ш., 30.34 в.д.	1883–1964
Морской торговый порт	59.91 с.ш., 30.25 в.д.	1924–1980
Фарфоровский пост	59.88 с.ш., 30.41 в.д.	1941–1980
РГГМУ, II-й корпус	59.96 с.ш., 30.41 в.д.	1975–1980
Аэропорт Пулково	59.80 с.ш., 30.26 в.д.	1934–н.в.
Воейково	59.95 с.ш., 30.71 в.д.	1881–н.в.
Рощино	60.24 с.ш., 29.62 в.д.	1932–н.в.
Ломоносов	59.92 с.ш., 29.78 в.д.	1918–н.в.
Лисий Нос	60.02 с.ш., 29.99 в.д.	1920–н.в.
Гогланд	60.05 с.ш., 26.98 в.д.	1835–2023
Николаевское	58.56 с.ш., 29.79 в.д.	1889–н.в.
Шлиссельбург (Петрокрепость)	59.93 с.ш., 31.00 в.д.	1876–н.в.
Сосново	60.55 с.ш., 30.30 в.д.	1965–н.в.
Белогорка	59.35 с.ш., 30.13 в.д.	1926–н.в.

Проблема ограниченности станционных наблюдений является одним из ключевых вызовов в области городской климатологии. Традиционные метеорологические станции, как правило, расположены за пределами городов или на их окраинах, что не позволяет в полной мере отразить климатические особенности урбанизированных территорий. Это создает существенный пробел в данных, необходимых для понимания и численного моделирования городского климата. Наиболее надежным решением проблемы ограниченности станционных наблюдений для исследования аномалий метеоусловий урбанизированной территории является привлечение альтернативных средств измерений метеорологических величин. Например, микроклиматические съемки – наблюдения в ряде рационально расположенных пунктов по маршрутам при характерных условиях погоды – одни из первых начали применяться для задач городской климатологии. Первая работа с использованием микроклиматических съемок в

городской среде была опубликована в 1917 г. [Schmidt, 1917]. В последующие десятилетие в практику измерений было успешно введено использование автомобилей [Schmidt, 1930]. В проекте METROMEX (1971–1976 гг.) помимо 220 дождевых и градовых площадок, 3 радиолокационных установок, 70 осадкомеров, 14 шарпилотных площадок, было задействовано 4 метеорологических самолета. Измерения проводились в городе Сент-Луис, США, а сам проект был направлен на изучение непреднамеренного изменения погоды ввиду городских и промышленных воздействий и, в частности, изменения количества осадков [Changnon et al., 1971].

Немногим позже для изучения особенностей пространственного распределения метеорологических величин микроклиматические съемки были использованы для исследования городских особенностей климата Санкт-Петербурга. Наблюдения проводились в течение 1975–1976 гг. с 10 эпизодических постов (*Рисунок 1.1*) в различных частях города в утренние, околополуденные и предвечерние часы, что позволило уточнить изменения в полях метеорологических характеристик в зависимости от времени суток. Всего было проведено 34 серии (дня) микросъемок в разные сезоны при различной погоде (ясной, тихой, ветреной или пасмурной).

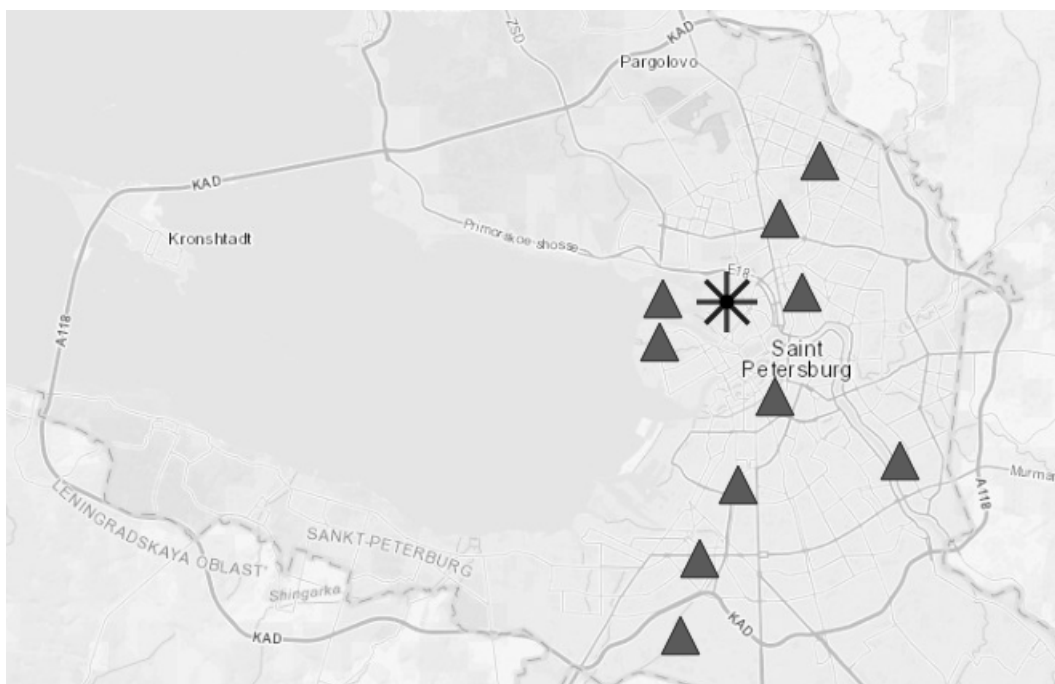


Рисунок 1.1 – Схема расположения эпизодических постов в Санкт-Петербурге (отмечены символом ▲)

В рамках измерительной кампании UHIARC (Urban Heat Island Arctic Research Campaign) был сформирован редкий набор синхронных температурных данных с высоким пространственным разрешением для четырех арктических городов России (Воркута, Салехард, Надым и Новый Уренгой). Сеть наблюдений, проведенных зимой 2016–2017 гг. с частотой от 1 минуты до 1 часа, состояла из установленных в каждом городе (за исключением Нового Уренгоя) автоматической метеостанции и нескольких (от 5 до 15) температурных датчиков. Анализ данных [Konstantinov

et al., 2018] выявил довольно сильные и устойчивые городские острова тепла в арктических городах. Зимой средняя интенсивность острова тепла составила $0,8..1,4^{\circ}\text{C}$. Экстремальные значения интенсивности ГОТ достигали $4..5^{\circ}$ (95-й перцентиль); 99-й перцентиль превышал 7° . Наиболее выраженные острова тепла наблюдались во время спокойной и ясной антициклонической погоды, которая обычно соответствует низким наблюдаемым температурам. Результаты UHIARC могут быть использованы для задач городского планирования и управления, для валидации дистанционных измерений и численных моделей высокого пространственного разрешения.

Влияние городской застройки Санкт-Петербурга на солнечную радиацию. Согласно данным 1894–1952 годов со станций ИЦП и Воейково, в среднем за год продолжительность солнечного сияния в городе была на 120–160 часов меньше, чем в пригородах. Потери солнечной радиации особенно высоки зимой, составляя порядка 40 %, в то время как летом они относительно невелики – около 10 % [Покровская, Бычкова, 1967].

Исследования, проведенные в более поздние периоды, подтверждают тенденцию к уменьшению солнечного сияния в Санкт-Петербурге. Актинометрические съемки 1975–1976 годов показывают, что в городе по сравнению с окрестностями имеет место ослабление как прямой, так и суммарной радиации [Климат Ленинграда..., 1982]. Данные 1978–2008 гг. со станций ИЦП, Воейково и Белогорка также свидетельствуют о том, что в Санкт-Петербург в течение всего года поступает меньше прямой солнечной радиации, чем в область, вследствие меньшей прозрачности воздуха и большей облачности в городской черте. При этом в среднем за год поступление рассеянной радиации в городе превышает значения в Ленинградской области на 2..3 % из-за большей мутности атмосферы [Климат Санкт-Петербурга..., 2010]. При использовании этих оценок важно учитывать, что на них влияет направление ветра: в Воейково отмечается уменьшение солнечного сияния, если ветер дует со стороны города [Покровская, Бычкова, 1967].

Городской остров тепла Санкт-Петербурга, согласно осредненным данным со станций ИЦП и Лесной за период 1881–1960 гг. [Покровская, Бычкова, 1967], характеризовался интенсивностью $0,6^{\circ}\text{C}$, а при сопоставлении разницы среднемесячных температур в ночные часы: $2,0^{\circ}\text{C}$. В центре города безморозный период в среднем длился на 5 дней дольше, чем на метеостанции в парке Лесотехнической академии, окруженной лесом. Минимальные температуры в городе (-36°C) были выше, чем в парковой зоне (-41°C). Влияние Финского залива частично сказывалось на температурном поле, оно было более ощутимо на станции ИЦП. Анализ данных с городской станции (ИЦП) и четырех пригородных (Воейково, Рошино, Лисий Нос, Ломоносов) за тот же период [Климат Ленинграда..., 1982] показал, что средняя годовая температура в Ленинграде была примерно на 1°C выше, чем в восточных и северных пригородах,

и на 0,2..0,5 °С выше, чем в районах вблизи Финского залива. Разница между средними минимальными (ночными) температурами ИЦП и Воейково составляла 1,1 °С, а между средними максимальными (дневными): 0,5 °С.

Исследования вертикальной структуры городского острова тепла [Климат Ленинграда..., 1982] проводились путем сравнения данных башни Ленинградского телецентра и данными стандартного радиозондирования на аэрологической станции Воейково. Было проанализировано 72 вертикальных профиля температуры, полученных в летние ночные строки при различной стратификации атмосферы. Проведенное исследование обнаружило уменьшение температурных контрастов между городом и пригородом с высотой, причем на уровне около 200 м эти различия практически исчезали. Также отмечалось более интенсивное охлаждение воздуха в средней части пограничного слоя над городом по сравнению с пригородом, известное как кросс-овер эффект. Оно составило порядка $-1,3..-1,4$ °С на высоте 269 м при любом типе стратификации.

Анализ суточного хода температур для различных сезонов, проведенный в [Матвеев, Л. Т., Матвеев, Ю. Л., 2013] за 1975–1980 гг., выявил устойчивый положительный температурный контраст между ИЦП и окрестностями (Белогорка, Сосново). В зимний период этот контраст характеризовался меньшей суточной изменчивостью: средние дневные значения $\Delta T_{\text{ИЦП-Белогорка}}$ были лишь на 0,5°С меньше средних ночных, что косвенно указывает на большой вклад антропогенных источников тепла в формирование температурной аномалии. Летом наблюдалась более выраженная суточная вариация: средние дневные значения $\Delta T_{\text{ИЦП-Белогорка}}$ были на 1,6 °С, а $\Delta T_{\text{ИЦП-Сосново}}$ – на 1,4 °С меньше средних ночных, причем в отдельные сроки дневные значения ΔT могли быть меньше ночных в 5..25 раз, со снижением $\Delta T_{\text{ИЦП-Белогорка}}$ до 0,0..0,2 °С в период с 12 до 18 часов. Для обоих сезонов любое ночное значение ΔT (в 00, 03, 06 ч) превышало любое дневное (в 12, 15, 18 ч).

Остров сухости Санкт-Петербурга. По данным исследований [Покровская, Бычкова, 1967; Климат Ленинграда..., 1982; Матвеев Л. Т., Матвеев Ю. Л., 2013] значения разности относительной влажности между городом и окрестностями отрицательны в течение суток. В качестве причин указываются повышенная температура воздуха в городе [Покровская, Бычкова, 1967; Матвеев Л. Т., Матвеев Ю. Л., 2013] и меньшее испарение с урбанизированных поверхностей по сравнению с природными [Покровская, Бычкова, 1967].

В [Покровская, Бычкова, 1967] на основе наблюдений 1881–1960 гг. отмечено что величины этих разностей наиболее значительны в вечерние часы и могут достигать $-10..-15$ %, а в отдельные летние вечера – до -20 % и более. По данным микроклиматических съемок 1975–1976 гг., в тихую, безоблачную погоду значения относительной влажности в центре города оставались на 15..20 % ниже, чем в пригородах в течение всего дня. При этом исследования [Матвеев, Л. Т., Матвеев, Ю. Л., 2013] по данным 1975–1980 гг. показали, что содержание водяного пара в Санкт-

Петербурге зимой больше, чем в окрестностях (Сосново и Белогорка) во все сроки. В летние ночи содержание водяного пара в городе может преобладать над окрестностями в условиях инверсионного распределения температуры по высоте, ослабленной скорости ветра и турбулентного обмена, когда роль испарения так же мала, как и зимой.

Аномалия осадков в Санкт-Петербурге. Распределение осадков в Санкт-Петербурге и его окрестностях носит сложный характер, обусловленный как влиянием города, так и особенностями рельефа, и близостью Невы и Финского залива. Крупные водные объекты создают температурный контраст, способствующий образованию местных циркуляций воздуха. Они являются источником влаги, что может привести к формированию облаков и повышению вероятности осадков, а также, благодаря малой шероховатости, способствуют увеличению скорости ветра над своей поверхностью.

По данным за период 1891–1965 гг. [Покровская, Бычкова, 1967], отмечалось, что облачность была больше на подветренной стороне города по сравнению с наветренной, однако влияние города на режим осадков не было обнаружено. В качестве причин более интенсивного развития облачности над городом указываются избыток ядер конденсации от антропогенных источников и вертикальные токи воздуха термического происхождения, возникающие из-за неравномерного прогрева городской поверхности.

В [Швер, 1976] представлено распределение количества осадков в городе по данным 13 станций наблюдения, четыре из которых находятся в городской черте, за период 1891–1969 гг. (*Рисунок 1.2*). Из-за сложности физико-географических условий региона предполагается, что городской фактор сочетается с другими. В северной части города количество осадков больше, чем в центре города (станция ИЦП) на 11 % (а в северных окрестностях более 20 %). Различия между центром и устьем Невы снижаются до 5..7 %. Меньше чем на ИЦП осадков выпадает на южном побережье Финского залива, на самом заливе (Кронштадт) и внутри города, к югу от центра. В южном пригороде (Пулково) количество осадков выравнивается, а еще южнее на границе с Ордовикским плато оно превышает сумму осадков, выпадающих в центре города, на 7..8 %. К востоку от Ленинграда (Воейково), в холмистой местности, которая является подветренной по отношению к влагонесущему потоку, осадков выпадает больше, чем в центре города на 10 % за год, а в холодный период почти на 20 %. За год различия в осадках между северной и южной частями города составляют 16 %, а с учетом окрестностей 20 %. Различия по сезонам менее существенны.

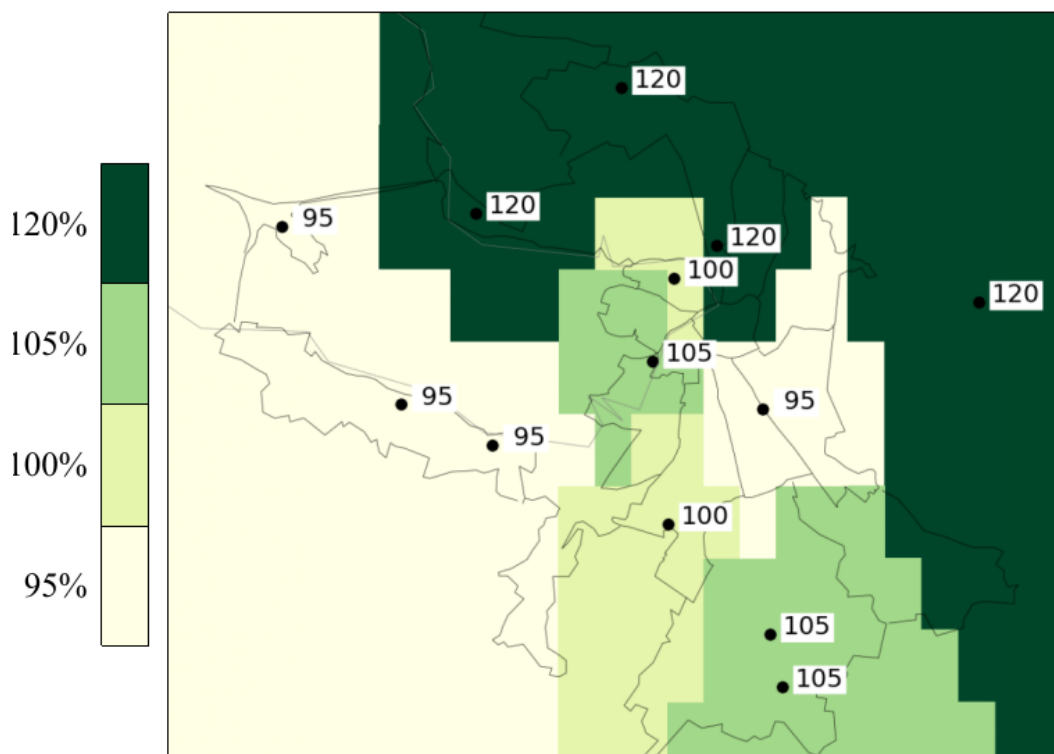


Рисунок 1.2 – Распределение количества осадков (в процентах по отношению к количеству осадков в центре города) в городе по данным 13 станций наблюдения [Швер, 1976].

Аномалия ветра в Санкт-Петербурге. Согласно [Покровская, Бычкова, 1967; Климат Ленинграда..., 1982] особенности ветрового режима в Санкт-Петербурге по сравнению с окружающими территориями обусловлены главным образом аэродинамическим сопротивлением городской застройки. Динамический фактор, способствующий ослаблению скорости ветра в городе, преобладает над термическим (ГОТ приводит к более неустойчивой стратификации пограничного слоя атмосферы над городом по сравнению с сельской местностью), способствующим ее усилению. Количественные показатели ослабления скорости ветра в городе существенно зависят от стратификации атмосферы и увеличиваются с ростом устойчивости. По данным 1936–1963 гг. [Покровская, Бычкова, 1967], скорость ветра в городе в среднем на 1..2 м/с меньше, чем в окрестностях. Более детальные исследования [Климат Ленинграда..., 1982] показали, что ветер в городе по сравнению с окраинами и пригородами ослаблен на 40..50 %. В среднем скорость ветра за городом в теплый период на 1,5..2 м/с, а в холодный период на 3 м/с больше, чем в Санкт-Петербурге на тех же высотах. Сильный ветер (15 м/с и более) в центральной застроенной части города наблюдался редко, в среднем около 2 дней в году, а чаще всего на окраинах города с менее плотной застройкой и на станциях вдоль Финского залива. Число дней с сильным ветром на этих станциях достигало 14–22 дней в год.

Раздел 1.3. Исследования о влиянии застройки крупных городов на метеорологические условия с помощью численных прогностических моделей атмосферы

В настоящее время наблюдения остаются незаменимым инструментом для оценки влияния городской среды на атмосферные процессы. Тем не менее всё чаще для этой цели привлекаются численные модели атмосферы со специализированными параметризациями городской среды. Их основная задача заключается в описании физических процессов в городском подслое – нижней части пограничного слоя атмосферы непосредственно над городской застройкой. В этих параметризациях описываются процессы, ведущие к перераспределению потоков тепла, импульса и влаги между поверхностью и атмосферой, например за счёт учёта повышенной шероховатости подстилающей поверхности, обусловленной наличием зданий и сооружений; изменения альбедо вследствие замены естественного покрова искусственными материалами; трансформации радиационного баланса в условиях городского каньона – пространства, образованного стенами расположенных друг напротив друга зданий и поверхностью улицы между ними; антропогенного выделения тепла от транспорта, отопления и промышленности. Комбинация наблюдений и численного моделирования позволяет получить наиболее полную картину пространственной аномалии метеорологических величин в городских районах. Например, такой подход применялся для анализа аномалий осадков в Москве [Varentsov et al., 2018a] и Монреале [Lauer et al., 2023], что дало возможность оценить вклад урбанизации в изменение характера выпадения осадков.

Мезомасштабные численные модели, в частности WRF-ARW (США) или COSMO (Германия) (<https://www.cosmo-model.org/>), используются в наибольшем числе работ по моделированию влияния урбанизации на погодный режим [Kim, Brown, 2021] (второе и третье места занимают моделирование с помощью микромасштабных моделей зданий, например, ENVI-met, и физических макетов).

Модель COSMO использует сферическую систему координат со смещенным северным полюсом для уменьшения искажений и гибридную вертикальную координату для учета рельефа. Она основана на негидростатической системе уравнений для сжимаемого влажного воздуха, решаемых методом расщепления по времени Г.И. Марчука [Марчук, 1967]. Модель включает параметризации почвы, снежного покрова, озер, радиации, осадков, конвекции и турбулентности. Климатическая версия COSMO-CLM адаптирована для длительных расчетов, благодаря учету годового хода распределения растительного покрова и изменений концентраций парниковых газов [Rockel et al., 2008].

Модель WRF-ARW базируется на негидростатических уравнениях для сжимаемой жидкости, записанных в декартовых координатах по горизонтали и с использованием орографической координаты η , которая определяется через гидростатическую составляющую

давления. Система уравнений, записанная для возмущений метеорологических величин, включает эволюционные уравнения для расчета трех компонент вектора ветра, геопотенциала, потенциальной температуры, уравнение баланса массы и ряд дополнительных диагностических соотношений. Уравнения модели рассчитываются численно с использованием модифицированного метода Рунге-Кутты. Для пространственной дискретизации используется сетка C по классификации Аракавы.

Граничные условия на нижней границе атмосферы с подстилающей поверхностью определяются моделью деятельного слоя суши. История развития моделей деятельного слоя суши тесно связана с их применением в сфере климатологии, где описание взаимодействия поверхности с атмосферой особенно важно, поскольку помимо процессов тепло- и влагообмена поверхность отвечает за эмиссию и сток парниковых газов.

В середине 60-х годов Манабе предложил схему, впоследствии отнесённую к первому поколению моделей деятельного слоя суши и названную «моделью ковша Манабе» (Bucket Model) [Manabe, 1969]. В этой схеме использовалось идеализированное разделение поверхности на океаны и континенты, не учитывалось изменение теплопроводности почвы в уравнении теплового баланса, а влагосодержание деятельного слоя оставалось постоянным во времени и пространстве. Испарение в модели ограничивалось пороговым значением содержания влаги в почве, а излишки осадков уходили в сток. К концу 60-х годов влагосодержание стало описываться переменной, меняющейся в пределах от 0 до 1. Несмотря на значительные упрощения, в частности отсутствие учета суточного и сезонного хода температуры, результаты модели Манабе оказались удовлетворительными при сравнении с наблюдениями в средних широтах [Pitman, 2003], а сама схема стала ключевым шагом в представлении процессов на поверхности суши в климатических моделях.

Переход к моделям деятельного слоя второго поколения произошёл с появлением схемы Дирдорфа [Deardorff, 1978] в 1978 г., где помимо процессов тепло- и влагообмена в 2-х слоях почвы параметрически учитывалось влияние растительности как слоя, препятствовавшего поступлению солнечной радиации в почву. В конце 1980-х годов была доказана необходимость явного учета процессов взаимодействия растительного покрова с атмосферой, что позволило улучшить представление влияния эвапотранспирации и решить проблему неадекватного учета поглощения углекислого газа растениями. В моделях деятельного слоя третьего поколения, разработанных в дальнейшем, уже учитывались гидрологические, биологические и другие процессы [Pitman, 2003].

В середине 90-х годов XX-го века началось внедрение современных схем деятельного слоя суши в оперативные модели. При разработке таких схем требовалось обеспечить расчет и передачу 4-х ключевых характеристик в основную модель прогноза погоды: потоков явного и

скрытого тепла с поверхности, восходящего потока длинноволновой радиации, отражённую часть коротковолновой радиации. Ключевыми входными параметрами являлись тип почвы, тип растительности и уклон поверхности, остальные параметры, могли быть представлены как функции трёх вышеуказанных параметров [Chen et al., 2001].

Развитие моделей деятельного слоя суши стало фундаментом для исследования процессов в городском подслое. На ранних этапах [например, Kusaka et al., 2012; Giannaros et al., 2013] поверхность города в моделях деятельного слоя представлялась как голая почва или плоская плита, а механизмы взаимодействия городской поверхности с атмосферой ничем не отличались от механизмов взаимодействия природных поверхностей с пограничным слоем атмосферы.

В исследовании [Kusaka et al., 2012] моделирование городской поверхности осуществлялось путем модификации специальных параметров в 5-слойной модели термической диффузии (SLAB). В модели WRF-ARW эта схема [Dudhia, 1996] является наиболее простой и вычислительно эффективной моделью деятельного слоя суши. В ней профиль температуры 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. Как и в моделях деятельного слоя первого поколения, влагосодержание почвы в SLAB определено набором констант, для разных типов почв и сезонов года.

Для описания взаимодействия урбанизированной поверхности с пограничным слоем атмосферы в [Kusaka et al., 2012] использовалась теория подобия Мони́на-Обухова. Предполагалось, что здания и дороги имеют одинаковую температуру, а изменённые значения параметров поверхности для области города косвенно отражают такие характеристики урбанизированной поверхности, как, например, высота зданий [Kusaka et al., 2001]. В модели SLAB область города отличалась от природных поверхностей большим значением шероховатости, меньшими значениями альбедо и излучательной способности, меньшим влагосодержанием почвы с меньшей теплоёмкостью. Не учитывался вклад антропогенного потока тепла [Kusaka et al., 2012], хотя этот параметр введён в некоторые простые модели города, например, [Taha, 1999; Гинзбург и др., 2021]. Предложенная в [Гинзбург и др., 2021] простая энергобалансовая модель городского подслоя может быть использована в мезомасштабных климатических и прогностических моделях для параметризации потоков энергии с урбанизированной подстилающей поверхностью в пограничный слой атмосферы.

Альтернативным подходом к моделированию метеорологических условий в городской среде является вихререзающее моделирование (Large Eddy Simulation, LES). В отличие от мезомасштабных моделей, в которых влияние застройки описывается параметрически, LES-модели явным образом представляют здания на расчётной сетке, что позволяет воспроизводить нестационарную турбулентную динамику в основном энергонесущем интервале спектра, тогда

как влияние мелкомасштабной турбулентности учитывается при помощи подсеточных замыканий [Глазунов и др., 2025; Глазунов и др., 2024]. Турбулентное обтекание объектов простых форм, характерных для городской застройки, воспроизводится LES-моделями с хорошей точностью при условии, что на характерный размер объекта составляет порядка нескольких десятков узлов расчётной сетки. В случаях упрощённой геометрии урбанизированных поверхностей численное моделирование позволяет получить данные, не уступающие данным лабораторных измерений [Глазунов и др., 2024]. Можно выделить два основных направления использования LES-моделей в задачах городской метеорологии. Первое подразумевает как можно более реалистичное представление городской среды: задаётся геометрия зданий, специфичная для конкретного города или района. Примером такого подхода служит работа [Варенцов и др., 2022], в которой LES-модель ИВМ РАН [Глазунов, 2014а, 2014б; Glazunov et al., 2016] была адаптирована для расчёта стратифицированной турбулентности над фрагментом реальной застройки г. Надыма с использованием трёхмерной схемы зданий на основе данных OpenStreetMap и цифровой модели рельефа ArcticDEM. Результаты моделирования подтвердили, что одним из важных механизмов формирования городского острова тепла в условиях устойчивой стратификации является механическое перемешивание атмосферы при обтекании зданий, сопровождающееся многократным ростом турбулентной кинетической энергии (ТКЭ) внутри города по сравнению с окружающей территорией [Варенцов и др., 2022]. В последнее время появляются амбициозные проекты по включению LES в системы прогнозирования погоды с использованием данных крупномасштабных моделей атмосферы в качестве краевых условий. Однако значительным препятствием для повсеместного применения LES остаётся вычислительная сложность таких моделей: для типичной многоэтажной застройки требуется шаг сетки порядка одного метра и менее, а размерность расчётной области может достигать 10^8 – 10^9 узлов, поэтому в ближайшей перспективе широкое оперативное использование LES в системах прогноза погоды маловероятно [Глазунов и др., 2025].

Вторым важным направлением является использование данных LES для разработки и уточнения упрощённых моделей турбулентности в городской среде. Для построения замкнутых моделей турбулентности в городском подслое необходимы параметризации турбулентных масштабов длины, связывающих между собой такие характеристики, как потоки импульса, градиенты средней скорости, ТКЭ и скорость её диссипации. В отличие от приземного слоя над однородной поверхностью, в городском подслое различные турбулентные масштабы не совпадают между собой, поскольку отражают процессы в разных участках спектра флуктуаций и по-разному зависят от геометрических параметров застройки. Общепринятым методом вычисления турбулентных масштабов длины является проведение больших серий LES-расчётов турбулентных течений в состоянии статистического равновесия при вариации морфологических

параметров урбанизированной поверхности с последующим построением эмпирических аппроксимаций по осреднённым данным [Глазунов и др., 2024]. Современные суперкомпьютерные мощности позволяют рассматривать широкий диапазон форм поверхности и подробно изучать характеристики турбулентного потока в городском подслое, что даёт возможность использовать данные LES для разработки и уточнения многослойных RANS-моделей городского пограничного слоя. Актуальной задачей остаётся создание на базе LES-моделей вычислительных технологий последовательной регионализации – от мезомасштаба до масштабов отдельных зданий и улиц конкретного города, что предоставит возможность прямого использования данных региональных и глобальных прогностических моделей атмосферы в LES-расчётах [Глазунов и др., 2025].

Поскольку прямое применение LES-моделей в оперативных системах прогноза погоды в ближайшей перспективе остаётся затруднительным, на практике используется подход, основанный на интеграции модели городского подслоя в мезомасштабную модель атмосферы. Первой моделью такого типа была параметризация энергетического баланса города ТЕВ [Masson, 2000], разработанная с целью восполнить разрыв между мезомасштабными моделями атмосферы и микромасштабными (в масштабах зданий, кварталов) моделями деятельного слоя суши. В параметризации ТЕВ для мезомасштабных моделей атмосферы город был впервые представлен с помощью концепции осредненного уличного каньона [Nunez, Oke, 1977]; значения теплового баланса для трех его составляющих (стен, крыш и дорог) рассчитывались по отдельности. В отличие от более ранних параметризаций того же назначения, физические процессы в слое подслоя в ТЕВ (коротковолновая радиация, термодинамические и антропогенные взаимодействия, влияние дождя и снега) описаны достаточно полно.

Для совместной работы с WRF-ARW созданы одноуровневая (SLUCM [Kusaka et al., 2001]), а позднее и многоуровневая (BER [Salamanca, Martilli, 2010]) модели городского подслоя. SLUCM во многом схожа с моделью ТЕВ. Среди отличий двух параметризаций стоит отметить, что поверхность города в SLUCM может состоять из нескольких различно ориентированных в пространстве уличных каньонов, на тепловой баланс которых влияют суточные изменения азимутального угла солнца. По степени урбанизации местности выделено 3 типа городского землепользования. Для каждого типа выделено порядка 20-ти параметров, вариация которых определяет взаимодействие городской застройки конкретного города с атмосферой. Параметризация вихревых потоков внутри и над слоем городского подслоя выполнена с использованием модели Иноуэ [Inoue, 1963], оригинальная версия которой была разработана для растительного покрова.

Для городов в зоне умеренно-континентального климата (с высоким энергопотреблением и низким радиационным балансом) выбросы тепла антропогенного происхождения могут

оказывать доминирующее влияние на городскую атмосферу. Из-за влияния температуры атмосферного воздуха на энергопотребление и обратного влияния антропогенного потока тепла (АПТ) на температуру приземного воздуха в режиме отопления возникает отрицательная обратная связь между температурой воздуха и антропогенным потоком тепла [Гинзбург и др., 2021]. В SLUCM вклад АПТ и его суточные вариации учитываются как добавок к явному потоку тепла, рассчитанному в модели городского подслоя. При этом для определения величины АПТ конкретного города и его суточных вариаций требуется привлекать дополнительные методы.

Оценка антропогенного потока тепла обычно проводится тремя основными методами:

- прямые измерения тепловых потоков
- инвентаризация потребленной регионом энергии
- дистанционные спутниковые измерения потоков теплового излучения с выделением антропогенных потоков по локальным метеорологическим данным

В работе [Фролькис, Евсиков, 2022] используется подход, основанный на инвентаризации потребленной энергии. Особенность подхода заключается в суммировании энергопотребления зданиями, которое оценивается по разности внутренней и внешней температур воздуха на основе строительных правил и теплофизических свойств ограждающих конструкций. Для работы предложенного в [Фролькис, Евсиков, 2022] метода также требуется создать трехмерную модель городской застройки Санкт-Петербурга, на базе которой производится расчет АПТ с учетом наружной температуры воздуха на основе строительных правил и ГОСТов. В результате инвентаризации, расчетная плотность АПТ Санкт-Петербурга получилась равной 0.922 Вт/м² при разности между температурой внутреннего и наружного воздуха в 1°C; Наибольшие показатели АПТ были зафиксированы для Петроградского, Центрального и Адмиралтейского районов (1.432 1.362 1.224 Вт/м² соответственно), наименьшие – для Фрунзенского, Кировского и Калининского (0.659, 0.688, 0.714 Вт/м² соответственно). В работе [Александров, Гинзбург, 2014] отмечается, что этот подход демонстрирует чувствительность к изменениям административных границ города, что наглядно проиллюстрировано на примере Москвы. После расширения границ города в 2012 году наблюдалось значительное изменение оценки АПТ: от 67.5 Вт/м² при площади 1081 км² до 29.8 Вт/м² при увеличении площади до 2510 км².

Дополнительные оценки АПТ, полученные с использованием модели COSMO-CLM, предоставляют более детальную картину распределения тепловых потоков в городской среде [Dokukin, Ginzburg, 2020]. Для Москвы значения АПТ варьируются от 27 Вт/м² в окрестностях МКАД до 70–75 Вт/м² вблизи Садового кольца. Аналогичные исследования для Санкт-Петербурга показывают значения от 27–30 Вт/м² на побережье Финского залива до 45–55 Вт/м² в центральных районах.

В исследованиях [Гинзбург и др., 2021; Оке и др., 2017] установлено, что основной вклад в

величину АПТ вносит энергопотребление зданий. Однако для оценки АПТ города необходимо учитывать и другие источники, такие как трубопроводы горячего водоснабжения и транспорт. Согласно исследованию [Alexandrov, Ginzburg, 2018], в Москве антропогенные потоки тепла от систем центрального отопления составляют около половины общей величины АПТ. В жилых районах Санкт-Петербурга этот показатель не превышает 15 Вт/м^2 , что указывает на значительные различия в характере энергопотребления между городами.

Модель крупномасштабного городского потребления энергии LUCY (Large-scale Urban Consumption of Energy) учитывает все компоненты антропогенного потока тепла от глобального до районного масштаба с пространственным разрешением от 30×30 угловых секунд до $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. Теоретически можно рассматривать любой день между 1900 и 2099 годами. Эффективность и точность результатов моделирования в значительной степени определяются полнотой и качеством доступных исходных данных. Модель включает редактируемую базу данных различных режимов рабочего времени и государственных праздников, использования транспортных средств и потребления энергии в каждой стране.

Согласно результатам [Allen et al., 2011], АПТ широко варьировался в течение года, в течение дня, между странами и городскими районами. Оценка расчетных тепловых выбросов показала, что они достаточно близки к тем, которые производятся глобальной моделью и рядом городских моделей АПТ, поэтому результаты LUCY можно использовать с определенной степенью уверенности. По данным LUCY, глобальный средний городской АПТ имеет суточный диапазон от $0,7$ до $3,6 \text{ Вт/м}^2$, и он больше в будние дни, чем в выходные. Выделение тепла от зданий вносит наибольший вклад ($89..96 \%$) в тепловые выбросы в глобальном масштабе. Различия между месяцами наибольшие в середине дня (до 1 Вт/м^2 в $13:00$ местного времени). Самым холодным месяцам в Северном полушарии (с декабря по февраль), соответствуют самые высокие тепловые выбросы, на противоположном конце шкалы находятся июль и август. Наименьший АПТ отмечается в мае. Самые высокие индивидуальные тепловые потоки в ячейках сетки (Вт/м^2) в городских районах были обнаружены в Нью-Йорке (577), Париже ($261,5$), Токио (178), Сан-Франциско ($173,6$), Ванкувере (119) и Лондоне ($106,7$).

Для более полного описания динамического и термического взаимодействия застройки с атмосферой WRF-ARW может быть объединена с параметризацией эффектов зданий **BER** (Building Effect Parameterization). В отличие от SLUCM, в BER учитывается трёхмерная природа зданий: высоты зданий, образующих левую и правую стороны уличного каньона, могут различаться. BER является многоуровневой параметризацией и напрямую взаимодействует с несколькими вертикальными уровнями схемы планетарного пограничного слоя в мезомасштабной модели, тогда как SLUCM встроена в первый модельный уровень. За счёт многоуровневой структуры в BER явно учитывается вертикальное распределение источников и

стоков импульса, тепла и влаги через весь городской подслоя, что существенно влияет на воспроизведение термодинамической структуры подслоя шероховатости и нижней части городского пограничного слоя. Дополнительным компонентом, расширяющим возможности ВЕР, является модель энергопотребления зданий ВЕМ (Building Energy Model), которая учитывает энергообмен между внутренними помещениями зданий и внешней средой, включая процессы отопления, кондиционирования и теплопередачи через ограждающие конструкции. Совместное использование ВЕР_ВЕМ позволяет более реалистично воспроизводить влияние антропогенных потоков тепла на метеорологические величины в городской среде.

В ранних версиях использование ВЕР требовало не только высокого вертикального разрешения вблизи поверхности, но и намного больше (по сравнению с SLUCM) вычислительных ресурсов, что сделало применение многослойной модели более подходящим для исследовательских целей. В связи с этим, внедряемые в ВЕР улучшения были направлены как на повышение качества моделирования, так и на оптимизацию вычислительных ресурсов. В версии WRF-ARW 4.1 ключевым нововведением в ВЕР стало внедрение параметров, позволяющих более точно учитывать распределение систем кондиционирования в городской застройке. Кроме того, была проведена оптимизация работы с многомерными массивами данных, что привело к значительному снижению требований к оперативной памяти. В версии WRF-ARW 4.3 произошла интеграция многослойных моделей ВЕР и ВЕР_ВЕМ с параметризацией пограничного слоя Университета Ёнсе [Hong et al., 2006] (YSU), что расширило возможности моделирования взаимодействия городской среды с атмосферными процессами. Важным дополнением стала реализация концепции **локальных климатических зон** [Stewart, Oke, 2012], что позволило учитывать разнообразие городских ландшафтов в унифицированном виде.

Дальнейшее развитие моделей ВЕР и ВЕМ было направлено на учет современных тенденций в городском планировании и энергоэффективности. В частности, были реализованы обновления для моделирования озеленённых крыш и солнечных панелей, что позволило оценивать влияние этих технологий на метеорологические условия в городе и на энергетический баланс зданий. Кроме того, был введен новый коэффициент сопротивления здания для ВЕР_ВЕМ, основанный на работах [Santiago, Martilli, 2010; Gutierrez et al., 2015], что улучшило точность расчетов взаимодействия ветрового потока с городской застройкой.

В модели COSMO (-CLM) реализовано несколько параметризаций городского подслоя разного уровня сложности. Для описания влияния городской подстилающей поверхности на атмосферу модель COSMO (-CLM) может быть объединена с моделью городского подслоя ТЕВ [Trusilova et al., 2013], в то время как процессы в системе «неурбанизированная поверхность–атмосфера» разрешаются моделью деятельного слоя суши TERRA [Doms, Baldauf, 2011]. Адаптация параметризации TERRA для моделирования процессов в городском подслое получила

название TERRA_URB [Wouters et al., 2016]. Она относится к простым моделям городского подслоя. Характерные процессы городской среды учитываются с использованием полуэмпирического подхода (SURY) [Wouters et al., 2016], суть которого в трансформации трёхмерных параметров модели городского подслоя в параметры, характеризующие подстилающую поверхность в модели деятельного слоя суши. Это позволило добиться значительной [Wouters et al., 2016] вычислительной эффективности без ущерба качеству прогноза [Garbero et al., 2021].

Параметризация TERRA_URB реализована в рамках численного прогноза погоды высокого разрешения моделью COSMO-Ru для Москвы. Для каждой ячейки сетки, соответствующей урбанизированной поверхности, рассчитываются антропогенный поток тепла, параметр шероховатости, корректируются значения отражательной и излучательной способностей [Варенцов и др., 2017]. Свойства урбанизированной поверхности, необходимые для вычисления этих параметров, определялись с помощью оригинального ГИС-ориентированного подхода [Samsonov, Varentsov, 2020].

Определение параметров урбанизированной поверхности является важной задачей городской метеорологии. На основе анализа научной литературы за последние 20 лет были отобраны исследования, предоставляющие конкретные численные значения параметров городской среды для различных городов [Ладохина и др., 2022]. В *Таблице 1.2.* приведены значения для Токио [Kusaka et al., 2012], Афины [Giannaros et al. 2013], Москва [Варенцов и др., 2017], д. Кланг [Morris et al., 2017], Лондон [Loridan et al., 2013], Нанкин [Chen et al., 2016], Нью-Йорк [Holt, Pullen, 2007], Мадрид [Salamanca et al., 2012].

Согласно результатам анализа, в наибольшем числе исследований уменьшают величину альбеда вплоть до 0,05, поскольку отражательная способность городских строительных материалов ниже, чем у природных поверхностей, а значительная часть прямой солнечной радиации, попадающей в городские каньоны, многократно переотразившись, поглощается [Оке, 1982]. Высокую чувствительность полей модели к изменению альбеда подтверждают работы, посвящённые стратегиям уменьшения интенсивности ГОТ. Например, в [Morini et al., 2016; Jandaghian, Akbari, 2018] показано как изменение значений только отражательной способности городских поверхностей, влияет на прогноз интенсивности ГОТ. Увеличение альбеда с 0,2 до 0,8 в [Morini et al., 2016] (с 0,2 до 0,65, 0,60 и 0,45 в [Jandaghian, Akbari, 2018]) для поверхностей крыш, стен и дорог привело к уменьшению интенсивности ГОТ более чем на 2°. При этом прогностические приземные температуры снизились не только для участков города с измененным альбеда, но и на прилегающих к ним городских территориях [Morini et al., 2016]. Излучательная способность поверхности также влияет на приземную температуру воздуха, однако, в гораздо меньшей степени, чем альбеда; типичные значения этого параметра в проанализированных

исследованиях находятся в диапазоне от 0,85 до 0,98.

Таблица 1.2 – Значения параметров урбанизированной поверхности для некоторых городов

Город	Параметры					Модель городского подслоя	Δr
	A	H (Z_0)	k_t (C)	C_p	E		
Токио	0,15	(0,008)	(3–3,52)	-	0,88	SLAB	4
Афины	0,15	(0,008)	(3,24)	3	-	Noah LSM	2
Москва	0,15	0–50	0,8	1,6	0,86	TERRA_URB	1
д. Кланг	0,2	8–14	0,67	1,2	0,9	SLUCM	1
Лондон	0,1–0,15	-	0,4–0,8	1–1,5	0,85–0,95	SLUCM	1
Нанкин	0,05	20	1,5	1,75	0,98	SLUCM	1
Нью-Йорк	0,15	5–10	1,7	2,1	0,97	SLUCM	0,44
Мадрид	<u>0,2</u>	-	0,695	1,32	0,9–0,95	BER	0,33
Значение по умолчанию	0,2	5–10	0,67	1	0,9	SLUCM	-
	(0,15)	(0,005)	(3)	(1,9)	(0,88)	(SLAB)	

Примечания: F – альbedo, H – высота зданий (м), Z_0 – параметр шероховатости (м), k_t – параметр теплопроводности крыши ($Вт м^{-1} K^{-1}$), C – тепловая инерция поверхности ($Дж м^{-2} K^{-1} c^{-1/2}$), C_p – объемная теплоемкость ($МДж м^{-3} K^{-1}$), E – излучательная способность, Δr – горизонтальный шаг сетки для области города в численной модели (км). Для SLUCM, BER и TERRA_URB значения E , C_p , E указаны для крыши; для SLAB и Noah LSM значения A , C_p , E – для урбанизированной поверхности.

Слабый ветер или его отсутствие – основной фактор образования ГОТ. Следовательно, положительные отклонения прогностической скорости ветра могут препятствовать воспроизведению точной величины тепловой аномалии города и привести к появлению отрицательных ошибок прогноза приземной температуры в городе. На величину прогностической скорости ветра в городе воздействуют значения параметров высоты зданий и шероховатости. В большинстве исследований значения Z_0 увеличивают с 0,005 вплоть до 0,01, значения H – до 20 (или определяют на основе анализа геопространственных данных). Увеличение значений этих параметров может снизить величину положительных ошибок прогноза скорости ветра в городе [Jandaghian, Akbari, 2018]. Например, в [Chen et al., 2016], увеличение параметра высоты зданий с 15 до 20 м, позволило уменьшить положительные отклонения прогнозируемой скорости приземного ветра в 1,5 раза (на 0,5 м/с) и уменьшить отрицательные отклонения приземной температуры.

В одноуровневой модели городского подслоя параметр теплопроводности для крыш, стен, дорог рассчитывается как:

$$k_t = C_p * k \text{ [Kusaka et al., 2001].}$$

Здесь и далее k – коэффициент теплопроводности ($\text{м}^2\text{с}^{-1}$), а C_p – объемная теплоемкость ($\text{МДж}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{К}^{-1}$).

В модели SLAB для этих целей введен параметр тепловой инерции

$$C = C_p * \sqrt{k} \text{ [Dudhia, 1996].}$$

Приведенные формулы для k_t и C объясняют различия в величине и размерностях двух параметров, характеризующих способность поверхности проводить тепло. В некоторых работах, например, [Barlage et al., 2016], отмечается, что значение тепловой инерции для строительных материалов ниже, чем для природных поверхностей, однако в большинстве проанализированных исследований величину этого параметра увеличивают: с 3 вплоть до 3,52 (с 0,67 до 1,5 в более сложных моделях городского подслоя). В [Lam et al., 2006] некоторые участки городской поверхности имеют значение $C=2$, для этих же участков значения влагосодержания почвы минимальны (0,05). Значение C_p в исследованиях превосходит значение по умолчанию и задается в диапазонах 1..1,75.

Среди работ, посвящённых определению оптимальных параметров урбанизированной поверхности, [например, Nemunaitis-Berry et al., 2017; Varentsov et al. 2020; Wang et al., 2011], важно отметить статью [Wang et al., 2011]. В ней проведён анализ чувствительности прогностических полей атмосферной модели ко всем возможным значениям параметров городской поверхности. Он осуществлялся помощью адаптированного для данной задачи метода Монте-Карло [Au, Beck, 2001]. В результате, среди параметров городского подслоя выделены те, что в большей степени влияют на прогностические поля атмосферной модели. К ним относятся морфологические характеристики каньона: нормализованные (относительно средней ширины каньона) высота зданий (от 0,2 до 3) и ширина крыш (от 0,3 до 0,8); параметр шероховатости крыш (от 0,1 до 5 мм); доля неурбанизированной территории (от 0 до 0,6); термические параметры крыш: альbedo (от 0 до 1), теплопроводность (от 0,2 до 3 $\text{Вт м}^{-1} \text{К}^{-1}$) и теплоёмкость (от 0,1 до 4 $\text{МДж м}^{-3} \text{К}^{-1}$). Излучательная способность крыш варьировалась в пределах от 0,88 до 1. В этом диапазоне отклик прогностических полей был незначительным [Wang et al., 2011].

Выводы к главе 1

Анализ исследований по тематике влияния городской застройки на метеорологические поля, показал, что урбанизированная среда крупных городов порождает комплекс взаимосвязанных метеорологических аномалий, проявляющихся в полях температуры воздуха и почвы, влажности, скорости ветра и осадков. Тем не менее прямой перенос закономерностей, установленных для других городов, на условия Санкт-Петербурга невозможен. Каждый из рассмотренных городов обладает собственным сочетанием макроклиматических, географических и градостроительных

факторов, что определяет необходимость самостоятельного исследования метеорологических аномалий Санкт-Петербурга. По данным исследований, опирающихся на длительную историю метеорологических наблюдений в Санкт-Петербурге (с 1722 г.), обнаружены городской остров тепла, остров сухости, изменения режима ветра и неоднородности в распределении осадков.

В последние годы для изучения влияния городской среды на атмосферные процессы широко применяются численные мезомасштабные модели атмосферы, такие как WRF-ARW и COSMO. Существенный прогресс в этой области связан с развитием параметризаций городского подслоя (TEB, SLUCM, BEP, TERRA_URB), что позволило более полно описывать сложные взаимодействия между городскими структурами и атмосферой.

Глава 2. Определение периодов высокоинтенсивных аномалий метеорологических условий в Санкт-Петербурге по данным наблюдений

Раздел 2.1. Физико-географическая характеристика района и станций наблюдений

Количественные оценки влияния урбанизации на метеорологический режим города существенно зависят от плотности наблюдательной сети и выбора фоновых станций. Так в [Чернавская, 1985] по данным со станции ИЦП за 1922–1980 гг., было установлено, что температура в Санкт-Петербурге росла со скоростью 0,12 °С/10 лет. Вклад урбанизации в рост температуры оценивался путем сопоставления данных со станций ИЦП и Лисий Нос и составил 75 %, (за 59 лет температура в Санкт-Петербурге выросла на 0,94 °С). Позднее в [Климат Санкт-Петербурга..., 2010] вклад урбанизации был уточнен с привлечением данных с 9 станций области за 1945–1990 гг. Установлено что вклад урбанизации в рост температуры в городе составил 36 %.

Мезомасштабные сети наблюдений, изначально разработанные для изучения региональных атмосферных процессов и погодных явлений, охватывают обширные территории от сотен до сотен тысяч квадратных километров, включая урбанизированные, пригородные и сельские районы. Несмотря на то, что данные с таких сетей имеют определенные ограничения для исследований городского климата, они представляют собой ценный ресурс информации, особенно в условиях отсутствия специализированных городских сетей наблюдений. Установка и поддержание высокоплотных сетей городского масштаба требует значительных финансовых и технических ресурсов, что делает их доступными лишь для ограниченного числа городов. В этой связи, для многих урбанизированных территорий мезомасштабные сети остаются единственным надежным источником долгосрочных метеорологических данных.

В контексте данного исследования использованы данные с сети стационарных пунктов наблюдений Ленинградской области, которые могут быть эффективно использованы для анализа некоторых эффектов влияния урбанизации на атмосферу. Эта сеть охватывает площадь около 250 000 км² и включает в себя следующие типы станций:

- метеорологические станции 2-го разряда, расположенные в населенных пунктах: Винницы, Вознесенье, Волосово, Ефимовская, Кириши, Лесогорский, Лодейное Поле, Николаевское, Новая Ладога и Сосново.
- морские гидрометеорологические станции 2-го разряда, функционирующие на островах и прибрежных территориях: Гогланд, Кронштадт, Ломоносов, Лисий Нос и Озерки.
- объединенные гидрометеорологические станции (ОГМС), расположенные в ключевых точках региона: Белогорка, Выборг, Кингисепп, Любань, Санкт-Петербург (ИЦП) и Тихвин.
- специализированные станции: аэрологическая станция в Воейково и озерная станция в

Шлиссельбурге.

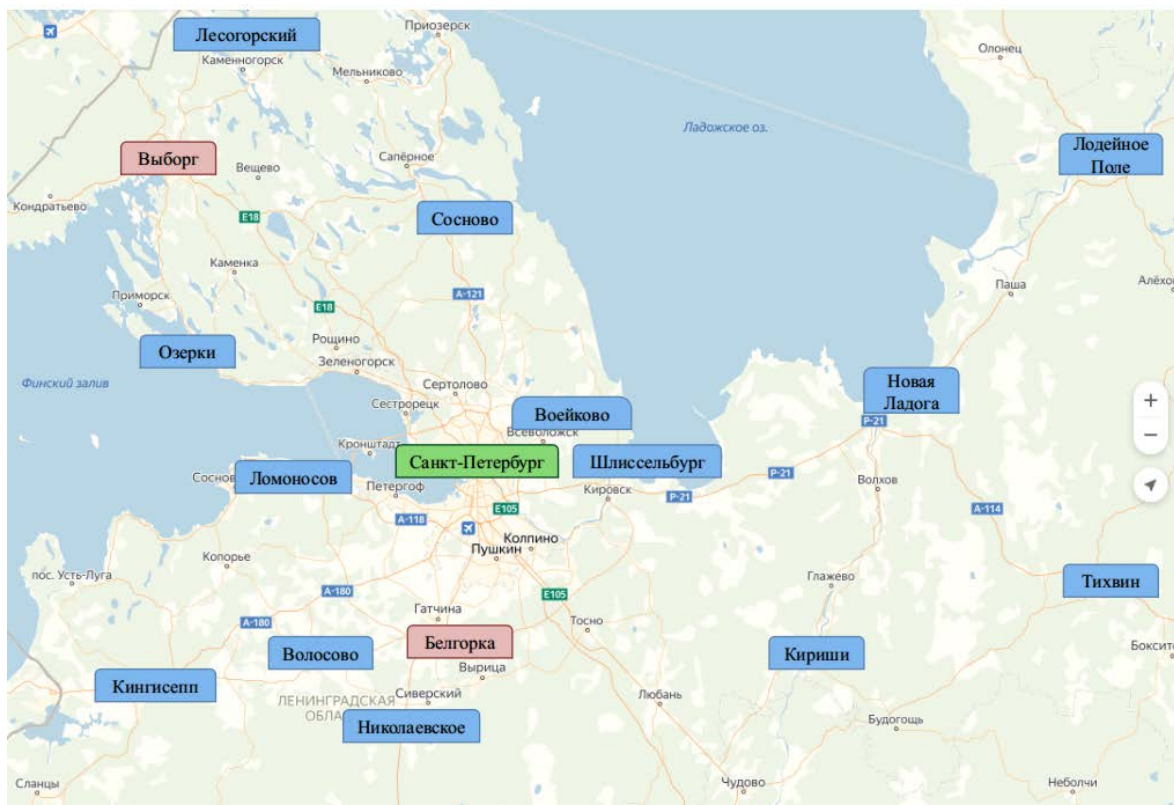


Рисунок 2.1 – Станции Ленинградской области, использованные для исследования периодов проявления эффектов влияния застройки Санкт-Петербурга на метеорологические поля; красные – «сателлитные» станции, зеленая – «виртуальный аналог» ИЦП Санкт-Петербурга

Для определения периодов проявления высокоинтенсивных аномалий метеорологических условий в Санкт-Петербурге были использованы данные с 15 метеорологических станций Ленинградской области в 150 км окрестности от Санкт-Петербурга. Площадь, охватываемая этими пунктами наблюдений, составила порядка 70 км². Выборки данных за современный период 1994–2018 гг., предоставлены ФБГУ «Северо-Западное УГМС». По удаленности от мегаполиса станции были поделены на две группы – в группу ближних вошли пункты наблюдений, удаленные на расстояние не более 50-и км от Санкт-Петербурга, остальные станции были отнесены к группе дальних (**Рисунок 2.1**).

Эффективность мезомасштабной сети наблюдений может быть ограничена локальными особенностями местности, которые оказывают существенное влияние на измеряемые метеорологические параметры. Отсутствие информации о таких особенностях может привести к искаженной интерпретации влияния городской агломерации на климатические характеристики [Stewart, 2011]. В контексте равнинной местности такими ключевыми физико-географическими факторами являются преимущественно крупные и малые водные объекты, находящиеся в

непосредственной близости от точек наблюдения, а также специфические ландшафты населенных пунктов. Для оценки степени этого влияния ниже приводится описание ландшафтного окружения ряда метеорологических станций ближней и дальней групп.

Для анализа метеорологических условий в мегаполисе были использованы данные с ОГМС «Санкт-Петербург» (ИЦП). С 1970 г. станция расположена в одном из центральных районов города на Аптекарском острове, плотно застроенном в начале XX века, в непосредственной близости от открытого моря. К западу от станции расположен один из рукавов дельты Невы – Малая Невка, к югу – река Карповка.

В группе ближних станций, к востоку от мегаполиса расположены метеорологические станции Шлиссельбург и Воейково. Первая из них находится в сельской местности на берегу Невы, вблизи ее истока из Ладожского озера, вторая же расположена в центре поселения Воейково. Ближайший крупный водный объект – Ладожское озеро, находится в 20 км от нее. Согласно данным ФБГУ «Северо-Западное УГМС» в последние годы произошло зарастание окрестностей станции Шлиссельбург молодыми деревьями, что может повлиять на оценки влияния мегаполиса на поля приземного ветра и другие метеозлементы (*Рисунок 2.2*). Более удаленный на восток метеорологический пункт наблюдений Новая Ладога, располагается на южном берегу Ладожского озера, также к востоку от Санкт-Петербурга. Он находится под меньшим влиянием мегаполиса ввиду значительного, более 100 км, удаления от него.

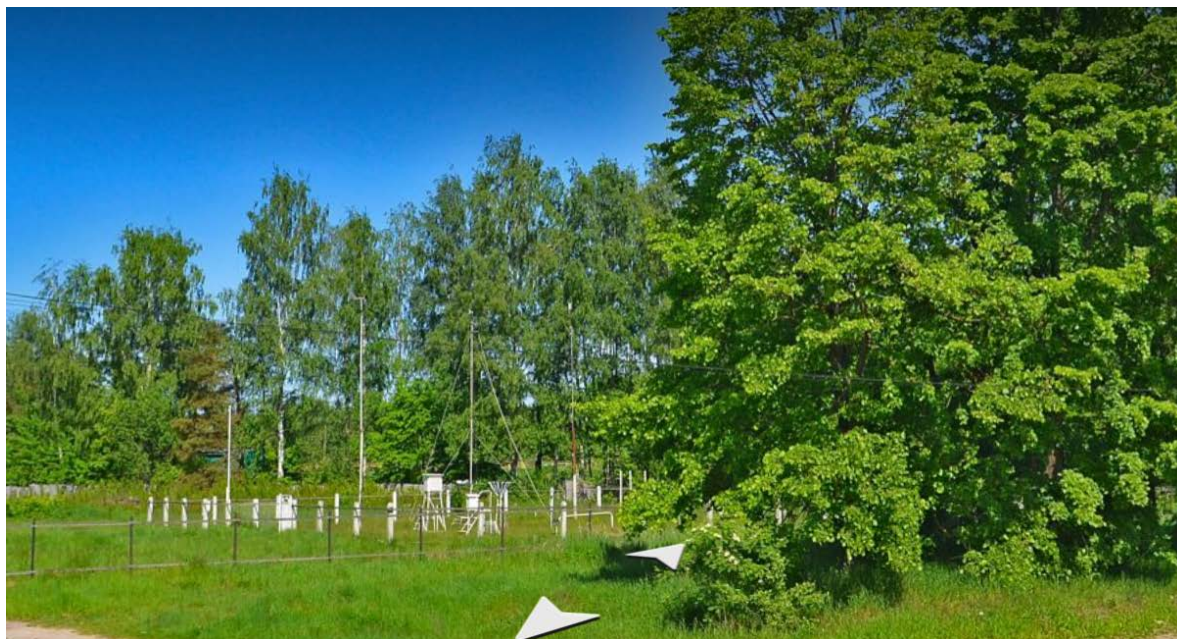


Рисунок 2.2 – Панорама метеорологической площадки на станции Шлиссельбург (вид с юго-запада)

Станции Озерки и Ломоносов расположены к западу от Санкт-Петербурга. Первая из них находится на северном побережье Финского залива, на расстоянии 60 км от центра мегаполиса,

вторая – на южном побережье, на расстоянии 30 км. Станция Озерки находится на границе городской застройки и сельской местности, станция Ломоносов отделена от городского ландшафта с запада морским каналом. Станции Белогорка и Сосново расположены относительно Санкт-Петербурга в противоположных направлениях: Белогорка – к югу, Сосново – к северу. Обе станции континентальные, однако на их показания оказывают влияние близлежащие водные объекты: река Оредеж севернее Белогорки и Суходольское озеро севернее Сосново. Станция Выборг находится на северо-восточной оконечности Финского залива (о. Гвардейский), она расположена на побережье в границах одноименного с островом поселка.

В исследовании влияния городской среды на атмосферу [Матвеев, Л. Т., Матвеев, Ю. Л., 2013] в качестве фоновой была выбрана станция Белогорка. Этот выбор обусловлен тем, что станция находится вне зоны влияния мегаполиса: с подветренной стороны, на оптимальном (в окрестностях 50–150 км) расстоянии от него. Станция Выборг также представляет интерес для подобных исследований, так как находится в схожих с мегаполисом физико-географических условиях (на берегу Финского залива) и на достаточном удалении от Санкт-Петербурга, что позволяет использовать ее данные для сравнительного анализа.

Раздел 2.2. Определение периодов проявления ГОТ высокой интенсивности

Для оценки репрезентативности данных, полученных со станций наблюдений в Ленинградской области за период 1994–2018 гг., был проведен анализ отклонений среднемесячных и среднегодовых температур от климатической нормы. Климатическая норма в данном контексте представляет собой усредненные значения температуры за базовый 30-летний период. В исследовании использовался период осреднения 1981–2010 гг., утвержденный Всемирной метеорологической организацией в качестве стандартного базового периода.

Анализ охватывал длительные временные ряды, содержащие около 73000 значений для каждой станции, что обеспечивает высокую статистическую достоверность результатов. Средняя годовая температура на станции ИЦП за исследуемый период превышает осредненную по всем пригородным станциям среднюю годовую температуру на $1,13^{\circ}$, что согласуется с оценками в исследованиях предыдущих лет и подтверждает наличие теплового возмущения в городе. Согласно расчетам отклонений среднемесячной температуры от климатической нормы (*Таблица 2.1*) на станциях Ленинградской области большую часть года среднемесячные значения температуры соответствуют климатической норме. Однако отклонения более 1°C наблюдаются в осенне-зимний период, с наибольшими превышениями нормы в декабре. Отклонение осредненной по всем пригородным станциям средней годовой температуры от климатической нормы составляет $0,4^{\circ}\text{C}$. Для 8 из исследуемых станций отклонение средней годовой температуры от климатической нормы превышает эту величину на $0,1^{\circ}\text{C}$, в то время как для

остальных станций оно равно осредненной величине.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о достаточной однородности наблюдений за температурой воздуха в сравнении с климатической нормой. Это позволяет сделать вывод о репрезентативности данных и их пригодности для дальнейшего исследования термического режима Ленинградской области.

Таблица 2.1 – Отклонение среднемесячной температуры за 1994–2018 гг. от климатической нормы

Станция	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Лесогор.	0,4	0,4	0,0	0,4	0,3	0,5	0,1	0,6	0,8	0,1	1,0	1,0	0,5
Выборг	0,5	0,4	0,1	0,6	0,6	-0,1	0,2	0,8	0,9	0,0	0,9	1,2	0,5
Л.Поле	0,4	0,3	-0,3	0,7	0,4	-0,2	0,3	0,5	0,7	0,0	1,0	1,0	0,4
Сосново	0,4	0,4	0,0	0,8	0,6	0,1	0,2	0,7	0,9	0,2	1,0	1,0	0,5
Н.Ладога	0,3	0,2	-0,2	0,6	0,5	0,0	0,2	0,6	0,8	0,1	0,8	1,0	0,4
Озерки	1,2	1,3	-0,3	-0,1	-0,3	-0,2	0,2	0,7	0,8	0,1	0,9	1,1	0,5
Воейково	1,5	-0,2	0,1	0,4	0,1	-0,1	-0,3	0,4	1,0	0,4	1,0	1,0	0,5
Шлисс.	0,3	0,3	0,0	0,7	0,5	0,1	0,3	0,6	0,8	0,0	0,9	1,0	0,4
Лом-в	0,4	0,6	0,5	0,8	0,6	0,6	-0,3	-0,1	0,3	-0,6	1,5	1,6	0,5
Тихвин	0,3	0,3	-0,2	0,8	0,4	-0,1	0,3	0,6	0,8	0,1	1,0	1,0	0,5
Кинг.	0,1	0,2	0,0	0,6	0,5	0,4	0,3	0,0	0,4	-0,2	1,2	1,5	0,4
Волосово	0,3	0,4	0,1	0,6	0,4	0,0	0,1	0,6	0,8	-0,4	1,0	1,5	0,4
Белогор.	1,2	1,3	1,2	0,9	-1,1	-0,8	-0,9	0,3	0,8	-0,3	1,0	1,3	0,4
Кириши	0,9	-0,2	0,2	1,1	0,4	0,3	0,2	0,5	0,5	-0,4	1,1	1,2	0,5
Никол-е	0,5	0,8	0,7	-0,3	-0,5	0,0	0,3	0,4	0,7	-0,1	0,9	0,9	0,4
Среднее	0,6	0,4	0,1	0,6	0,2	0,0	0,1	0,5	0,7	-0,1	1,0	1,1	0,4

Чтобы точнее воссоздать температуру невозмущенной мегаполисом местности и исключить влияние локальных особенностей местности на точность оценки интенсивности ГОТ оптимальным решением является выбор нескольких фоновых станций. Согласно [Менжулин, Павловский, 2016], фоновая станция должна располагаться вне зоны влияния мегаполиса, на расстоянии 50–150 км от него, а также не на подветренной по отношению к мегаполису стороне. С помощью алгоритмов пространственной интерполяции можно избежать этого ограничения и использовать данные со всех имеющихся станций наблюдения для определения температуры невозмущенной мегаполисом местности. Такой метод был успешно протестирован в исследовании [Менжулин, Павловский, 2016], где было выбрано несколько станций, окружающих большой город, и «сателлитная» станция, по данным с которой рассчитывались весовые коэффициенты интерполяционных формул и анализировалась точность алгоритма интерполяции. Результатом работы интерполяционного алгоритма являлось восстановленное поле значений «виртуального аналога» станции большого города, интерпретируемое как поле температуры в точке расположения городской станции, если бы мегаполиса не существовало.

Для расчета фоновой приземной температуры в точке станции ИЦП Санкт-Петербурга были использованы данные со всех 15-и окружающих город станций наблюдений. На **первом этапе** для подбора оптимальных весовых коэффициентов результаты работы интерполяционной формулы сравнивались фактическими данными по приземной температуре на станциях Белогорка и Выборг:

$$\left| \frac{\sum_{k=1}^M T_{i,k} (r_{ok}/\rho_i)^2}{(r_{ok}/\rho_i)^2} - T_{i,0} \right| = \min, \quad (2.1)$$

где $T_{i,k}$ – значение температуры на k -й фоновой станции в i -й срок наблюдения; $T_{i,0}$ – значение температуры на «сателлитной» станции; M – количество фоновых станций; ρ_i – искомый весовой коэффициент для i -го срока, r_{ok} – мера расстояния (удаленность k -й фоновой станции от «сателлитной» станции).

В работе использована евклидова мера расстояния:

$$r_{ok} = \sqrt{\sum_{k=1}^M (x_k - y_k)^2} \quad (2.2)$$

За приемлемый минимум невязки принято значение $0,15^\circ$.

На **втором этапе** для определения температуры на виртуальном аналоге станции мегаполиса в качестве r_{ok} были использованы значения удаленности k -й фоновой станции от ИЦП Санкт-Петербурга и коэффициенты ρ , полученные на предыдущем этапе. Таким образом, интенсивность ГОТ определялась как разность температур на станции ИЦП и ее виртуальном аналоге:

$$\Delta T_{i,virt} = T_{i,СПб} - T_{i,virt} \quad (2.3)$$

Во время проведения первого этапа пространственной интерполяции минимум функционала (2.1) был достигнут примерно в 97 % случаев, что является достаточным для наблюдения высокоинтенсивных температурных возмущений антропогенного происхождения и подтверждает высокую однородность срочных данных наблюдений. В небольшом количестве случаев коэффициент ρ , при котором было достигнуто точное решение минимизации функционала (2.1), был подобран так, чтобы подстроить значения температуры на пригородных станциях под аномальное значение на «сателлитной» станции. При использовании такого значения ρ для расчета температуры на «виртуальной» станции получались неправдоподобные значения. Такие выбросы отслеживались и отфильтровывались после ранжирования результатов работы алгоритма.

На **последнем этапе** значения интенсивности ГОТ, полученные с использованием алгоритма пространственной интерполяции, были сопоставлены со значениями температурных возмущений (ΔT_{delta}), рассчитанных по методу оценки разности температур большого города ($T_{i,СПб}$) и «сателлитной» станции.

$$\Delta T_{i,delta} = T_{i,СПб} - T_{i,0}$$

Результаты расчета интенсивности ГОТ методами пространственной интерполяции и

разности температур представлены в виде графиков временного хода (**Рисунок 2.3**). Для определения периодов проявления ГОТ высокой интенсивности были введены два независимых критерия интенсивности тепловой аномалии рассчитанных с использованием данных Белогорка и Выборг в качестве «сателитных» (фоновых в случае применения метода разностей):

- $\Delta T_{\text{delta}}(\text{СПб-Бел}) > 2^\circ$ и $\Delta T_{\text{virt}}(\text{СПб-Бел}) > 2^\circ$;
- $\Delta T_{\text{delta}}(\text{СПб-Выб}) > 2^\circ$ и $\Delta T_{\text{virt}}(\text{СПб-Выб}) > 2^\circ$.

В качестве нижнего предела использовано значение интенсивности ГОТ, равное 2° , для исключения из анализа случаев проявления ГОТ слабой интенсивности, что позволило ускорить поиск периодов с максимальными величинами интенсивности ГОТ.

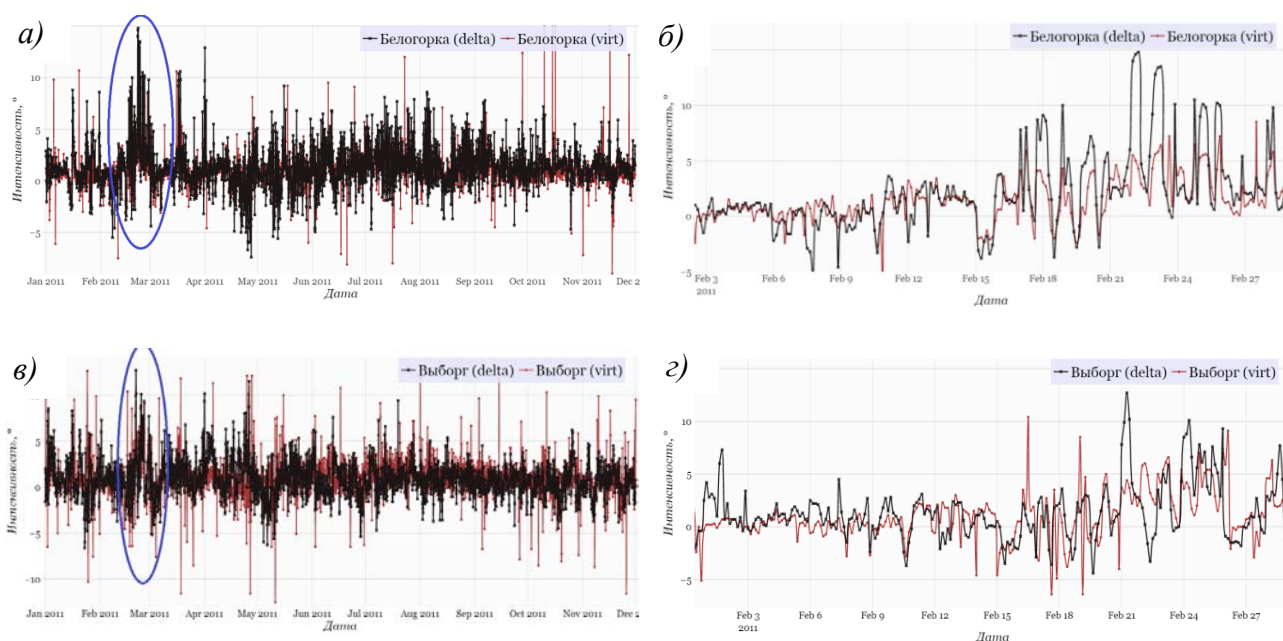


Рисунок 2.3 – Графики временного хода значений интенсивности ГОТ, рассчитанных по методу разностей (*delta*) и с использованием алгоритма пространственной интерполяции (*virt*), для ст. Белогорка (а – 2011 г, б – 02.2011) и ст. Выборг (в – 2011 г, г – 02.2011); тепловое возмущение обозначено синим цветом.

Анализ графиков демонстрирует схожесть распределения интенсивности ГОТ двумя методами, при этом, в большинстве случаев интенсивность острова тепла, рассчитанная по методу разностей выше, чем с помощью пространственной интерполяции. Это позволяет предположить, что влияние локальных особенностей местности на измерения фоновой станции исключено из результатов расчетов интенсивности ГОТ с использованием пространственной интерполяции. Однако в некоторых случаях интенсивность ГОТ, рассчитанная по методу разностей ниже, чем с использованием пространственной интерполяции, в связи с чем, возникает потребность в создании комбинированного критерия поиска случаев ГОТ высокой интенсивности: $\Delta T_{\text{delta}} > (\Delta T_{\text{virt}} > 2^\circ)$.

Таким образом, поиск был осуществлен по трём критериям:

- I. $\Delta T_{\text{delta}} > 2^\circ$;
- II. $\Delta T_{\text{virt}} > 2^\circ$;
- III. $\Delta T_{\text{delta}} > (\Delta T_{\text{virt}} > 2^\circ)$.

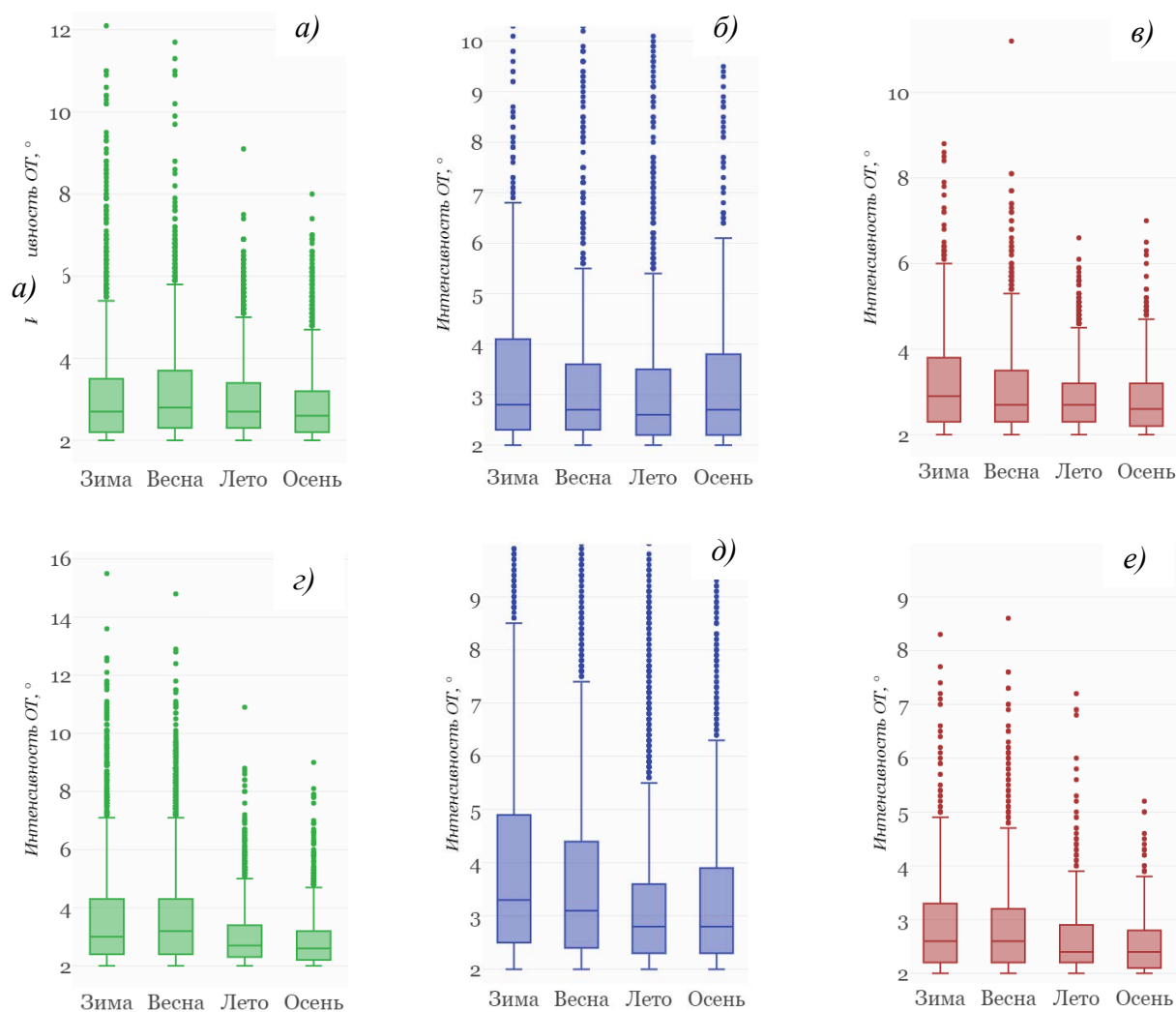


Рисунок 2.4 – Диаграммы размаха сезонного хода значений $\Delta T_{\text{СПб-Бел}}$ (а, б, в) и $\Delta T_{\text{СПб-Выб}}$ (г, д, е) по критериям $\Delta T_{\text{delta}} > 2^\circ$; $\Delta T_{\text{virt}} > 2^\circ$; $\Delta T_{\text{delta}} > (\Delta T_{\text{virt}} > 2^\circ)$, соответственно.

Чтобы определить периоды максимальной интенсивности теплового возмущения мегаполиса, был проанализирован сезонный ход значений интенсивности ГОТ по трём критериям с помощью диаграмм размаха или «ящичков с усами» (**Рисунок 2.4**). Нижней границей «усов» служит разность первого квартиля и полутора межквартильных расстояний, верхней – сумма третьего квартиля и полутора межквартильных расстояний. Хорошо видно, что как средние, так и максимальные значения интенсивности ГОТ, отобранные по второму и третьему критерию, наблюдаются зимой, а минимальные – летом. Зимой среднее значение $\Delta T_{\text{virt(СПб-Выб)}}$ составляет

3,3 °С, максимальные достигают 8,5°; среднее значение $\Delta T_{\text{virt(СПб-Бел)}} - 2,8$ °С, максимальные достигают 6,8 °С. По комбинированному критерию зимой средние и максимальные значения $\Delta T_{\text{virt(СПб-Выб)}}$ ниже, чем по второму и составляют 2,6°С, 4,9°С, соответственно; максимальное значение $\Delta T_{\text{virt(СПб-Бел)}}$ по комбинированному критерию также ниже, чем по второму и составляет 6,0 °С, а среднее – выше на 0,1°С. Летом по второму критерию средние и максимальные значения $\Delta T_{\text{virt(СПб-Бел)}}$ составляют 2,6 °С и 5,4 °С, соответственно, по комбинированному – 2,7 °С и 4,5 °С, соответственно.

При более детальном рассмотрении каждого зимнего месяца с помощью построения диаграмм размаха, обнаружено, что по комбинированному критерию наибольшие средние и максимальные значения $\Delta T_{\text{(СПб-Бел)}}$ и $\Delta T_{\text{(СПб-Выб)}}$ достигаются в **феврале**. Максимальные значения достигают 6,4 °С и 4,9 °С, соответственно; средние – 3,0 °С и 2,6 °С, соответственно [Ладохина и др., 2020].

Пример проявления ГОТ значительной интенсивности в феврале приведен на **Рисунке 2.3** (2б, 2г). В феврале 2011 г. максимальные $\Delta T_{\text{delta(СПб-Бел)}}$ и $\Delta T_{\text{delta(СПб-Выб)}}$ приходятся на 21 и 22 число соответственно и составляют 13 °С и 14 °С. Эти значения характеризуют интенсивность теплового возмущения, возникшего в результате совместного влияния микроклиматических особенностей на фоновых станциях и антропогенных факторов. Наложение результатов расчета интенсивности ГОТ с использованием пространственной интерполяции, позволяет выявить, что интенсивность антропогенного теплового возмущения 21–22 февраля составляет порядка 5 °, а максимум интенсивности антропогенного теплового возмущения как по данным $\Delta T_{\text{virt(СПб-Бел)}}$, так и по данным $\Delta T_{\text{virt(СПб-Выб)}}$ приходится на 25 февраля (18 ВСВ) и равен 7,5 °С. В Санкт-Петербурге по данным со станции ИЦП в ночь с 21 на 22 февраля наблюдалась безветренная погода, более 90 % неба было закрыто слоисто-кучевыми облаками, город находился в области высокого давления, равного 1035 гПа на станции. Вечером 25 февраля на станции наблюдался легкий ветер (2 м/с), высокое атмосферное давление (1038 гПа) и отсутствие облаков. Для валидации краткосрочного численного прогноза погоды важно установить точную дату максимума антропогенного возмущения поля температуры и наблюдавшиеся при этом метеорологические условия. В данном примере, метеорологические условия в день наблюдения максимума интенсивности ГОТ, рассчитанного с помощью пространственной интерполяции, отличаются от метеорологических условий в день наблюдения максимума интенсивности острова тепла, рассчитанного по методу разностей.

По трём критериям обнаружения ГОТ высокой интенсивности получено разное количество случаев его проявления за весь исследуемый период. Количество случаев температурного возмущения, полученное по второму критерию одинаково для обеих систем (разница составляет менее 1 тыс. случаев) и равно 11,5 тыс. Наибольшее количество случаев ($\Delta T_{\text{delta(СПб-Бел)}}$) порядка

17,5 тыс. и $\Delta T_{\text{delta(СПб-Выб)}}$ порядка 15 тыс.) получено по первому критерию, наименьшее – по комбинированному критерию ($\Delta T_{\text{virt(СПб-Бел)}}$ 7 тыс. и $\Delta T_{\text{virt(СПб-Выб)}}$ 3 тыс.). Таким образом, по комбинированному критерию с использованием данных с «спутниковой» станции Выборг было обнаружено практически в два раза меньше случаев ГОТ высокой интенсивности, чем с использованием данных с Белогорки. Чтобы установить по данным какой именно «спутниковой» станции удалось более точно воссоздать температуру невозмущенной мегаполисом местности проведено исследование связанности рядов $\Delta T_{\text{delta(СПб-Бел)}}$ с $\Delta T_{\text{virt(СПб-Бел)}}$ и $\Delta T_{\text{delta(СПб-Выб)}}$ с $\Delta T_{\text{virt(СПб-Выб)}}$.

Применение линейных методов статистического анализа возможно только для непрерывных рядов данных, подчиняющихся закону нормального распределения. Ввиду фильтрации выбросов, а также из-за пропусков в данных наблюдений, ряды результирующих характеристик (расчетов интенсивности ГОТ методом разностей и с помощью пространственной интерполяции) стали неполными, поэтому были произведены предварительные действия для их подготовки к статистическому анализу.

Чтобы сохранить зависимость интенсивности ГОТ от суточного хода и не исключать большого количества дней из-за пропусков одного из 8-и сроков наблюдений, были построены диаграммы размаха ΔT_{delta} и ΔT_{virt} для восьми сроков наблюдения (*Рисунок 2.5*). Анализ диаграмм позволил выбрать два срока, для которых наблюдается наибольшая и наименьшая интенсивность ГОТ. В полдень (12 ВСВ) по обоим критериям наблюдаются наименьшие средние и максимальные значения $\Delta T_{\text{(СПб-Бел)}}$ и наибольшие $\Delta T_{\text{(СПб-Выб)}}$. В ночные часы в интервале с 21 до 03 ВСВ наблюдаются наибольшие средние и максимальные значения $\Delta T_{\text{(СПб-Бел)}}$ и наименьшие $\Delta T_{\text{(СПб-Выб)}}$.

Согласно большинству исследований, для городов в зоне умеренно-континентального климата интенсивность ГОТ имеет суточный ход: днем наблюдается минимум интенсивности ГОТ, а вечером или ночью – максимум. Это позволяет уже на предварительном этапе выдвинуть предположение о том, что по данным с «спутниковой» станции Белогорка удалось более точно воссоздать температуру невозмущенной мегаполисом местности. Для подтверждения этого вывода был проведен корреляционный анализ с предварительной проверкой на нормальность рядов $\Delta T_{\text{delta(СПб-Бел)}}$ и $\Delta T_{\text{virt(СПб-Бел)}}$, а также $\Delta T_{\text{delta(СПб-Выб)}}$ и $\Delta T_{\text{virt(СПб-Выб)}}$ за сроки 00 и 12 ВСВ. При наличии пропуска за какой-либо срок, весь день полностью исключался из анализа. Проверка показала, что, несмотря на большую длину выборок, распределение результатов расчетов интенсивности ГОТ по обоим методам не подчинено нормальному закону. Корреляционный анализ был проведен путем расчета коэффициента ранговой корреляции Спирмена (r_s). Выявлена сильная корреляционная связь ($r_s = 0.69$) между результатами расчетов $\Delta T_{\text{(СПб-Бел)}}$ и слабая корреляционная связь ($r_s = 0.28$) между результатами расчетов $\Delta T_{\text{(СПб-Выб)}}$ по I-му и II-му

критериям. Статистическая значимость коэффициентов корреляции составила 99 %.

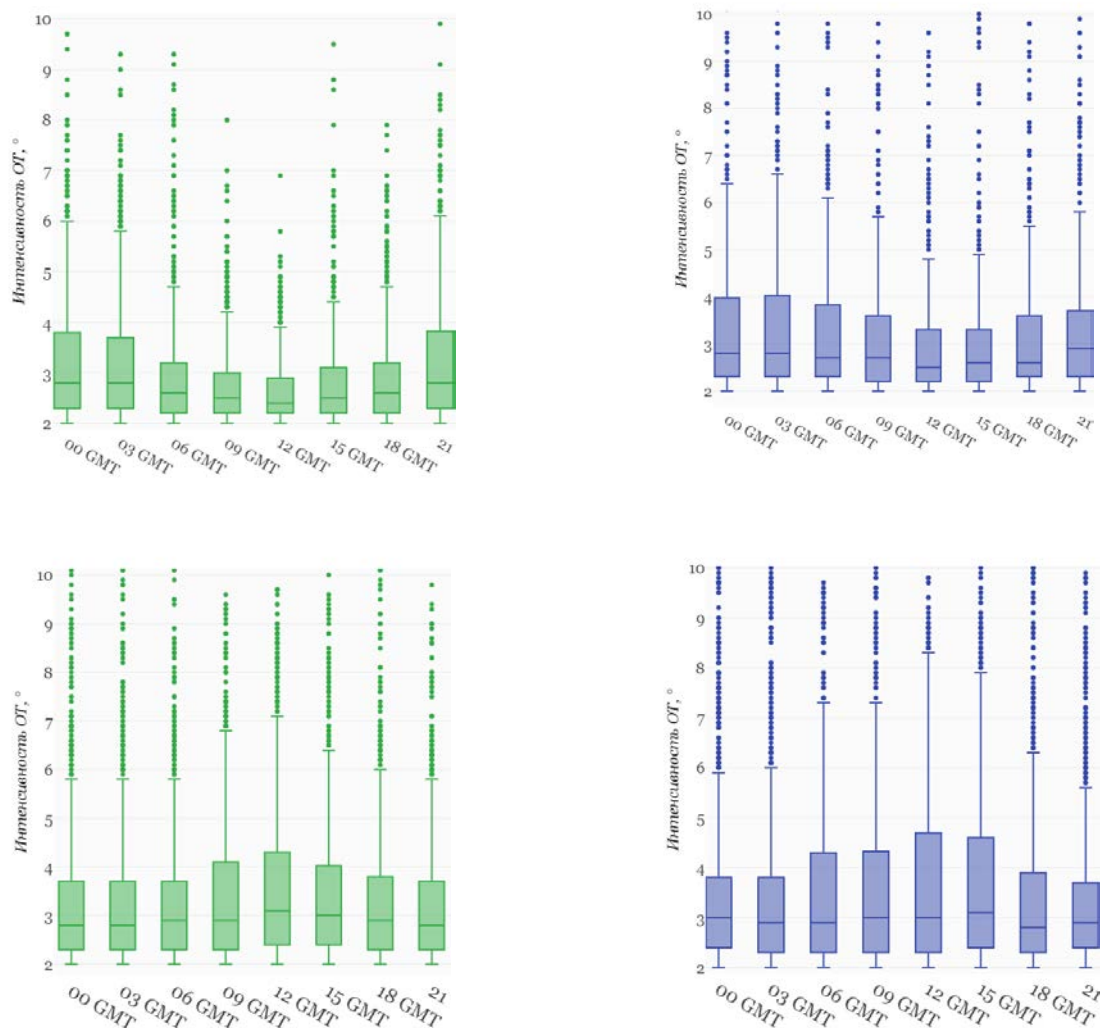


Рисунок 2.5 – Диаграммы размаха суточного хода значений $\Delta T_{(СПб-Бел)}$ (верхний ряд) и $\Delta T_{(СПб-Выб)}$ (нижний ряд) по критериям $\delta > 2^\circ$, $virt > 2^\circ$, соответственно

Таким образом, по данным «спутниковой» станции Белогорка удалось более точно воссоздать температуру невозмущенной мегаполисом местности для корректного использования комбинированного критерия обнаружения ГОТ. При исследовании суточного хода ГОТ по данным $\Delta T_{virt(СПб-Бел)}$ с помощью третьего критерия установлено, что наибольшие средние и максимальные значения интенсивности приходятся на 00 ВСВ и достигают $2,9^\circ\text{C}$ и $5,2^\circ\text{C}$, соответственно, а наименьшие – на 12 ВСВ и достигают $2,3^\circ\text{C}$ и $3,8^\circ\text{C}$, соответственно [Ладохина и др., 2020].

Для демонстрации эффективности использования пространственной интерполяции при фильтрации влияния локальных особенностей местности на измерения обратимся к графикам временного хода значений интенсивности ГОТ за ноябрь 2014 г. (**Рисунок 2.6**). В период 18–21 ноября и 30 ноября интенсивность теплового возмущения по данным $\Delta T_{\delta(СПб-Бел)}$ составляла

около $8\text{ }^{\circ}\text{C}$, но согласно значениям $\Delta T_{\text{virt(СПб-Бел)}}$ интенсивность теплового возмущения была меньше и составляла около $3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. По данным $\Delta T_{\text{delta(СПб-Выб)}}$ интенсивного теплового возмущения в конце ноября не наблюдалось, при этом максимальное значение $\Delta T_{\text{virt(СПб-Выб)}}$ в этот период составило около $3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, т.е. совпало со значением ГОТ рассчитанным с помощью $\Delta T_{\text{virt(СПб-Бел)}}$.

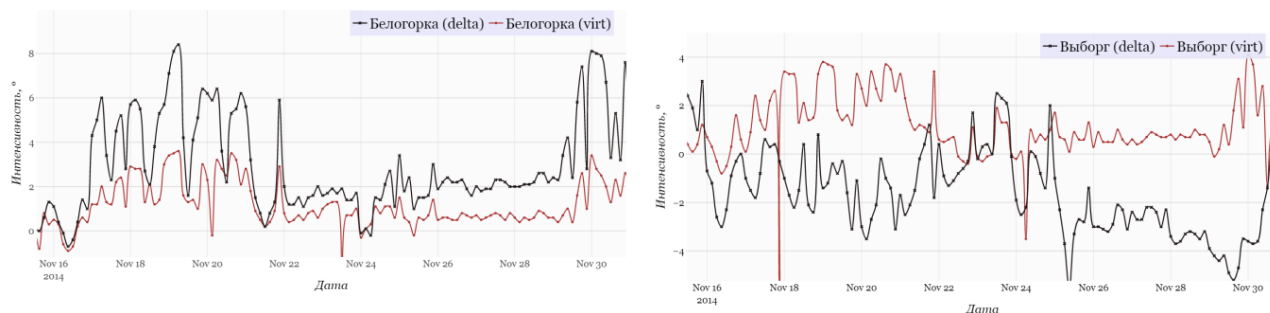


Рисунок 2.6 – Графики временного хода значений интенсивности ГОТ, рассчитанных по методу разностей (*delta*) и с использованием алгоритма пространственной интерполяции (*virt*), для ст. Белогорка (слева) и ст. Выборг (справа) за 11.2014 г.

Таким образом, даже при неудачном (основываясь на величине коэффициента корреляции) выборе «спутниковой» станции значения интенсивности ГОТ, рассчитанные с использованием пространственной интерполяции, будут близки к оптимальным (рассчитанным с использованием данных с подходящей «спутниковой» станции). В проведенном исследовании обоснованный выбор «спутниковой» станции остается крайне важным, поскольку от него зависит количество случаев ГОТ, которое будет найдено по комбинированному критерию. Если температура на «спутниковой» станции выше, чем на фоновых станциях, то тепловое возмущение не фиксируется (интенсивность ГОТ по методу разностей будет меньше интенсивности ГОТ, рассчитанной с помощью пространственной интерполяции). Из-за этой особенности количество случаев ГОТ высокой интенсивности по комбинированному критерию с использованием данных со станции Выборг в качестве «спутниковой» было практически в два раза меньше, чем с использованием данных со станции Белогорка.

Раздел 2.3. Анализ влияния Санкт-Петербурга на осадки

В рядах срочных метеорологических данных, за период с 1994 по 2018 гг., как и во всех рядах метеорологических наблюдений имелось некоторое количество пропусков. Средний процент пропусков для данных о ветре по всем станциям составлял 1 %, при этом на 8 станциях из 16-и пропусков не было. В рядах осадков средний по всем станциям процент пропусков равен 38 %. Поэтому, прежде чем переходить к анализу данных была проведена процедура восстановления срочных значений скорости и направления ветра и суточных сумм осадков на выбранных станциях.

Для восстановления пропусков в данных о суточных суммах осадков использовался метод градиентного бустинга [Friedman, 2001]. Это метод машинного обучения с учителем, основанный на построении линейных комбинаций простых алгоритмов обучения, генерирующих решения лишь немногим лучше, чем случайное угадывание [Freund, Schapire, 1996]. Каждая последующая простая модель должна придавать больший вес и отдавать предпочтение более корректно предсказанным значениям. Легкость настройки алгоритма под широкий спектр практических задач, его простота и эффективность, сделали этот метод очень популярным. В различных сферах научной деятельности, появились многочисленные программные реализации алгоритма. В данной работе программные инструменты анализа данных реализованы на языке Python с использованием пакета xgboost для регрессионной модели градиентного бустинга и пакета scikit-learn для пред- и пост-обработки результирующих выборок.

Было протестировано два типа обучающих выборок. Первая выборка включала 5 среднесуточных характеристик, наблюдаемых на той же станции, для которой проводилось восстановление: приземная температура воздуха, температура точки росы, относительная влажность воздуха, давление на станции, приведенное к уровню моря и облачность нижнего яруса. Во вторую входили данные об осадках на соседних станциях, начальная конфигурация охватывала данные со всех имеющихся в распоряжении станций-соседей, и состояла из 15 характеристик. Пропуски на соседних станциях были заполнены средними значениями за весь период наблюдений (1994–2018 гг.).

Первичная оценка качества восстановления данных (в процентах) была получена по результатам перекрестной проверки: сравнивались восстановленные значения суточных сумм осадков с фактически наблюдавшимися на станции за тестовый период, равный одному году. Успешность восстановления данных с использованием первой выборки в среднем для всех станций составляла порядка 50 %, а с использованием второй: 70–75 %. В обоих случаях использовалась регрессионная модель восстановления с параметрами, установленными по умолчанию и аппроксимацией результатов гамма-распределением, традиционно используемым для суточных значений сумм осадков [Золина, Булыгина, 2016; Горшенин, Мартынов, 2019]. Таким образом, для тонкой настройки модели восстановления сумм осадков методом градиентного бустинга была использована обучающая выборка №2 (данные об осадках на соседних станциях).

На втором этапе были последовательно подобраны оптимумы для определяющих параметров модели восстановления. В первую очередь были определены количество итераций и параметр, ограничивающий переобучение модели: `n_estimators=140` и `learning_rate =0.06`, соответственно. Далее были определены максимальная глубина обучения слабых алгоритмов (`max_depth=3`), процент строк, и количество колонок, используемые для обучения каждого слабого алгоритма

($\text{subsample}=0.9$, $\text{colsample_bytree}=0.5$) а также минимальное значение, на которое должна уменьшиться функция потерь, для перехода к следующей итерации ($\text{gamma}=0$) [Xgboostdevelopers, 2020]. Восстановление производилось для каждой станции последовательно, за каждый год. В качестве меры успешности восстановления данных для каждого года были рассчитаны две статистики: дисперсия (СО) и среднеквадратическое отклонение (СКО). В среднем успешность восстановления характеризуется значениями $\text{CO}=7$ мм/сут и $\text{СКО}=2.6$ мм/сут. За отдельные годы ряды восстановленных значений могли характеризоваться как низкими значениями СО (менее 3 мм/сут), так и с высокими (более 12 мм/сут). Было выдвинуто предположение, что это связано с наличием выбросов в обучающей выборке, для устранения которых были отфильтрованы значения сумм осадков в первом случае выше 95-го перцентиля, во втором – выше 99 перцентиля. Однако в обоих случаях, фильтрация выбросов не повысила качество восстановленных данных.

На третьем этапе была проведена проверка на избыточность набора характеристик обучающей выборки, т.е. не ухудшалось ли качество прогноза из-за наличия данных со станций-соседей, слабо связанных со станцией, для которой проводилось восстановление данных. Для этого была рассчитана степень связанности данных восстанавливаемой станции с каждой из станций-соседей с помощью функции `sklearn.SelectKBest`. Алгоритм работы функции включал три этапа, на первом рассчитывался коэффициент корреляции Пирсона между значениями на станции, для которой проводилось восстановление и станциями-соседами. Затем оценивалась надежность полученных коэффициентов по критериям Фишера и р-значению (уровню доверия нулевой гипотезе). Результатом работы функции являлись ряды метеоэлемента со станций-соседей, возвращенные в порядке убывания связанности.

Обучение проводилось по 7-и наиболее связанным станциям-соседям. Несмотря на то, что некоторые станции-соседи демонстрировали достаточно низкую степень связанности, каждая из них вносила свой вклад в повышение качества восстановления. Поскольку даже при удалении одной слабосвязанной станции (и тем более восьми), качество восстановления осадков ухудшалось, согласно значениям СО и СКО. Таким образом, все 15 станций-соседей являются необходимыми аргументами в регрессионной модели восстановления осадков. Основная причина высокой дисперсии в восстановленных рядах данных – занижение локальных максимумов выпавших осадков или их временное смещение. Примером успешной работы алгоритма градиентного бустинга, может служить восстановленный ряд значений суточных сумм осадков для пункта наблюдений Воейково за 2007 год (*Рисунок 2.7а*), а типичный случай, когда восстановление данных было не очень удачным демонстрирует восстановленный ряд данных для станции Лодейное Поле (*Рисунок 2.7б*). Визуальное сравнение графиков показывает, что для Воейково, даже экстремальные значения выпавших осадков предсказаны корректно и не имеют

временного смещения, а для Лодейного поля наблюдается как занижение величин локальных максимумов, так и их временное смещение. Эти выводы подтверждает расчет годовой дисперсии: для станции Воейково ее значение составляет 2.74, а для Лодейного Поля: 11.48. В итоге, применение метода градиентного бустинга можно считать оправданным для восстановления рядов данных с большим процентом пропусков [Ладохина и др., 2021].

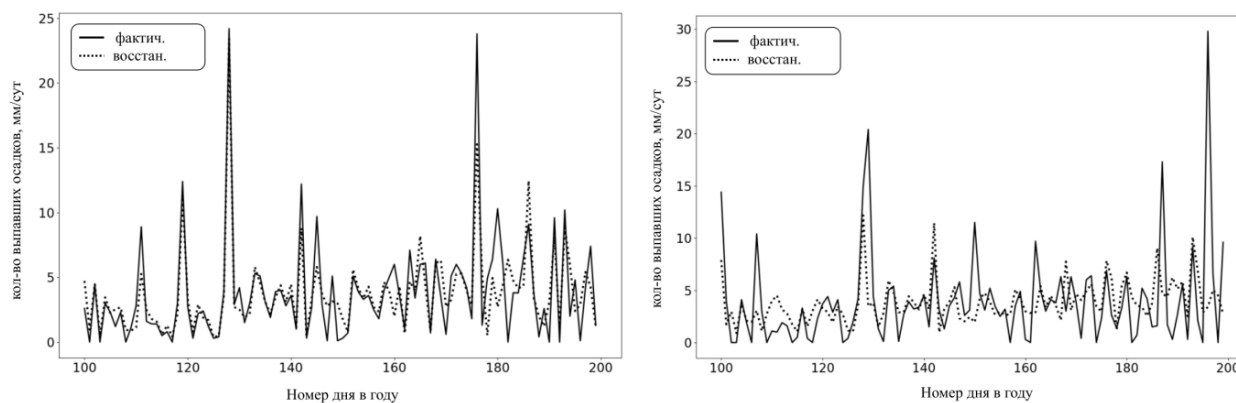


Рисунок 2.7 – Временной ход фактических (сплошная кривая) и восстановленных (пунктирная кривая) суточных сумм осадков за 2007 г. для ст. Воейково (слева) и Лодейное Поле (справа)

Половина рядов в данных измерений скорости и направления ветра, не содержала пропусков, в остальных они были немногочисленны ($< 1\%$), поэтому значения скорости и направления ветра были восстановлены по упрощенному алгоритму. На первом этапе, при наличии пропуска в ряде наблюдений, он был заменен на среднее по всем станциям значение метеоэлемента за данный срок. Эта операция была выполнена для всех имеющихся рядов наблюдений. Затем рассчитывалась степень связанности ряда (функция `sklearn.SelectKBest`), для которого производилось восстановление, с рядами данных каждой пригородной станции. На финальном этапе осредненное по всем станциям значение было заменено на значение метеорологического элемента из ряда с наиболее высоким коэффициентом связанности, а в случае отсутствия данных на станции с наибольшей корреляцией за искомый срок, использовалось значение со следующей по степени связанности станции.

Предполагаемый, гипотетический эффект воздействия мегаполиса на осадки – увеличение их количества на подветренной стороне Санкт-Петербурга и в самом городе по сравнению с наветренной стороной. Причинами могут служить:

- образование ГОТ, делающее стратификацию в городе более не устойчивой в сравнении с окрестностями, что приводит к усилению конвективных процессов;
- избыток аэрозольных частиц в атмосфере города, которые могут выступать в виде ядер конденсации и как следствие приводить к образованию облачности и последующему выпадению осадков

- тормозящее влияние городской застройки, воздействующие на скорость движения воздушных масс со стороны Финского залива, в результате которого падает несущая способность воздушного потока и капли могут достигать поверхности выпадая в виде осадков.

Таблица 2.2 – Повторяемость направлений ветра в Санкт-Петербурге и на станциях ближней группы

Напр. ветра Станция	В	С	С-В	С-З	З	Ю	Ю-В	Ю-З
Белогорка	4960	7647	6660	4595	12022	14647	4411	12651
Ломоносов	7833	5002	5019	7008	13697	10200	7281	10534
Озерки	11614	2331	11364	3875	12392	7183	3470	13775
Санкт-Петербург	6638	6648	6509	5452	12888	8777	5451	13919
Шлиссельбург	3424	6618	7153	3039	7045	17605	4899	11615
Воейково	6586	6072	7295	4976	14557	11703	3831	12865

Согласно [Климат Ленинграда..., 1982; Климат Санкт-Петербурга..., 2010] в Санкт-Петербурге преобладают ветры западного, юго-западного и южных направлений. Таким образом, подветренную территорию мегаполиса должны представлять станции, расположенные на востоке и северо-востоке от него. Однако, поскольку характер городской застройки к настоящему времени значительно изменился, необходимо проверить, соответствует ли повторяемость направлений по имеющимся данным измерений оценке повторяемости в предшествующих работах. Для этого, было произведено сравнение повторяемости направлений ветра за весь исследуемый период для Санкт-Петербурга и станций ближнего района (**Таблица 2.2**). Согласно таблице, где повторяемость отображена в количестве случаев, в Санкт-Петербурге и окружающем его ближнем районе действительно наблюдаются преимущественно указанные в [Климат Ленинграда..., 1982; Климат Санкт-Петербурга..., 2010] направления ветра. Стоит отметить, что на станции Шлиссельбург, расположенной непосредственно восточнее Санкт-Петербурга, западная составляющая скорости ветра мала по сравнению со станцией Воейково, находящейся на северо-востоке от мегаполиса.

Таким образом, на подветренной стороне города в ближнем районе расположены станции Шлиссельбург и Воейково, в дальнем – Новая Ладога (**Рисунок 2.1**). На наветренной стороне города в ближнем районе находится станция Ломоносов, в дальнем районе – Кингисепп.

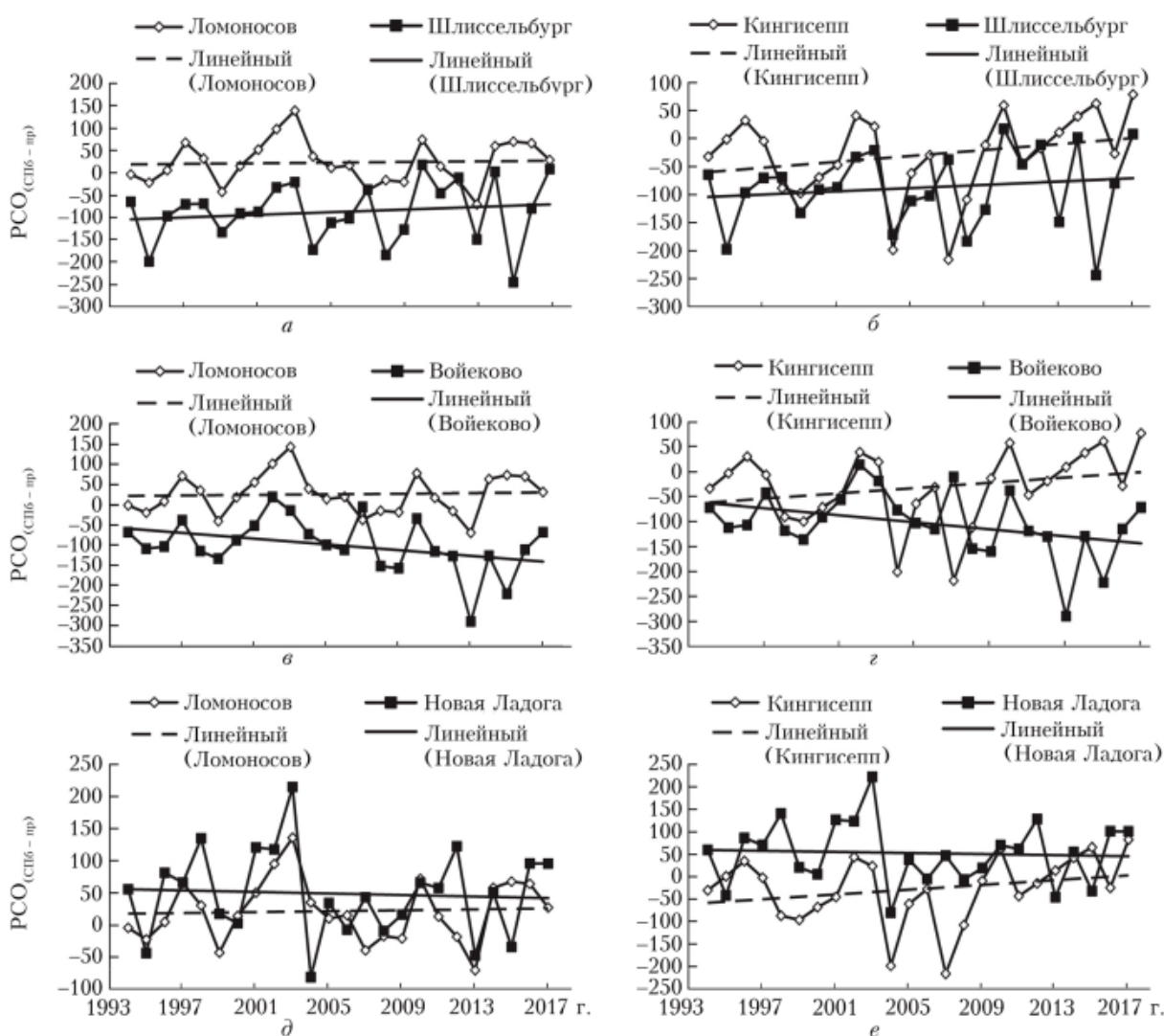


Рисунок 2.8 – Временной ход разностей годовых сумм осадков (PCO) между Санкт-Петербургом и станциями Ленинградской области и их линейные тренды

Были построены графики временного хода разностей годовых сумм осадков между центром мегаполиса и вышеуказанными пригородными станциями. Произведено парное сравнение трендов этих разностей для станций с наветренной и подветренной сторон мегаполиса. Согласно графикам, на станциях, расположенных в ближнем районе (**Рисунок 2.8 а-г**), на подветренной к Санкт-Петербургу стороне, наблюдается увеличение количества осадков, в среднем за год на станциях Воейково и Шлиссельбург выпадает на 80–100 мм осадков больше, чем в Санкт-Петербурге, расчетный критерий Стьюдента на равенство средних значений ($t_{рас.}$) значительно больше критического ($t_{кр.}$) на 5 % уровне значимости. На подветренных, но более отдаленных от мегаполиса станциях, их количество уменьшается и становится меньше или сравнимо с количеством осадков на станциях с наветренной стороны (**Рисунок 2.8 д-е**). Так при сравнении рядов осадков на станциях Ломоносов и Новая Ладога, критерий Стьюдента не превосходит критическое значение. Это означает, что на них в среднем выпадает одинаковое количество

осадков, которое меньше, чем в Санкт-Петербурге на 25–50 мм.

В результате, при парном сравнении данных, наблюдается увеличение количества выпавших осадков в пунктах измерений, расположенных по направлению основного переноса (к востоку от Санкт-Петербурга) на подветренных станциях ближней группы. Этот эффект перестает проследиваться для территорий, удаленных на восток от центра мегаполиса на расстояние более 100 км [Ладохина и др., 2021].

Раздел 2.4. Анализ влияния Санкт-Петербурга на приземный ветер

Согласно [Покровская, Бычкова, 1967; Климат Ленинграда..., 1982] доминирующим является динамический фактор воздействия урбанизации на ветровой режим Санкт-Петербурга. Эффект выражается в ослаблении средней скорости ветра в городе относительно окружающих сельских населенных пунктов, вследствие шероховатости городского ландшафта, оказывающей тормозящее действие на приземные воздушные потоки и усиливающей турбулентность. Для выявления этого эффекта, было произведено сравнение количества случаев, когда отношение средней скорости ветра в центре Санкт-Петербурга к скорости ветра на пригородных станциях было:

- 1) больше 1;
- 2) меньше 0,7.

Такие градации были выбраны на основании работы [Landsberg, 1979] по исследованию ослабления средней скорости приземного ветра в городе Мэрилэнд (Колумбия, США), где продемонстрировано, что значение 0,7, лучше отражает временную тенденцию к ослаблению средней скорости ветра в городе.

Согласно графикам (*Рисунок 2.9*), количество случаев в году, при которых скорость ветра в мегаполисе была больше скорости ветра на фоновых станциях ($V_{СПб} > V_{фон}$), примерно равно количеству случаев, когда скорость ветра в Санкт-Петербурге была меньше, чем на фоновых станциях ($V_{СПб} < V_{фон}$). Исходя из этих результатов, нельзя категорически утверждать, что в центре Санкт-Петербурга наблюдаются более слабые средние скорости ветра, чем на фоновых станциях. Однако полезным оказывается вывод, что для большинства исследуемых пунктов наблюдений области тренды средней скорости ветра, аппроксимированные со средней ошибкой 0,5 %, являются в целом близкими к нулю, из чего следует, что ветровой режим на исследуемых станциях является установившимся и не подвержен временным изменениям.

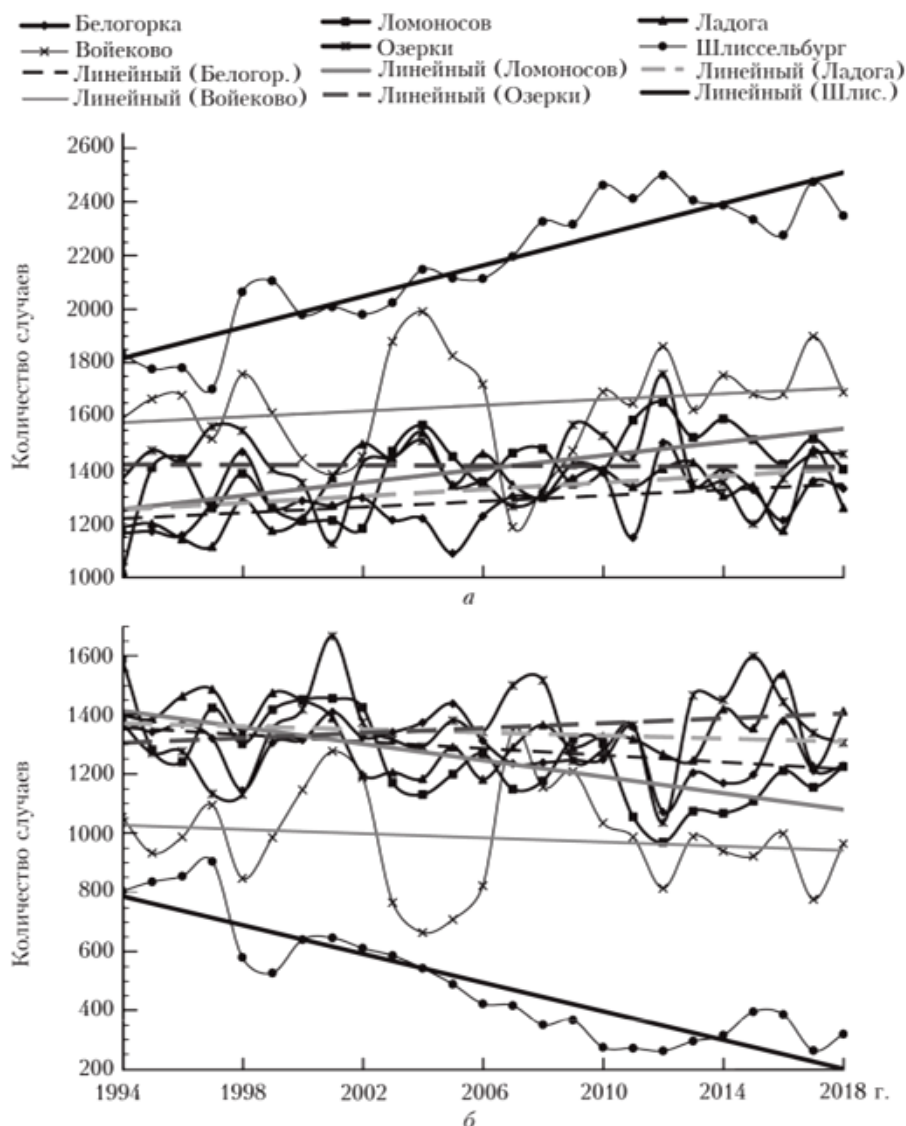


Рисунок 2.9 – Количество случаев, когда отношение средней скорости ветра в Санкт-Петербурге к средней скорости ветра на фоновых станциях было больше 1(а); меньше 0,7 (б)

На станции Шлиссельбург необходимо отметить значительное изменение в характере распределения средней скорости ветра со временем. В начале исследуемого периода распределение количества случаев $V_{СПб} > V_{фон.(Шлис.)}$ и $V_{СПб} < V_{фон.(Шлис.)}$, было близко к таковым на других фоновым станциям, однако во второй половине 1990-х, оно меняется. Количество случаев, когда скорость ветра в Санкт-Петербурге больше скорости ветра в Шлиссельбурге показывает значимую тенденцию к увеличению, а обратное соотношение ($V_{СПб} < V_{фон.(Шлис.)}$), соответственно, к уменьшению. Поскольку Шлиссельбург расположен строго восточнее Санкт-Петербурга, можно предположить, что на ветровом режиме этой станции сильнее всего отражено влияние городской застройки (**Рисунок 2.9 б**), но большой угловой коэффициент линии тренда (-24.1) вероятно обусловлен «зарастанием» расположенной в сельской местности станции молодыми деревьями (**Рисунок 2.2**). Тем не менее, на станции Воейково, которая входит в ближнюю группу подветренных станций, но находится в центре поселения, также наблюдается ослабление средней

скорости приземного ветра. За год в среднем в Воейково на 300–350 случаев меньше более сильных скоростей приземного ветра, чем в Санкт-Петербурге по сравнению с наветренными фоновыми станциями. Для Шлиссельбурга это число варьируется от 600 случаев в начале исследуемого периода до 1000 в конце. Расчетные критерии Стьюдента подтверждают значимость этих отличий.

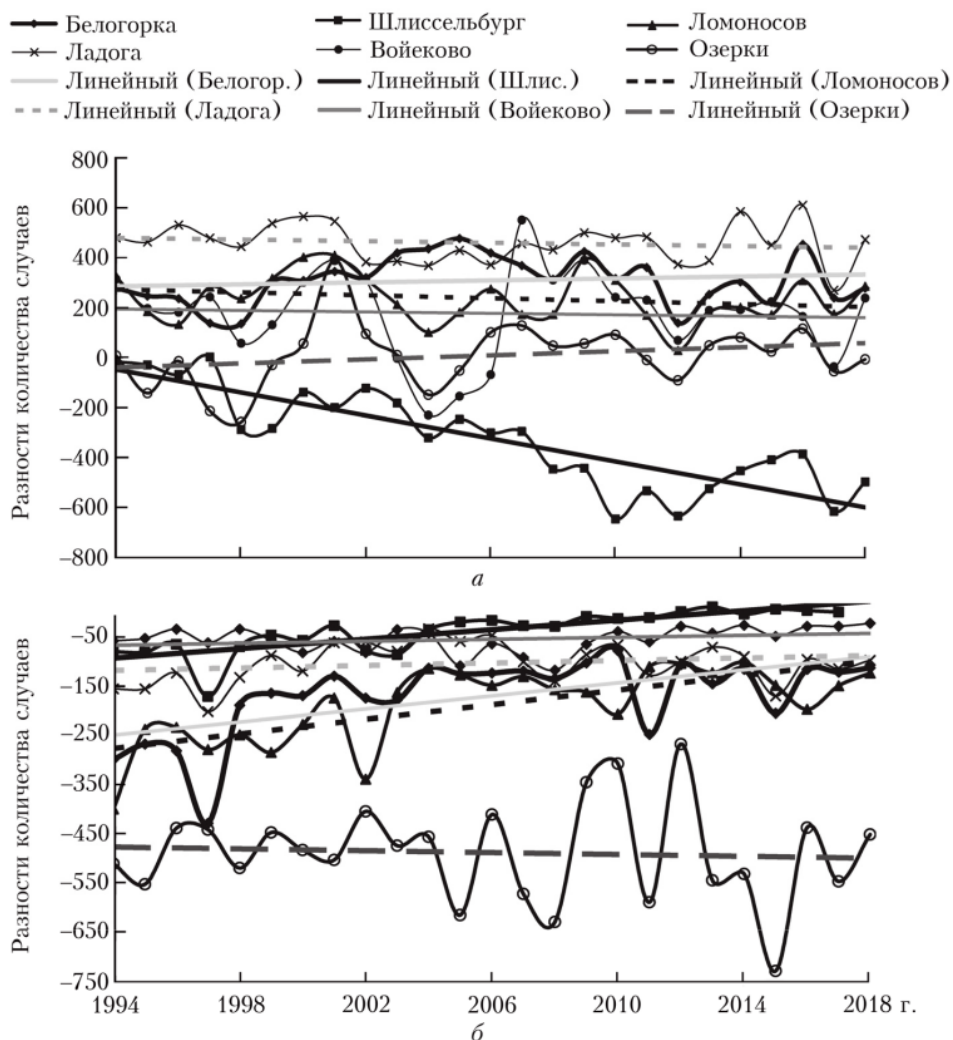


Рисунок 2.10 – Распределение разностей случаев: а – штиля и слабого ветра между Санкт-Петербургом и пригородными станциями; б – умеренного и сильного ветров (> 5 м/с) между Санкт-Петербургом и пригородными станциями

Во многих исследованиях отмечается, что в городе наблюдается больше безветренных дней, чем в сельской местности. Для проверки этого утверждения были найдены разности количества случаев между Санкт-Петербургом и фоновыми станциями ($N_{(SPB \leq 1)} - N_{(RUAL \leq 1)}$), при которых средняя скорость ветра была меньше или равна 1 м/с. Результаты были отображены в виде графиков временного хода (**Рисунок 2.10 а**). По сравнению с большинством рассматриваемых фоновых станций в Санкт-Петербурге отмечено больше дней со штилем, однако, в Шлиссельбурге, как при сравнении средних скоростей ветра, количество безветренных ситуаций со второй половины 1990-х устойчиво превосходит это количество для Санкт-Петербурга. Этот

эффект также виден для станции Воейково, но в меньшей степени. Для обеих подветренных станций $t_{рас.} > t_{кр.}$

Таким образом, значимого воздействия застройки Санкт-Петербурга на слабые и средние скорости ветра не обнаружено [Ладохина и др., 2021]. Более того, наветренная станция Озерки, отличающаяся более сильными скоростями ветра, характеризуется примерно одинаковым количеством безветренных дней по сравнению с Санкт-Петербургом, что было подтверждено значением $t_{рас.}$ меньше критического. В связи с этим, разумно предположить, что наиболее заметная трансформация ветрового режима в городской агломерации будет видна при умеренных и сильных ветрах. Действительно, временной график распределения разностей случаев умеренного и сильного ветров более 5 м/с между Санкт-Петербургом и фоновыми станциями гораздо лучше отражает ожидаемые закономерности воздействия мегаполиса на ветровой режим (*Рисунок 2.10 б*).

Во все рассматриваемые годы умеренные и сильные ветра чаще наблюдались на фоновых станциях, чем в Санкт-Петербурге. При этом наибольшее их количество зафиксировано на станциях, расположенных с наветренной стороны мегаполиса, а наименьшее – с подветренной стороны. Максимальное количество ветреных дней наблюдается на станции Озерки (500 случ./г), меньшее – на станциях Ломоносов и Белогорка (около 200 случ./г), а минимальное – на станции Шлиссельбург (57 случ./г), $t_{рас.} > t_{кр.}$ во всех случаях. При этом тенденция к уменьшению числа ветреных дней в Шлиссельбурге и Воейково, более слабая, чем тенденция к увеличению числа дней со штилем [Ладохина и др., 2021].

Раздел 2.5. Периоды комплексного проявления высокоинтенсивных аномалий метеорологических условий в Санкт-Петербурге

Анализ данных с 15 метеостанций Ленинградской области и городской станции ИЦП за 1994–2018 гг. показал, что влияние урбанизации на поля приземной температуры, осадков и скорости приземного ветра выражается в трех основных аспектах:

- формирование городского острова тепла;
- увеличение количества осадков на подветренной стороне мегаполиса;
- ослабление умеренных и сильных скоростей ветра в городе.

Для идентификации интенсивных проявлений каждой из этих аномалий были разработаны специальные критерии. 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 Санкт-Петербург.

Таблица 2.3 – 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

В итоге, были посчитано количество случаев проявления аномалий метеорологических условий в Санкт-Петербурге, основанное на анализе 24-летнего периода наблюдений, включая случаи, лежащие за пределами 95-й квантили, и определено их суммарное количество по исследованным эффектам за каждый год. Анализ среднегодового и среднесезонного количества аномалий (**Таблица 2.3**) выявил значительную сезонную изменчивость в преобладании определенных эффектов влияния Санкт-Петербурга на метеорологические величины. В среднем за 1994–2018 гг. наибольшее количество случаев зафиксировано в летний период (71 случай), при этом городской остров тепла является доминирующим эффектом во все сезоны, достигая максимума летом (53 случая). Увеличение осадков на подветренной стороне города наиболее выражено весной и летом (по 12 случаев), в то время как ослабление скорости ветра чаще наблюдается зимой (13 случаев). Во все сезоны в 1/3 случаев скорость ветра в центре города была слабее, чем на наветренных станциях, а также и на подветренной станции Воейково. В среднем за год наблюдается порядка 200 случаев проявления исследуемых эффектов влияния Санкт-Петербурга на метеорологические величины, из которых 64 % приходится на ГОТ, что подчеркивает его ключевую роль в формировании городского климата.

Были найдены количественные оценки, характерные для обнаруженных аномалий метеорологических условий в Санкт-Петербурге за исследуемый период при выполнении

соответствующего критерия. Количество осадков на подветренной стороне мегаполиса больше, чем в самом городе и на наветренных станциях в среднем на 1,5 мм/сут, а величина экстремальных значений варьируется от 3,5 до 24 мм. Средняя величина ослабления умеренных и сильных скоростей ветра в Санкт-Петербурге – 4 м/с, экстремальные значения могут достигать 9 м/с. Средняя величина высокоинтенсивных (более 2 °С) температурных возмущений составляет 2.9 °С, спектр аномальных значений – от 5°С до 11 °С.

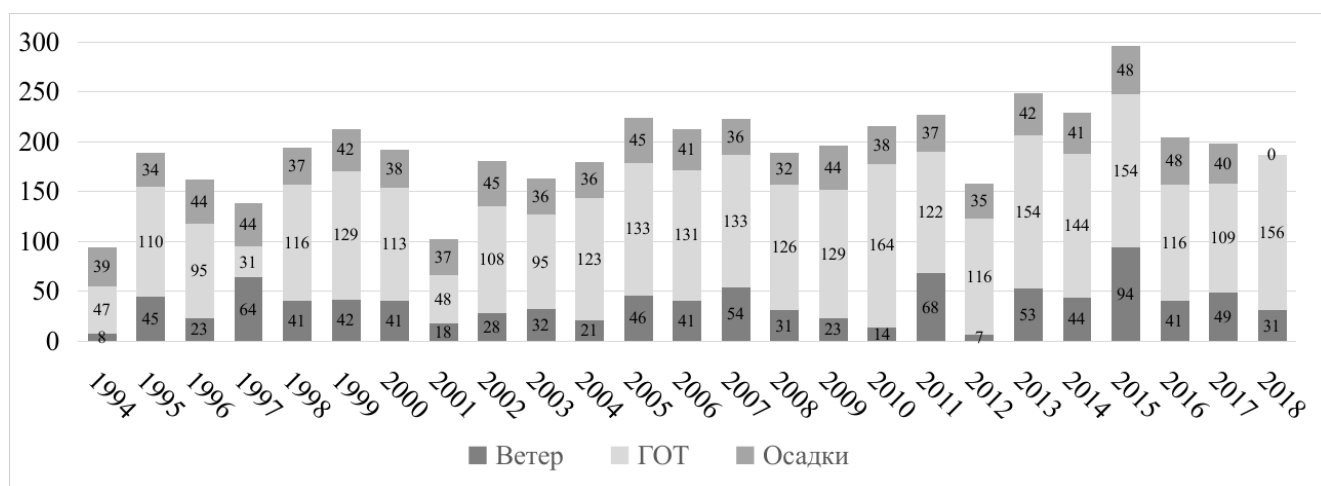


Рисунок 2.11 – Распределение количества аномалий метеорологических условий в Санкт-Петербурге по годам. «ГОТ», «Осадки» и «Ветер» обозначают количество случаев интенсивного ГОТ, увеличения количества осадков на подветренных станциях и ослабления скорости ветра в самом городе соответственно.

Временная динамика количества аномалий метеорологических условий в Санкт-Петербурге характеризуется как межсезонными флуктуациями, так и межгодовой изменчивостью. (**Рисунок 2.11**). Городской остров тепла демонстрирует наиболее выраженную тенденцию к увеличению частоты, достигая максимума в 164 случая в 2010 году. Количество случаев увеличения осадков на подветренной стороне города остается относительно стабильным, колеблясь в диапазоне 32–48 случаев в год, за исключением аномального 2018 года. Частота случаев ослабления ветра характеризуется наибольшей изменчивостью, от 7 до 94 ситуаций в год. Примечательно, что 2015 год характеризуется экстремально высоким суммарным количеством эффектов (296), из которых количество случаев увеличения осадков (48) и случаев ослабления ветра (94) является абсолютным максимумом за весь период наблюдений.

Выбор сезона 2015 года для проведения численных экспериментов выполнен на основании анализа количества аномалий метеорологических условий в Санкт-Петербурге за каждый сезон этого года и их интенсивности. Согласно результатам анализа, внутригодовая изменчивость количества обнаруженных воздействий города на метеорологические величины в 2015 году соответствует среднегодовой динамике, с характерным максимумом в летний период. Это подтверждается данными по количеству случаев городского острова тепла, которое достигает

пика летом (68 случаев), значительно превышая показатели других сезонов.

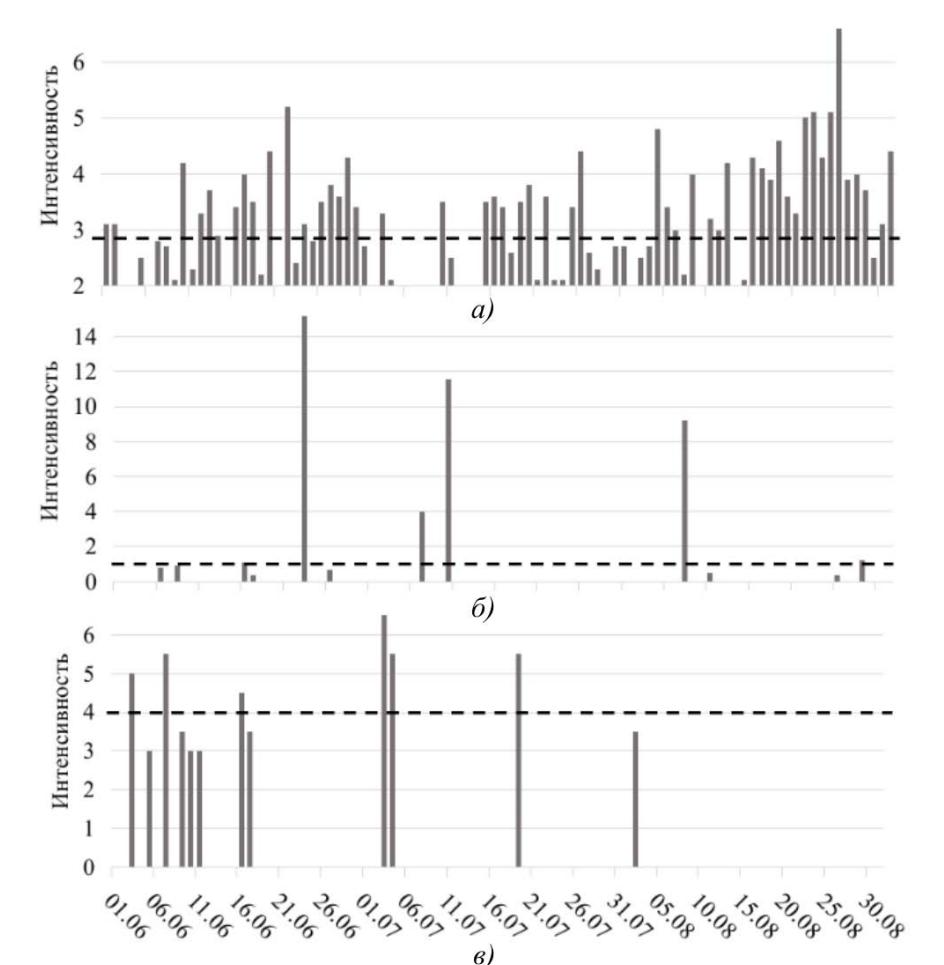


Рисунок 2.12 – Интенсивность а) ГОТ > 2°C, б) увеличения количества осадков на подветренных станциях, в) ослабления скорости ветра в самом городе для лета 2015 г. Пунктирной линией отмечена средняя интенсивность соответствующей аномалии метеорологических условий в Санкт-Петербурге за период 1994–2018 гг.

Тем не менее, количество случаев ослабления ветра и увеличения осадков на подветренной стороне города не достигает максимума летом 2015 года, однако именно в этот сезон наблюдаются пиковые значения их интенсивности (**Рисунок 2.12**). Максимальная интенсивность эффекта ослабления ветра летом 2015г. составила 6,5 м/с, что является наивысшим показателем за год. Аналогично, максимальная интенсивность эффекта увеличения осадков достигла экстремального значения 15 мм именно в летний период, значительно превосходя показатели других сезонов. Сочетание высокой частоты проявления ГОТ с максимальной интенсивностью других эффектов делает летний сезон 2015 года оптимальным периодом для проведения численных экспериментов, а также позволяет изучить наиболее выраженные проявления влияния города на метеорологические величины в их комплексном взаимодействии.

Выводы к главе 2

Исследование влияния Санкт-Петербурга на метеорологические величины проводилось на

основе анализа данных мезомасштабной сети метеорологических наблюдений Ленинградской области за период 1994–2018 гг. Использование 15 метеорологических станций в 150-километровой окрестности города позволило выявить особенности погодного режима, обусловленные влиянием урбанизации.

Исследование ГОТ показало, что наибольшие сезонные средние и максимальные значения его интенсивности наблюдаются зимой, а минимальные – летом, при этом количество случаев проявления ГОТ достигает максимума в летний период. Суточный ход городского острова тепла за исследуемый период соответствует классической схеме: в полдень (12 ВСВ) отмечаются наименьшие средние и максимальные значения ГОТ, а в ночные часы в интервале с 21 до 03 ВСВ – наибольшие. Для расчёта интенсивности ГОТ применялся метод пространственной интерполяции, позволивший исключить влияние локальных особенностей фоновых станций на результаты. В отношении осадков выявлено, что на подветренных станциях ближней группы (Воейково и Шлиссельбург) их количество в среднем на 80–100 мм больше, чем в Санкт-Петербурге. Данная аномалия ослабевает с увеличением расстояния от города и практически исчезает на удалении более 100 км. Анализ данных о приземном ветре показал, что наиболее заметная трансформация ветрового режима в городской агломерации проявляется при умеренных и сильных ветрах (>5 м/с): в городе наблюдается их ослабление по сравнению с загородными станциями. Кроме того, на подветренных станциях (Воейково и Шлиссельбург) отмечено устойчивое увеличение количества дней со штилем по сравнению с мегаполисом.

Проанализирована интенсивность аномалий по выборкам случаев интенсивного ГОТ, увеличения количества осадков на подветренных станциях и ослабления скорости ветра в городе. Полученные количественные оценки показали, что в среднем температурные возмущения достигают $2,9$ °С, увеличение осадков на подветренной стороне составляет $1,5$ мм/сут, а ослабление умеренных и сильных ветров – 4 м/с. В среднем за год регистрируется около 200 случаев проявления аномалий различных типов, из которых 64 % приходится на ГОТ.

В результате анализа межгодовой изменчивости количества случаев проявления аномалий метеорологических условий в Санкт-Петербурге выявлен максимум в 2015 году. Летний сезон 2015 года характеризуется наиболее выраженным комплексным проявлением всех трёх типов аномалий, что делает его оптимальным периодом для проведения дальнейших исследований. С учётом выявленных особенностей, дальнейшие численные эксперименты целесообразно провести для лета 2015 года как наиболее репрезентативного периода проявления аномалий метеорологических условий, обусловленных урбанизированной территорией.

Глава 3. Анализ чувствительности прогностических полей численной модели к изменению параметров подстилающей поверхности, характеризующих урбанизированные районы Санкт-Петербурга

Раздел 3.1. Методы анализа чувствительности

Анализ чувствительности (АЧ) представляет собой исследование того, как неопределенность в выходных данных модели может быть распределена между различными источниками неопределенности во входных параметрах модели [Saltelli et al., 2004]. Применение методов АЧ к региональным численным моделям прогноза погоды сопряжено с рядом существенных методологических трудностей.

Основная проблема заключается в большой размерности пространства входных параметров современных прогностических моделей (порядка 10^2 – 10^3 параметров), которые могут варьироваться в широких пределах и оказывать комплексное влияние на выходные прогностические поля. При этом характер и величина их воздействия не являются постоянными, а зависят от множества факторов: сезона, времени суток, конкретной синоптической ситуации и других условий. Проведение полного анализа чувствительности в таких условиях требует значительных вычислительных ресурсов.

Для решения данной проблемы разработан ряд методологических подходов, направленных на оптимизацию количества необходимых численных экспериментов. Одним из базовых подходов является локальный анализ чувствительности, основанный на исследовании производных целевой функции по входным параметрам в окрестности номинального состояния. Несмотря на ограниченность данного метода (он не учитывает взаимодействие между параметрами и применим только к малым возмущениям), локальный анализ может эффективно использоваться для предварительного отбора наиболее значимых параметров перед проведением углубленного исследования [McClarren, 2018].

Например, в [Avgoustoglou et al., 2017] локальный АЧ модели COSMO (<https://cosmo-model.org>), адаптированной для прогноза на территории Средиземноморья, был проведен только для тех выходных полей, качество прогноза которых важно для прибрежных районов – количества выпавших осадков, минимальной и максимальной температуры, облачности нижнего, среднего и верхнего ярусов. Для описания годового хода численные эксперименты с заблаговременностью 48 часов проводились только за декабрь, февраль и июнь, во избежание сложностей с интерпретацией результатов в переходные сезоны. Из большого числа входных параметров модели COSMO было отобрано 12, априорно сильно влияющих на выбранные

выходные метеорологические поля. Во время индивидуальных расчетов численной модели каждый параметр последовательно варьировался в пределах только трех тестовых значений. Чувствительность определялась путем расчета показателя S , основанного на разности значений метеоэлемента по данным экспериментов с последовательно изменёнными значениями входных параметров и эксперимента с входными параметрами по умолчанию.

$$S_{\langle P \rangle} = \frac{\langle P \rangle_{\text{TEST}} - \langle P \rangle_{\text{DEF}}}{\langle P \rangle_{\text{DEF}}} * 100, \quad (3.1)$$

Здесь $\langle P \rangle$ означает что поле метеоэлемента P было осреднено по времени и по пространству, $\langle P \rangle_{\text{DEF}}$ – контрольный эксперимент с входными параметрами, заданными по умолчанию; $\langle P \rangle_{\text{TEST}}$ – эксперименты с последовательно изменёнными значениями входных параметров.

По итогам этих экспериментов было выявлено 3 наиболее влиятельных параметра для проведения полного АЧ полей региональной модели COSMO к их изменению. Таким образом, простые в использовании и менее вычислительно затратные методы локального АЧ полезны для определения направления и величины изменения выходных данных модели при изменении значения одного параметра.

Методы полного АЧ предназначены для оценки чувствительности выходных данных модели ко всем возможным комбинациям значений отдельных, заранее выбранных входных параметров. Более полное понимание поведения модели обеспечивается за счет информации о взаимодействиях между входными параметрами и их относительном влиянии на выходные поля модели [Saltelli et al., 2008]. Тем не менее, чтобы рассчитать показатели чувствительности, например, для 3 наиболее влиятельных параметров по методу Соболя [Sobol, 2001], потребовалось бы провести порядка 10^3 численных экспериментов, что выглядит особенно вычислительно затратно, если требуется оценить чувствительность полей климатической численной модели. В связи с этим с целью сократить количество численных экспериментов была предложен метод их эмуляции [Neelin et al., 2010] путем построения **метамодели**. Предложенная [Neelin et al., 2010] метамодель основана на предположении, что количественные изменения в полях численной модели ввиду возмущения некоторого параметра являются гладкими и, таким образом, могут быть аппроксимированы полиномиальной регрессией 2-го порядка. Этот метод построения метамодели была успешно апробирован для задачи определения оптимальных значений некоторых входных параметров климатической модели COSMO-CLM [Bellprat et al., 2012]. Показателем чувствительности служил индекс производительности PI [Murphy et al., 2004], который одновременно использовался и для калибровки численной модели – подбора входных параметров таким образом, чтобы прогноз (m) наилучшим образом соответствовал данным наблюдений (o).

$$PI = \left\langle \frac{\sqrt{(m-o)^2}}{(\sigma_o + \sigma_{iv} + \sigma_\epsilon)} \right\rangle . \quad (3.2)$$

Здесь, σ_o – внутригодовая дисперсия данных наблюдений, σ_{iv} характеризует внутреннюю неопределённость прогнозов региональной модели (получена путем расчета дисперсии начальных условий ансамбля начальных условий региональной модели), σ_ϵ характеризует неопределенность данных наблюдений (получена путем расчета дисперсии наблюдений из нескольких баз данных с изменениями).

Метод калибровки численной модели с помощью показателя PI в совокупности с приспособленной (fitted) метамоделью затем был успешно апробирован для калибровки краткосрочного прогноза региональной модели COSMO-LM, покрывающего Швейцарию и Северную Италию [Voudouri et al., 2018].

Адаптации свободно распространяемой модели WRF-ARW для различных регионов прогноза метеорологических полей посвящено огромное количество статей и материалов конференций. При этом, чаще всего корректировка неопределённых параметров модели происходит вручную, на основе знаний и опыта конкретного исследователя, что в ряде случаев не обеспечивает должной объективности и прозрачности результатов [Bellprat et al., 2012].

В WRF-ARW для описания взаимодействия атмосферы с урбанизированной поверхностью широко используется одноуровневая модель городского подслоя (SLUCM), интегрированная в мезомасштабную модель атмосферы. Полный АЧ прогностических полей WRF-ARW к параметрам SLUCM был выполнен в работе [Wang et al., 2011]. Оценивалась чувствительность приземной температуры воздуха и потоков тепла (для урбанизированных и природных поверхностей) к изменению 24-х априорно наиболее влиятельных параметров урбанизированной поверхности в типичный ясный и типичный облачный день.

Создание репрезентативных выборок, содержащих неповторяющиеся наборы входных параметров, покрывающих исследуемые множества, имеет решающее значение для получения достоверных значений показателей чувствительности [Roberts, Casella, 1999]. В описываемой работе использовались методы Монте-Карло с марковскими цепями [Hastings, 1970]. В общей сложности авторами [Wang et al., 2011] было проведено более 1500 серий численных экспериментов, каждая из которых содержала 1850 реализаций набора из 24-х неопределённых параметров. Чувствительность оценивалась путем расчета процентного индекса чувствительности PSI. Величина PSI характеризовала чувствительность, а знак PSI указывал на направление корреляции между выходным полем модели и неопределённым входным параметром.

$$PSI = \frac{1}{N_{lev}} \sum_{j=1}^{N_{lev}} \frac{E[X|Y>y_j] - E[X]}{E[X]} . \quad (3.3)$$

Здесь $j = 1, 2, \dots, N_{\text{level}}$ – индекс условного уровня выборки, где N_{level} – число уровней обеспеченности (в описываемой работе $N_{\text{level}} = 4$), $E[X]$ – ожидаемое (среднестатистическое) значение безусловного распределения неопределённого входного параметра X и $E[X|Y > y_j]$ – ожидаемое значение X на условном уровне j . PSI, таким образом, характеризует вероятность превышения критического значения выходного параметра при вариации X .

Дальнейшее развитие методов полного АЧ прогностических моделей связано с включением методов машинного обучения для построения метамоделей и расчётом индексов, способных количественно описать чувствительность полей прогностической модели к совместному изменению нескольких входных параметров.

Метод Морриса. Чтобы сформировать выборку значений входных параметров для АЧ по Моррису, необходимо определить количество этих параметров и пределы их изменения. Далее выбирается число p – количество уровней, в окрестностях которых каждый из параметров будет последовательно изменяться от начального значения на некоторую величину $\Delta = \frac{p/2}{p-1}$. Одна процедура последовательной вариации одного из N входных параметров позволяет рассчитать элементарный эффект d_i – чувствительность i -го параметра в локальной точке пространства входных параметров. Если объединить элементарные эффекты в один вектор по числу входных параметров, то они сформируют одну траекторию. Несколько раз выбрав новые начальные значения параметров и N раз проведя их последовательную вариацию в окрестностях уровней $0, 1/(p-1), 2/(p-1), \dots, 1$ (далее p -уровней), создается набор траекторий, достаточный для оценки общей чувствительности модели и анализа нелинейности изменения N переменных параметров. Количество траекторий определяется числом r и обычно варьируется в пределах от 4 до 20, а общее количество экспериментов устанавливается формулой

$$r \times (N + 1). \quad (3.4)$$

Таким образом, по сравнению с более требовательными методами АЧ, метод Морриса обладает очень высокой эффективностью за счет относительно небольшого числа экспериментов.

Показателями чувствительности по методу Морриса служат осредненное значение элементарных эффектов μ^* и стандартное отклонение элементарных эффектов σ . Они позволяют качественно оценить чувствительность прогноза при изменении выбранных параметров и нелинейность их взаимодействия соответственно.

$$\mu_i = \sum_{j=1}^r \frac{d_i^{(j)}}{r}, \quad (3.5)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\sum_{j=1}^r (d_i^{(j)} - \mu_i)^2 / r}. \quad (3.6)$$

Здесь индекс j обозначает j -ую траекторию вариации начальных значений входных

параметров.

Метод Соболя. Вариационные методы АЧ, в частности метод Соболя, позволяют получить количественную оценку влияния каждой входной переменной на изменчивость выходных данных модели. Метод Соболя требует гораздо больше вычислительных затрат в сравнении с методом Морриса. Для представления пространства изменчивости параметра может потребоваться порядка $10^3-10^4 \times (N + 1)$ запусков численной модели. Во избежание проведения большого числа экспериментов строятся суррогатные модели, представляющие статистическую взаимосвязь между входными данными (параметрами) и выходными (например, показателями качества прогноза при сравнении с наблюдениями). Суррогатные модели обычно строятся с использованием ограниченного числа оценок дорогостоящей модели.

В работе [Ji et al., 2018] для АЧ использовались индексы Соболя – $S1$, $S2$ и ST :

$$S1_i = \frac{V_i}{V(Y)} ; S2_{ij} = \frac{V_{ij}}{V(Y)} ; ST_i = S1_i + \sum_{i \neq j} S2_{ij} + \sum_{i \neq j \neq k} S_{ijk} + \dots , \quad (3.7)$$

здесь V_i – частная дисперсия i -го параметра, $V(Y)$ – общая дисперсия функции Y , полученная по правилу разложения дисперсии, V_{ij} – частная дисперсия i -го параметра при взаимодействии с j -ым.

Индекс чувствительности первого порядка $S1$ позволяет непосредственно оценить, какие из параметров являются наиболее влиятельными. Сравнение $S1$ с индексом суммарного эффекта ST позволяет определить есть ли взаимное влияние входных параметров на функцию Y . Количественную оценку взаимного влияния двух параметров на функцию Y дает расчет индексов чувствительности второго порядка $S2$.

Раздел 3.2. Локальный анализ чувствительности

Для проведения анализа чувствительности прогностических метеорологических величин к физическим параметрам городской поверхности 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. Горизонтальный шаг сетки в рассмотренных в разделе 1.3 исследованиях (*Таблица 1.1*) составляет 0,33–4 км. В этой работе 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 σ -уровней, из них 17 слоев расположено до уровня 500гПа. Для описания мелкомасштабных атмосферных процессов использовались параметризации на основе анализа исследований [Мостаманди и др., 2015;

Смирнова и др., 2011; Торопова, Русин, 2019; Бутаков, 2020] 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].

Модель SLAB применялась для описания взаимодействия как природных, так и урбанизированных поверхностей с атмосферой. Такой выбор сделан с целью упростить постановку экспериментов (не требуется подготовки и интеграции в модель карты поверхности Санкт-Петербурга с типами урбанизированных поверхностей), упростить интерпретацию результатов при комплексном изменении значений параметров поверхности ввиду небольшого количества этих параметров. Модель SLAB значительно проще современных моделей городского подслоя, что сократит временные и вычислительные затраты на проведение экспериментов.

Однако, модель SLAB не совсем соответствует современному уровню развития моделей городского подслоя. К физическим процессам, которые не учитываются в SLAB и могут повлиять на перенос результатов в более сложные модели городского подслоя, относятся: изменение альбедо вследствие переотражения радиационных потоков зданиями и крышами и изменение влагосодержания почвы во времени. В первом случае предполагается, что этот эффект будет наименьшим для альбедо крыш, к изменению значений которого поля атмосферной модели наиболее чувствительны. Второе упрощение позволяет провести анализ чувствительности прогностических полей к изменению значений тепловой инерции и теплоёмкости поверхности. В более сложных параметризациях деятельного слоя суши, например, Noah LSM, теплопроводность и теплоёмкость поверхности не характеризуются с помощью фиксированных параметров и зависят от влагосодержания почвы, величина которого свою очередь также меняется во времени [Chen, Dudhia, 2001].

Точность данных о свойствах поверхности существенно влияет на воспроизведение процессов в приземном слое в численной модели. Чтобы идентифицировать урбанизирована ли ячейка сетки или же покрыта лесами, пахотными землями или водой, в модели WRF-ARW предусмотрена возможность интеграции нескольких продуктов, содержащих информацию о свойствах поверхности. В разработанной конфигурации использован продукт MODIS IGBP (**M**oderate Resolution **I**maging **S**pectroradiometer land cover defined by the **I**nternational **G**eosphere **B**iosphere **P**rogramme classification scheme) [Friedl et al., 2010]. Он представляет собой набор данных с пространственным разрешением 30 угловых секунд, на основе спутниковой информации спектрометра MODIS, собранной в период 2001–2005 гг. Разнообразие поверхностей представлено 20-ю типами, три из которых характеризуют поверхности, измененные человеком, включая 1 тип для описания городской среды. Среди оставшихся типов,

14 используются для описания поверхностей, покрытых характерной для различных регионов планеты растительностью (леса, тундры, поля, саванны и др.), и 3 типа характеризуют области без растительности.

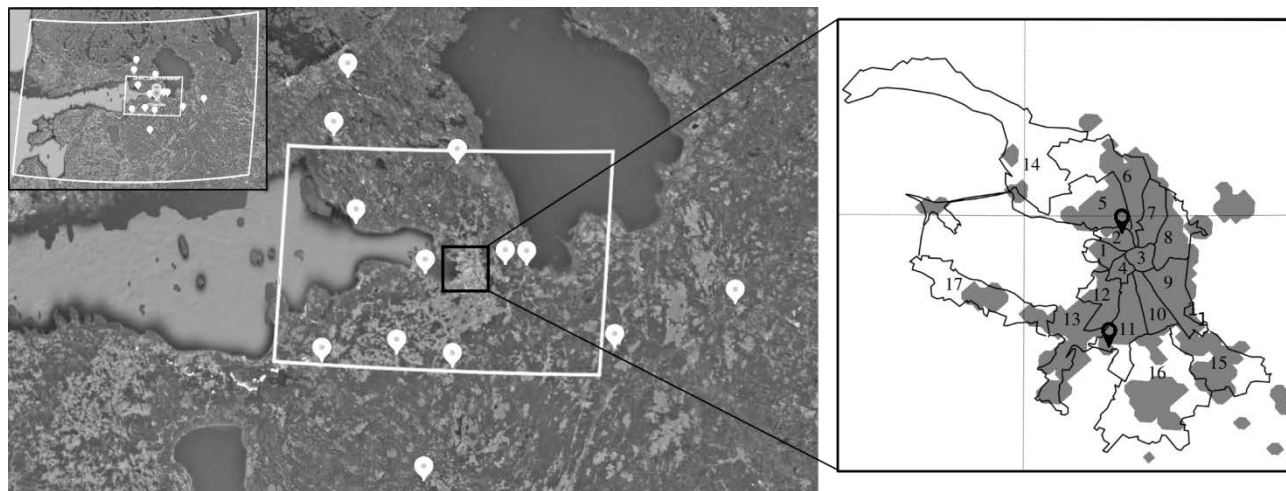


Рисунок 3.1 – Границы вложенных областей моделирования и расположение станций с данными наблюдений. На рисунке справа показано наложение границ административных районов Санкт-Петербурга на область, для которой осуществлялось изменение ее свойств в численной модели (маркерами черного цвета обозначены городские станции).

Область суши вокруг Санкт-Петербурга окружена в основном вечнозелеными и смешанными лесами. В соответствии с классификацией MODIS IGBP, диапазоны значений физических параметров, характеризующие урбанизированную поверхность (тип «Город») и подстилающую поверхность, покрытую лесом (типы «Лес») в модели, различаются. Значения влагосодержания почвы для типов «Лес» в 3 раза выше, чем для типа «Город», диапазоны значений излучательной способности выше на 0,05–0,09, тепловой инерции – на $1 \text{ Дж м}^{-2} \text{ К}^{-1} \text{ с}^{-1/2}$, теплоёмкости поверхности – на $1\text{--}2 \text{ МДж м}^{-3} \text{ К}^{-1}$. Значения параметров, служащих непосредственно для описания природных поверхностей (листовой индекс, глубина залегания корней) для типа «Город» в несколько раз ниже, чем для типов «Лес». Значения параметра шероховатости совпадают для обоих типов (равны 0,005 м). Схожи диапазоны значений альбедо (различия составляют порядка 0,02 для конкретных типов «Лес»).

Для численных экспериментов пространственные данные о свойствах поверхности интерполированы на расчётные сетки конфигурации модели с помощью модуля препроцессинга WRF-ARW. Полученные в ходе интерполяции файлы были проанализированы на соответствие расчетного расположения урбанизированных зон фактическому (**Рисунок 3.1**). Районы 1–13 действительно сильно урбанизированы, тогда как район №14 – Курортный район – характеризуется обширными зонами растительности. Затем была проведена дополнительная обработка полученных файлов таким образом, чтобы типу поверхности, для которого менялись

значения физических параметров, соответствовала только область Санкт-Петербурга, во избежание появления откликов от областей, соответствующих другим городам.

Таким образом, в работе проведена оценка чувствительности прогностических полей к изменению параметров городской застройки в плоской модели деятельного слоя суши. Оценивалось влияние изменения значений альбедо (A), излучательной способности (E), влагосодержания (M), тепловой инерции (C) и шероховатости (Z_0). Численные эксперименты проведены за интервал с 14 по 22 июня 2015 г., когда в Санкт-Петербурге наблюдались случаи интенсивного ГОТ по данным станции, отражающей погодный режим города, и фоновых станций (см. Раздел 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 рассчитан контрольный эксперимент с заданными по умолчанию значениями параметров за выбранный период времени: $A=0,15$, $M=0,1$, $Z_0=0,5 \times 10^{-2}$, $C=3,0$, $E=0,88$. Затем проведена серия экспериментов с последовательным изменением параметров городской застройки: $A=0,05$, $A=0,3$, $M=0,05$, $M=0,2$, $Z_0=1,0 \times 10^{-2}$, $C=4,0$, $C=2,0$, $E=0,78$. По результатам анализа чувствительности последовательных экспериментов выбраны значения параметров, которые в наибольшей мере влияют на поле приземной температуры в городе, и рассчитан финальный эксперимент с заменой всех значений выбранных физических параметров поверхности на новые.

Количественные оценки для анализа чувствительности получены путем расчета среднего и среднеквадратического отклонений (СО и СКО). Станции с данными измерений разделены на две группы – сельские (Rural) и городские (Urban). В группу сельских станций включено 14 пунктов в радиусе от 25 до 150 км от Санкт-Петербурга; в группу городских станций вошли пункты ИЦП и Пулково (*Рисунок 3.1*). Значения прогностических полей в точках сельских станций извлекались из выходных файлов модели для области моделирования с горизонтальным шагом сетки 3 км, в точках городских станций – с шагом сетки 1 км. Выбранные статистические показатели, которые в основном используются для верификации прогнозов, в данном случае необходимы для оценки изменения отклонений значений прогностических полей при изменении параметров городской застройки. Для этого рассчитаны разности между значениями статистических показателей контрольного эксперимента и экспериментов с измененными параметрами.

Анализ результатов контрольного эксперимента. Итоговые значения статистических показателей для приземной температуры (T_2), скорости ветра (W_{10}) и относительной влажности

воздуха (RH2) приведены в **таблице 3.1**. Из результатов расчета показателей для поля приземной температуры исключен срок 21:00 15-го июня, поскольку для обеих групп станций наблюдались большие ошибки прогноза температуры (СКО = 6,8 и 4,4 °С для сельских и городских станций соответственно). Исключение срока 21:00 15-го июня позволило определить относительно слабое влияние изменения параметров подстилающей поверхности на итоговые значения статистических показателей, особенно в ночные часы. Из анализа СКО следует, что с помощью данной конфигурации модели лучше прогнозируется приземная температура для станций в сельской местности и заметно хуже для городских станций. Для обеих групп в прогнозах систематически занижается приземная температура, сильнее – для городских станций, согласно результатам расчета СО.

Таблица 3.1 – Статистические оценки контрольных прогнозов

	Сутки						Ночь					
	T2		W10		RH2		T2		W10		RH2	
	СО	СКО	СО	СКО	СО	СКО	СО	СКО	СО	СКО	СО	СКО
Urban	-1,14	1,84	1,98	2,51	7,99	9,99	-1,59	2,08	1,86	2,23	10,19	11,94
Rural	-0,76	1,83	1,94	2,42	7,41	11,78	-0,44	1,79	1,77	2,25	6,95	11,75

По результатам предварительного анализа качества прогноза скорости приземного ветра оказалось, что в прогнозах заметнее завышаются его значения для городских станций, чем для сельских станций. Согласно предположению, приведённому в Разделе 2.1, в последние годы произошло зарастание молодыми деревьями окрестностей станции Шлиссельбург (59,93° с.ш., 31,0° в.д.), а при сравнении контрольного эксперимента с данными измерений среднее СКО для этой станции составило 3,3 м/с – на 0,8 м/с больше, чем на других станциях. В связи с этим, данные Шлиссельбурга исключены из результатов (**Таблица 3.1**) и дальнейшего анализа прогноза скорости ветра.

Суточные ошибки прогноза приземной влажности для сельских станций больше, чем для городских, а ночные – меньше. Исходя из значений СО следует, что в экспериментах систематически завышается относительная влажность для обеих групп станций.

Эксперименты с изменёнными значениями параметров поверхности города. Результаты расчета показателей чувствительности прогноза для городских станций (ОГМС Санкт-Петербург и Пулково) по данным экспериментов с последовательным изменением параметров городской застройки сведены в **таблицу 3.2**. Из ее анализа следует, что прогностические поля наиболее чувствительны к изменению влагосодержания почвы. При этом, как увеличение, так и уменьшение влагосодержания оказывает одинаковое по модулю воздействие на прогностические поля температуры и скорости ветра. Однако, увеличение влагосодержания (согласно значениям

ночных и суточных статистик) значительно сильнее влияет на поле влажности воздуха, чем его уменьшение. Уменьшение влагосодержания способствует росту прогностической приземной температуры воздуха, увеличению скорости приземного ветра и уменьшению влажности приземного воздуха в городе. Поскольку большинство городских поверхностей влагонепроницаемо (дороги и стены), а излишки влаги быстро удаляются системами городской канализации, в то время как естественные поверхности хорошо сохраняют влагу, полученный результат можно интерпретировать как высокую чувствительность прогностических полей к доле урбанизированной поверхности в ячейке.

Таблица 3.2 – Разности статистических оценок контрольного эксперимента и прогнозов с измененными параметрами (городские станции)

Эксп.	Сутки						Ночь					
	T2		W10		RH2		T2		W10		RH2	
	Δ_{CO}	Δ_{CKO}	Δ_{CO}	Δ_{CKO}	Δ_{CO}	Δ_{CKO}	Δ_{CO}	Δ_{CKO}	Δ_{CO}	Δ_{CKO}	Δ_{CO}	Δ_{CKO}
A=0,05	-0,13	0,06	-0,13	-0,08	0,69	0,38	-0,08	0,02	-0,15	-0,06	0,33	0,20
A=0,3	0,25	-0,17	0,09	0,09	-0,90	-0,79	0,18	-0,13	-0,05	-0,03	-0,76	-0,65
M=0,05	-0,16	0,08	-0,10	-0,09	1,08	0,70	-0,13	0,08	-0,12	-0,12	0,72	0,53
M=0,2	0,19	-0,08	0,07	0,10	-1,67	-1,15	0,15	-0,06	0,01	0,04	-1,17	-0,91
Z ₀ = 1	-0,04	0,00	0,28	0,25	0,48	0,39	-0,10	0,04	0,16	0,14	0,68	0,66
C = 4	0,05	-0,03	0,02	0,05	-0,14	-0,12	-0,04	0,01	-0,08	-0,02	-0,05	0,06
C = 2	0,04	-0,03	-0,06	-0,07	0,01	-0,14	0,18	-0,14	-0,10	-0,09	-0,70	-0,62
E=0,78	-0,06	0,02	-0,03	-0,02	0,33	0,19	-0,08	0,01	-0,08	-0,07	0,20	0,16

Примечания: Здесь Δ_{CO} и Δ_{CKO} разности значений статистик контрольного эксперимента со значениями статистик для экспериментов с измененными параметрами

Увеличение альбедо с 0,15 до 0,3 сильнее влияет на поле приземной температуры в городе (способствуя понижению температуры), чем уменьшение этого параметра. Также наблюдается заметные изменения в поле приземной влажности, при изменении альбедо: величина роста влажности при увеличении альбедо выше, чем величина уменьшения влажности при уменьшении этого параметра. Изменения величины скорости приземного ветра одинаковы по модулю: увеличение альбедо способствует небольшому ослаблению скорости приземного ветра в городе и наоборот. Большая продолжительность светового дня обеспечивает чувствительность прогностических полей к изменению альбедо и в ночные часы.

В ночные часы наибольшее влияние на изменение полей метеоэлементов оказало увеличение параметра шероховатости с $0,5 \times 10^{-2}$ до $1,0 \times 10^{-2}$. Ожидается, увеличение параметра шероховатости вызвало наибольшее ослабление скорости приземного ветра по сравнению с экспериментами, где изменялись значения других параметров. Заметны изменения и в поле приземной влажности – ее

значение уменьшилось на 0,66 % по сравнению с контрольным экспериментом. Достаточно слабо влияет увеличение параметра шероховатости на поле приземной температуры: в ночные часы наблюдается ее небольшое увеличение, которое компенсируется слабым уменьшением в дневные часы, так что итоговая суточная разность $\Delta_{\text{ско}}$ равна нулю.

Наиболее чувствительным к изменению параметра тепловой инерции поверхности оказалось поле приземной влажности. При этом в ночные часы уменьшение значения этого параметра с 3 до 2 ведет к большим отклонениям приземной влажности от контрольного эксперимента, в сравнении с экспериментом с увеличенным параметром $\lambda = 4$. Ночное увеличение влажности при уменьшении значения тепловой инерции компенсируется днем, и итоговое суточное увеличение влажности в сравнении с контрольным экспериментом невелико. Эти же закономерности справедливы для поля приземной температуры, с той разницей что в ночные часы при уменьшении значения тепловой инерции приземная температура в районах городских станций также уменьшилась, а днем этот эффект практически полностью компенсировался увеличением приземной температуры, так что суточное отклонение от контрольного эксперимента оказалось невелико. Таким образом, уменьшение параметра λ способствует увеличению амплитуды колебаний приземной температуры в течение суток, отражая процесс быстрого теплообмена с атмосферой, характерный для урбанизированной поверхности. Более высокое значение этого параметра уменьшает амплитуду колебаний приземной температуры, и как следствие, разница между ночными и дневными отклонениями значений температуры в сравнении с контрольным экспериментом невелика. Поскольку в плоской модели деятельного слоя суши, использованной для анализа чувствительности, значение тепловой инерции напрямую зависит от теплоёмкости ($C = C_p \sqrt{k}$), предполагается что полученные оценки чувствительности прогностических полей к изменению параметра тепловой инерции справедливы и для параметра объёмной теплоёмкости.

Согласно [Wang et al., 2011] вариация параметра излучательной способности в пределах 0,88–1 не оказала значимого влияния на прогностические поля численной модели. В этой работе значение излучательной способности уменьшено до 0,78, что привело к небольшому росту температуры и слабому увеличению скорости приземного ветра по сравнению с контрольным экспериментом. Уменьшение параметра также повлияло на поле приземной влажности – влажность воздуха в городе уменьшилась. В использованной плоской модели уменьшение излучательной способности отражает процесс задержки городскими каньонами излученной части солнечной радиации, однако в более сложных параметризациях городского подслоя, например, SLUCM, этот процесс учтён явно, и вносить изменения не требуется.

Анализ результатов финального комплексного эксперимента. Этот эксперимент подразумевает проведение анализа чувствительности к комплексному изменению параметров

поверхности. Наиболее интересным представляется оценка влияния комплексного изменения параметров на поле приземной температуры в городе, и, следовательно, на приземный городской остров тепла. Для этого из таблицы 3.2 выбраны значения параметров, при которых в новых экспериментах температура в городе увеличилась по сравнению с контрольным экспериментом: $A=0,05$, $M=0,05$, $Z_0=1,0 \times 10^{-2}$, $E=0,78$. Просуммировав значения $\Delta_{СКО}$ из таблицы 3.2, ожидается, что приземная температура в пределах города увеличится, а относительная влажность – уменьшится. Отклонения от данных измерений с городских станций уменьшатся на $0,16$ °С и $1,66$ % соответственно. Предполагается, что влияние увеличенного параметра шероховатости на скорость приземного ветра компенсирует воздействие от изменения значений остальных параметров. Ожидается, что скорость приземного ветра незначительно возрастает: СКО увеличится на $0,06$ м/с по сравнению с контрольным экспериментом.

Таблица 3.3 – Статистики прогноза приземных метеоэлементов по результатам контрольного и финального экспериментов (городские станции)

	Сутки						Ночь					
	T2		W10		RH2		T2		W10		RH2	
	CO	СКО	CO	СКО	CO	СКО	CO	СКО	CO	СКО	CO	СКО
Контр.	-1,16	1,86	1,98	2,51	7,99	9,99	-1,59	2,08	1,86	2,23	10,19	11,94
Финал.	-0,79	1,67	1,83	2,34	5,43	8,54	-1,13	1,83	1,79	2,14	7,51	9,91

Показатели чувствительности приземных прогностических полей к изменению параметров поверхности города по результатам финального эксперимента (Финал.) сведены в **таблицу 3.3**. Чувствительность приземной температуры к изменению параметров поверхности оказалась выше предполагаемой: в среднем за сутки величина СКО уменьшилась на $0,2$ °С, по сравнению с контрольным экспериментом, ночью – на $0,25$ °С. Чувствительность поля относительной влажности оказалась ниже ожидаемого значения: осредненная за сутки величина СКО в сравнении с контрольным экспериментом уменьшилась на $1,46$ %. Как и для приземной температуры, чувствительность прогноза относительной влажности к изменению параметров выше ночью, чем днем, согласно разности $СКО_{\text{Контр.}}$ и $СКО_{\text{Финал.}}$, равной $2,03$ %. Скорость приземного ветра в городе не увеличилась, а количественно отклонение прогностической скорости приземного ветра в среднем за сутки уменьшилось на $0,15$ м/с по сравнению с контрольным экспериментом. Таким образом, на основе оценки результатов последовательного изменения параметров городской поверхности в модели удалось довольно точно предсказать количественное изменение статистик чувствительности прогноза для финального эксперимента [Ладохина и др., 2022].

Прогноз ГОТ. Относительно небольшая чувствительность приземной температуры к

изменению параметров подстилающей поверхности по данным осредненных статистик может быть более значительной в отдельные сроки. Чтобы это выяснить, проанализированы разности температур между городом и сельской местностью (**Рисунок 3.2**), рассчитанные по данным ОГМС Санкт-Петербург и фоновой станции Белогорка. Прогностические значения температуры в мегаполисе по результатам контрольного и финального экспериментов получены путем осреднения значений в точках сетки в 5-километровой окрестности центра города. 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: $1,3^\circ$ и 19 июня (18 ВСВ): $1,6^\circ$.

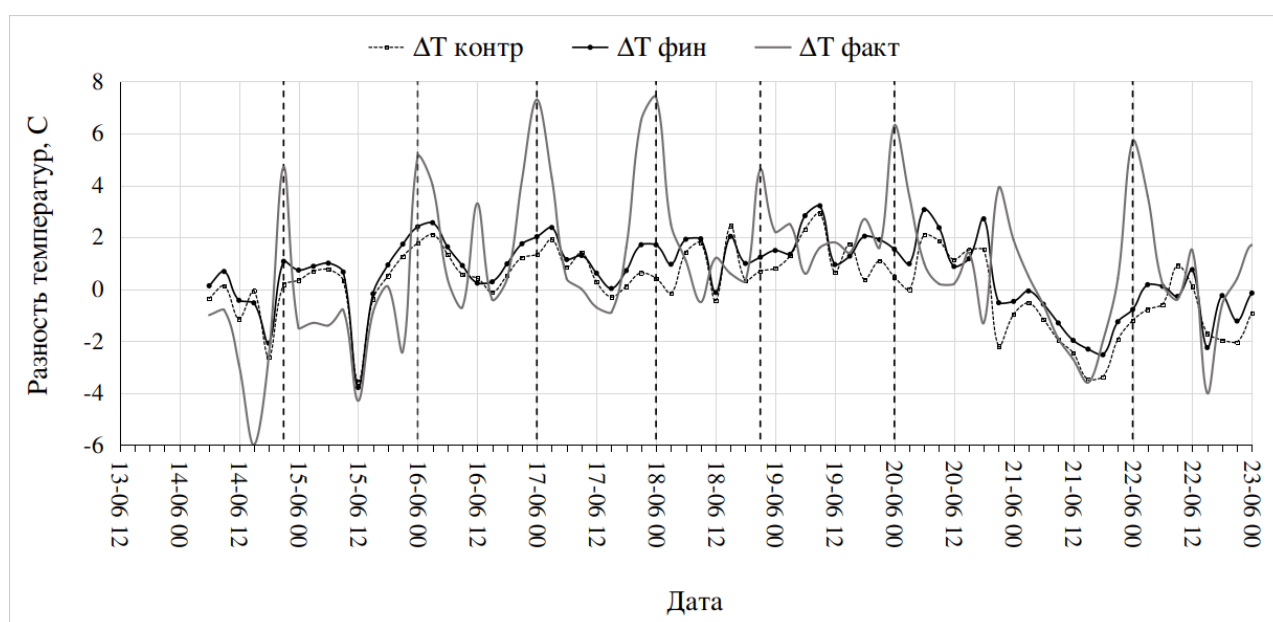


Рисунок 3.2 – Временной ход разности приземных температур по данным наблюдений ($\Delta T_{\text{факт}}$) и результатам контрольного ($\Delta T_{\text{контр}}$) и финального ($\Delta T_{\text{фин}}$) экспериментов

Но наиболее полную оценку влияния изменения параметров подстилающей поверхности на приземную тепловую аномалию города даёт рассмотрение ее пространственной структуры. Пространственное распределение температуры представлено в виде разницы ее полей по данным финального и контрольного экспериментов (**Рисунок 3.3**). В ночные часы (с 21 до 03 ВСВ) 15, 16, 17, 18 июня температурная аномалия развивалась в пределах и в ближайших окрестностях Санкт-Петербурга, достигая 2° в некоторых районах города, при этом поле температуры в сельской местности в финальном эксперименте практически не изменилось. В ночные часы 20 и 22 июня тепловая аномалия не локализована: отклонения температуры наблюдались не только в области, соответствующей городу, но и на всей расчётной сетке модели. Анализ синоптической ситуации

показал, что в этот период погоду в Санкт-Петербурге и окрестностях определяло малоградиентное поле давления со слабым неустойчивым ветром (до 2..3 м/с) и малой облачностью. Эти условия являются особенно благоприятными для развития ГОТ, поэтому изменение значений параметров, к которым поле приземной температуры наиболее чувствительно, привело к распространению отклонений температуры далеко за пределы мегаполиса [Ладохина и др., 2022].

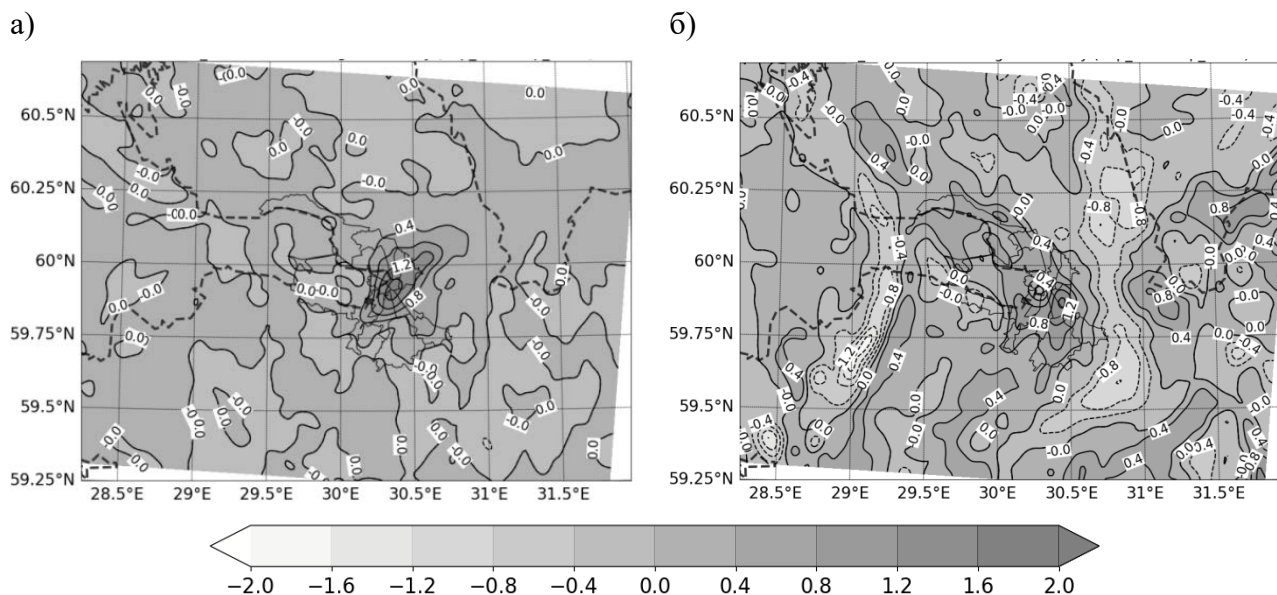


Рисунок 3.3 – Разность полей температур между контрольным и финальным экспериментами в сроки а) 01:00 18 июня, б) 21:00 22 июня 2015 г.

В связи с обнаружением отклонений температуры на всей расчётной области, проведена оценка влияния изменения параметров городской поверхности на прогноз метеоэлементов для сельских станций. Согласно разности статистик СКО для контрольного и финального экспериментов влияние прослеживается вплоть до окрестностей ячейки сетки, соответствующей самой удалённой (150 км) от Санкт-Петербурга станции Лодейное Поле. Например, в срок 18:00 ВСВ 22 июня разность $СКО_{\text{Контр.}}$ и $СКО_{\text{Финал.}}$ составляла $-1,3^\circ$.

Раздел 3.3. Полный анализ чувствительности прогностических полей к изменению параметров подстилающей поверхности Санкт-Петербурга

Полный анализ чувствительности приземных метеоэлементов к изменению параметров подстилающей поверхности в одноуровневой модели городского подслоя, проведенный [Wang et al., 2011], выявил значительное влияние морфологических параметров городского каньона и термических характеристик крыш (за исключением их излучательной способности) на приземные поля прогностической модели. Однако остается открытым вопрос о применимости этих результатов при использовании другой модели городского подслоя, в частности, более простой модели SLAB. Насколько известно автору, полный АЧ приземных метеоэлементов к

изменению параметров подстилающей поверхности в модели деятельного слоя суши SLAB ранее не проводился. Дополнительно стоит отметить, что в работе [Wang et al., 2011] не оценивалось совместное влияние изменения нескольких входных параметров на выходные поля прогностической модели.

Для полного АЧ были выбраны даты с наибольшими значениями интенсивности городского острова тепла в 2015 году в Санкт-Петербурге, поскольку именно в эти периоды влияние свойств урбанизированной территории на слой атмосферы над ней максимально. Ввиду того, что зимой для северных городов высокая интенсивность ГОТ в значительной степени обусловлена вкладом антропогенного потока тепла [Кузнецова и др., 2017, Varentsov et al., 2018b], случаи проявления зимнего ГОТ в этой работе не рассматривались. Интенсивность пространственной приземной температурной аномалии над Санкт-Петербургом оценивалась с помощью комбинированного критерия максимальной интенсивности ГОТ (см. Раздел 2.2). 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.

Конфигурация численной модели WRF-ARW осталась неизменной. На основании результатов, описанных в *Разделе 3.2* оценивалась чувствительность прогностических полей к следующим параметрам модели SLAB: альbedo поверхности (A), влагосодержание приповерхностного слоя (M), шероховатость (Z_0), тепловая инерция (C) и излучательная способность поверхности (E). По данным MODIS IGBP типу подстилающей поверхности «город» в численной модели по умолчанию соответствуют значения $A = 0,15$, $M = 0,1$, $Z_0 = 0,5$, $C = 3,0$, $E = 0,88$. Выборка значений параметров урбанизированной поверхности была сформирована с использованием метода создания индивидуально рандомизированной пофакторной выборки Морриса. Пределы изменения параметров урбанизированной поверхности A (0,01–1,0), M (0,02–1,0), Z_0 (0,05–3.) и E (0,5–1,0) выбраны основываясь на работе [Wang et al., 2011], параметра C (1,0–7,0) – на работах [Lam et al., 2006; Wang et al., 2011].

Основываясь на современных исследованиях с применением полного АЧ методом Морриса, количество p -уровней было выбрано равным 4. Таким образом, каждый из параметров урбанизированной поверхности в выборке был варьирован в пределах $\{0, 1/3, 2/3, 1\}$. Число траекторий r было задано равным 10, а количество экспериментов (согласно формуле $r \times (p + 1)$) равным 60 для каждого из 4 выбранных случаев ГОТ в 2015 г. Заблаговременность каждого индивидуального расчета WRF-ARW была равна 16 часам от начального состояния, за которое были приняты поля модели GFS в срок 12:00 ВСВ (15:00 МСК). Итоговое количество индивидуальных расчетов численной модели составило **240 запусков**.

Анализ чувствительности по методу Морриса. Результаты 240 запусков модели WRF-ARW с различными параметрами подстилающей поверхности были обработаны, чтобы получить качественные показатели влияния изменения параметров подстилающей поверхности на приземную температуру (T2), скорость приземного ветра (W10), относительную влажность (RH2) и высоту пограничного слоя (PBL). Данные расчетов были разделены на дневные и ночные: расчеты с заблаговременностью 1–7 часов (16:00–22:00 МСК) отнесены к дневным, 8–16 часов (23:00–06:00 МСК) – к ночным. Вместо осредненных значений ночной приземной температуры были выбраны минимальные значения ночных температур, которые часто используются для анализа интенсивности ГОТ [Stewart, 2011].

Влияние элементарного эффекта d_i на прогностические поля численной модели, рассчитывалось по следующей формуле:

$$СКО = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (f_{ind}^{ijn} - f_{def}^{ijn})^2}{N * I * J}} . \quad (3.8)$$

Здесь, СКО – среднеквадратическое отклонение в 10-и километровой окрестности центра Санкт-Петербурга; f_{ind} – значение метеоэлемента по данным индивидуального эксперимента; f_{def} – значение метеоэлемента по данным эксперимента с параметрами поверхности, заданными по умолчанию; N – количество случаев ГОТ, I * J – количество пространственных точек расчётной сетки (11*11).

Поскольку метод Морриса предназначен только для качественной оценки чувствительности, результаты (*Рисунок 3.4*) были условно разделены на 3 группы по следующему признаку: оба показателя чувствительности для выбранного параметра имели высокие, средние или низкие значения в сравнении со значениями μ^* и σ для других параметров. Согласно этой классификации, днем в среднем на все выбранные метеоэлементы доминирующим оказалось влияние альбедо, уступив это место лишь параметрам шероховатости и влагосодержания приповерхностного слоя для W10 и RH2 соответственно. Днем в среднем все метеоэлементы были наименее чувствительны к изменению излучательной способности; низкой была чувствительность W10, RH2 и PBL к изменению значений тепловой инерции. Ночью в отсутствие солнечного сияния альбедо перестаёт быть определяющим параметром. Выбранные метеоэлементы становятся наиболее чувствительны к изменению параметра шероховатости, за исключением T2, наиболее чувствительного к изменению тепловой инерции. Ночью к наименее влиятельным можно отнести группу параметров – это влагосодержание, излучательная способность и альбедо для W10, RH2 и PBL, а также влагосодержание для T2.

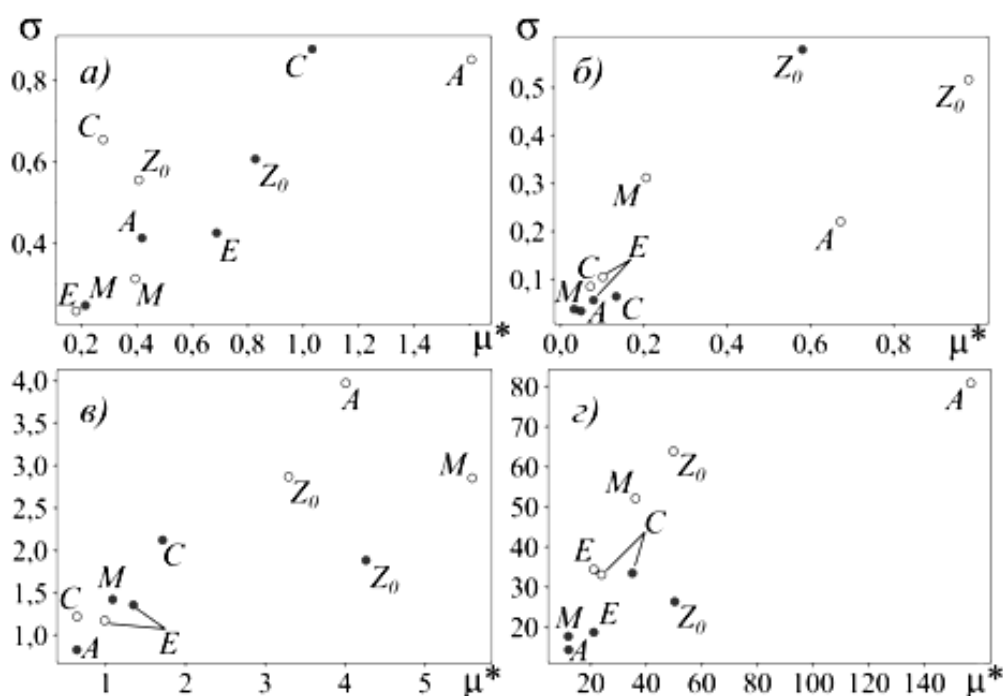


Рисунок 3.4 – Чувствительность приземных а) температуры, б) скорости ветра, в) относительной влажности и г) высоты пограничного слоя к изменению параметров подстилающей поверхности по методу Морриса. Маркеры белого цвета обозначают результаты за дневные часы, серого – за ночные.

Анализируя результаты за ночь, сложно отнести к группе наиболее или наименее влиятельных параметры тепловой инерции (для RH2 и PBL) и параметры излучательной способности, шероховатости и альбедо (для T2). Днем пограничные значения показателей чувствительности имеют параметры шероховатости (для T2, RH2 и PBL), влагосодержания (для T2, W10 и PBL) и тепловой инерции (для T2). Применение метода Соболя поможет в том числе количественно определить насколько влиятельны параметры, которые на данном этапе имеют пограничные значения показателей μ^* и σ [Ладохина и др., 2025].

Анализ чувствительности по методу Соболя. Результаты численных экспериментов, полученные на этапе расчета чувствительности по методу Морриса, были использованы в качестве обучающей выборки для генерации результатов запуска модели WRF-ARW с помощью суррогатной модели. Набор значений параметров подстилающей поверхности был сгенерирован с использованием схемы Сальтелли второго порядка [Saltelli, 2002] $N_S * (2N + 2)$, где N_S – степень числа 2, характеризующая число выборок. В этой работе значение числа выборок $N_S=256$, так как согласно [Сальтелли, Соболев, 1995; Vaki et al., 2021], АЧ методом Соболя обеспечивал точные результаты при $N_S > 200$. Таким образом, для получения точного выходного решения потребовалось бы провести **3072 запусков** численной модели.

В отличие от прогностических численных моделей, суррогатные модели гораздо дешевле запускать, однако необходимо, чтобы такая модель адекватно описывала воссоздаваемое решение. Мерой точности описания процесса суррогатной моделью выбрана величина коэффициента

детерминации R^2 при перекрёстной проверке. R^2 показывает долю дисперсии выходного решения (в данном случае СКО), которую объясняет суррогатная модель. 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 $\geq 80\%$ (**Рисунок 3.5**). Эти модели можно признать достаточно хорошими для проведения АЧ методом Соболя, лучших результатов удалось бы достичь при большей длине обучающих выборок [Ладохина и др., 2025].

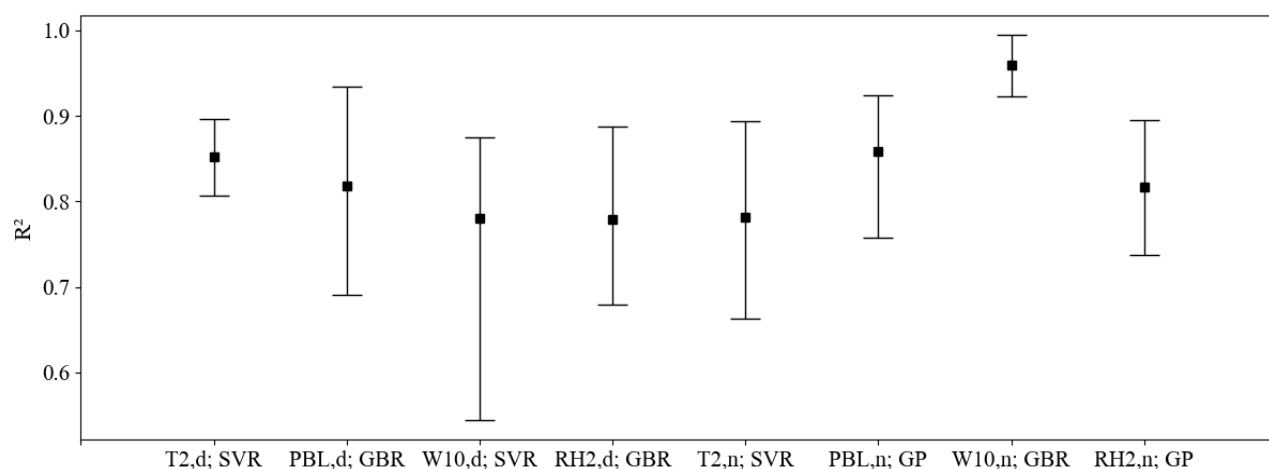


Рисунок 3.5 – Результаты перекрёстной проверки суррогатных моделей с наилучшими коэффициентами детерминации; буквой d обозначаются результаты расчета R^2 метеоэлемента в дневные часы, буквой n – в ночные.

Анализируя результаты расчетов индексов Соболя (**Рисунок 3.6**), видно, что для ряда выбранных метеоэлементов хорошо выделяется 1 наиболее влиятельный 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. На то, что тепловая инерция является наиболее влиятельным параметром для PBL, а шероховатость – для T2 в ночные часы, указывают значения индексов ST, сравнимые со значениями S1 для наиболее влиятельных параметров на этих графиках. Дополнительные расчеты индекса S2 показали, что доля совместного влияния шероховатости и тепловой инерции на T2 и PBL ночью составила 0,17 и 0,21 соответственно. 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 влиятельными – даже суммарная доля отдельного и совместных влияний параметра на метеорологическую величину (индекс ST) не превосходит 0,2 [Ладохина и др., 2025].

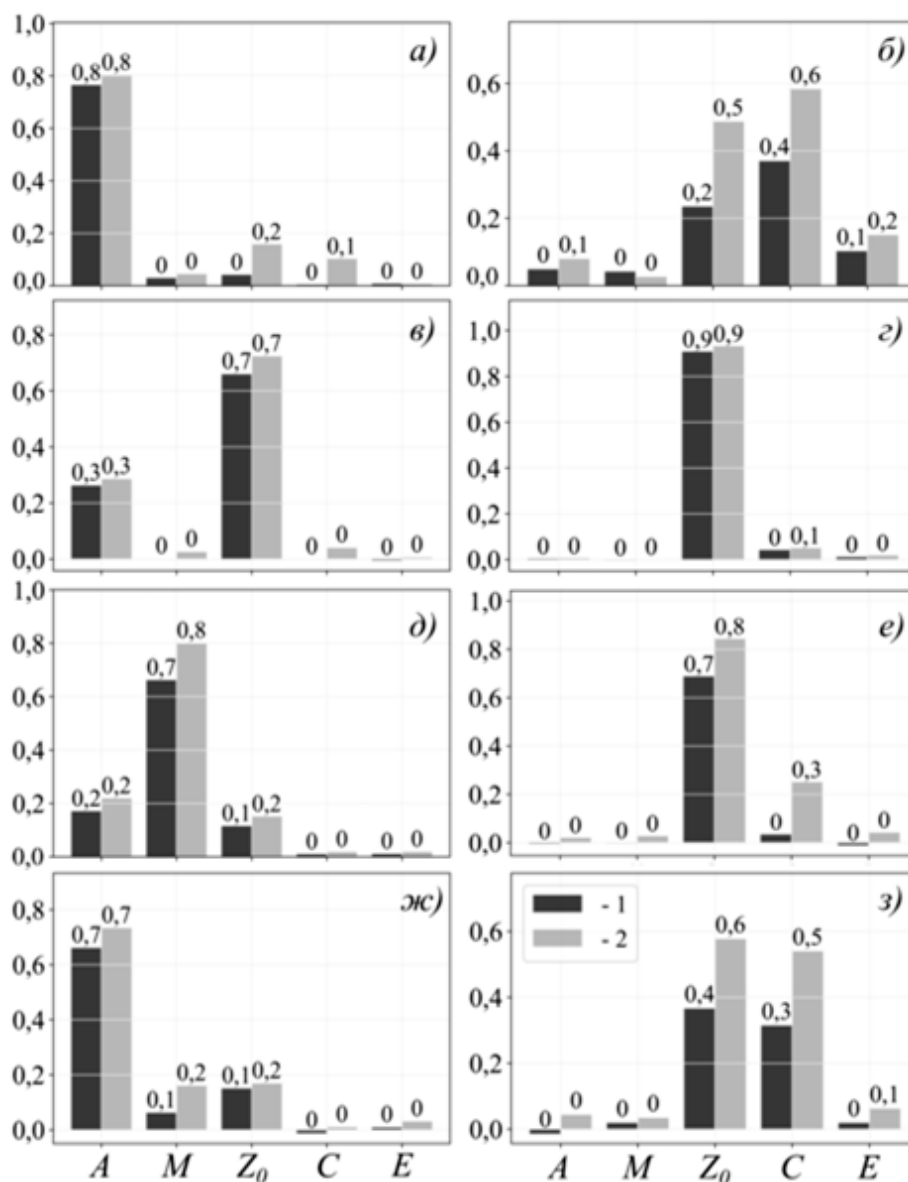


Рисунок 3.6 – Чувствительность приземных а) температуры, б) скорости ветра, в) относительной влажности и г) высоты пограничного слоя к изменению параметров подстилающей поверхности по методу Соболя. Рисунки слева относятся к результатам за дневные часы, справа – за ночные.

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 $S1$) [Ладохина и др., 2025].

Выводы к главе 3

Основываясь на современных исследованиях была разработана методика анализа чувствительности прогностических полей модели WRF-ARW к изменению параметров подстилающей поверхности, характеризующих урбанизированные районы Санкт-Петербурга в модели деятельного слоя суши SLAB. Качественный АЧ, выполненный методом Морриса, показал адекватные результаты, согласующиеся с результатами локального анализа

чувствительности: на процессы тепло- и влагообмена в городском подслое наибольшее влияние оказывало изменение альбедо и влагосодержания почвы днем и изменение параметров шероховатости и тепловой инерции ночью.

Необходимое количество результатов численных экспериментов для проведения количественного АЧ методом Соболя получено с помощью суррогатных моделей. Итоги анализа показателей чувствительности Соболя не противоречили результатам качественного АЧ.

Установлено, что:

- днем на метеорологические поля в большей степени влияло изменение альбедо поверхности (и влагосодержание – только на относительную влажность), тогда как ночью доминирующим оказалось влияние параметров шероховатости и тепловой инерции;
- изменение излучательной способности внесло наименьший вклад в изменение приземных прогностических метеоэлементов;
- при определении параметров шероховатости и тепловой инерции следует учитывать высокую долю их совместного влияния на прогностические метеоэлементы в ночные часы.

Согласно полученным результатам, можно констатировать, что даты наблюдения ГОТ высокой интенсивности подходят для проведения АЧ прогностических полей к изменению параметров подстилающей поверхности по данным численных экспериментов. Расчеты модели WRF-ARW, полученные на этапе оценки АЧ по методу Морриса пригодны для создания суррогатных моделей с целью расчета индексов полной чувствительности Соболя. Это подтверждено результатами перекрестной проверки (удалось достичь средних значений коэффициентов детерминации $\geq 80\%$). Если требуется большая точность описания процесса суррогатной моделью, возможно проведение большего числа численных экспериментов с наборами значений параметров подстилающей поверхности, сформированными по методу создания пофакторной рандомизированной выборки Морриса, например, с 8-ю р-уровнями и 20-ю траекториями [Ji et al., 2018].

Глава 4. Численное моделирование 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 °С, что на 5,8 °С выше климатической нормы. Январь характеризовался значительным превышением температурного фона над климатическими показателями: в первой и третьей декадах месяца на 3..7 °С, а в отдельные дни третьей декады на 10..11 °С. Среднемесячная температура воздуха в Санкт-Петербурге за этот месяц составила –4,6 °С, что на 3,2 °С выше климатической нормы. Температурный фон в марте 2021 года был преимущественно близок к климатической норме с незначительным превышением (среднемесячная температура воздуха составила –0,8 °С, что на 1,4 °С выше климатической нормы). Формирование погодных условий в первой декаде октября 2021 года происходило преимущественно под влиянием антициклонической циркуляции, что обусловило повышенную продолжительность солнечного сияния: 85,7 часов (130 % от климатической нормы). По данным ИЦП Санкт-Петербурга, среднемесячная температура воздуха составила 8 °С, что на 2,3 °С выше климатической нормы. Режим осадков в исследуемые месяцы существенно различался. Наибольший дефицит увлажнения наблюдался в июне, когда месячная сумма осадков составила лишь 22,1 мм (38 % от нормы). Недостаточное количество осадков отмечалось также в январе (75 % от климатической нормы). Март характеризовался избыточным увлажнением (47,7 мм: 36 % от нормы). В октябре количество осадков было близко к норме и составило 71,8 мм.

Набор данных наблюдений для верификации результатов моделирования был дополнен измерениями с трех станций автоматической сети, принадлежащей ФКП «Дирекция КЗС г. Санкт-Петербург Минстроя России», а также данными дистанционного зондирования Земли (температура подстилающей поверхности).

Раздел 4.1. Проявление эффектов влияния городской застройки на поля приземной температуры, влажности и скорости ветра по данным стационарных наблюдений

4.1.1. Оценка репрезентативности данных автоматических метеорологических станций

Автоматические метеостанции С1, В1 и В6, принадлежащие сети ФКП «Дирекция КЗС г. Санкт-Петербург Минстроя России» расположены к западу от мегаполиса на створах дамбы, защищающей город от наводнений (расположение станций приведено на рисунке 4.1.2). Технические характеристики измерительного оборудования АМС приведены в **таблице 4.1**. Все датчики производства компании Vaisala, высота их установки соответствует требованиям Наставления [Наставление., 1985]. Измерения были предоставлены с 1-минутным временным

разрешением.

Таблица 4.1 – Характеристики датчиков автоматических метеостанций КЗС

Параметр	Датчик	Диапазон	Погрешность
Температура воздуха	QMН102	-40...+60 °С	±0,3 °С
Относительная влажность	QMН102	0–100 %	±2 % (0–90 %), ±3 % (90–100 %)
Атмосферное давление	PMT16A	600–1100 гПа	±0,3 гПа

Анализ качества данных АМС за 2021 г, предоставленных с 1-минутным интервалом, с целью оценки их пригодности для исследования аномалий городского метеорологического режима проведён посредством сопоставления данных АМС с измерениями, полученными на станциях сети Росгидромета – Кронштадт и Ломоносов. В качестве **показателей репрезентативности** использованы среднее отклонение (СО), среднее абсолютное отклонение (САО) среднеквадратическое отклонение (СКО) и коэффициент корреляции Пирсона III типа. Ближайшей к АМС станцией сети является Кронштадт. Температура и давление на уровне моря на АМС С1, В1, В6 коррелирует с температурой и давлением в Кронштадте на уровне 0.99. Относительная влажность коррелирует хуже: 0,85 на С1 и В1, и 0,83 на В6.

Пара Ломоносов–Кронштадт отражает естественную пространственную изменчивость метеорологических параметров, обусловленную как мезомасштабными атмосферными процессами, так и микроклиматическими особенностями местности. Сравнительный анализ позволяет разграничить систематические смещения, характерные для оборудования АМС, и случайные флуктуации, присущие любым метеорологическим измерениям (*Рисунок 4.1.1*). Если значения **показателей репрезентативности** для пар АМС–Кронштадт существенно превышают соответствующие показатели пары Ломоносов–Кронштадт, это с высокой вероятностью указывает на наличие инструментальных погрешностей или калибровочных отклонений на автоматических станциях. Напротив, сопоставимые значения метрик свидетельствуют о том, что расхождения находятся в пределах естественной изменчивости.

Значения среднего отклонения температуры для пары АМС–Кронштадт варьируются от 0,07 (В1) до 0,19 °С (С1), среднее абсолютное отклонение составляет от 1,1 до 1,2 °С, а СКО – от 1,5 до 1,6 °С. При этом значения показателей для пары Ломоносов–Кронштадт составляют: СО = 0,6 °С, САО = 0,7 °С, СКО = 1,0 °С. Таким образом, изменчивость временного хода температуры на АМС находится в пределах естественной пространственной изменчивости региона.

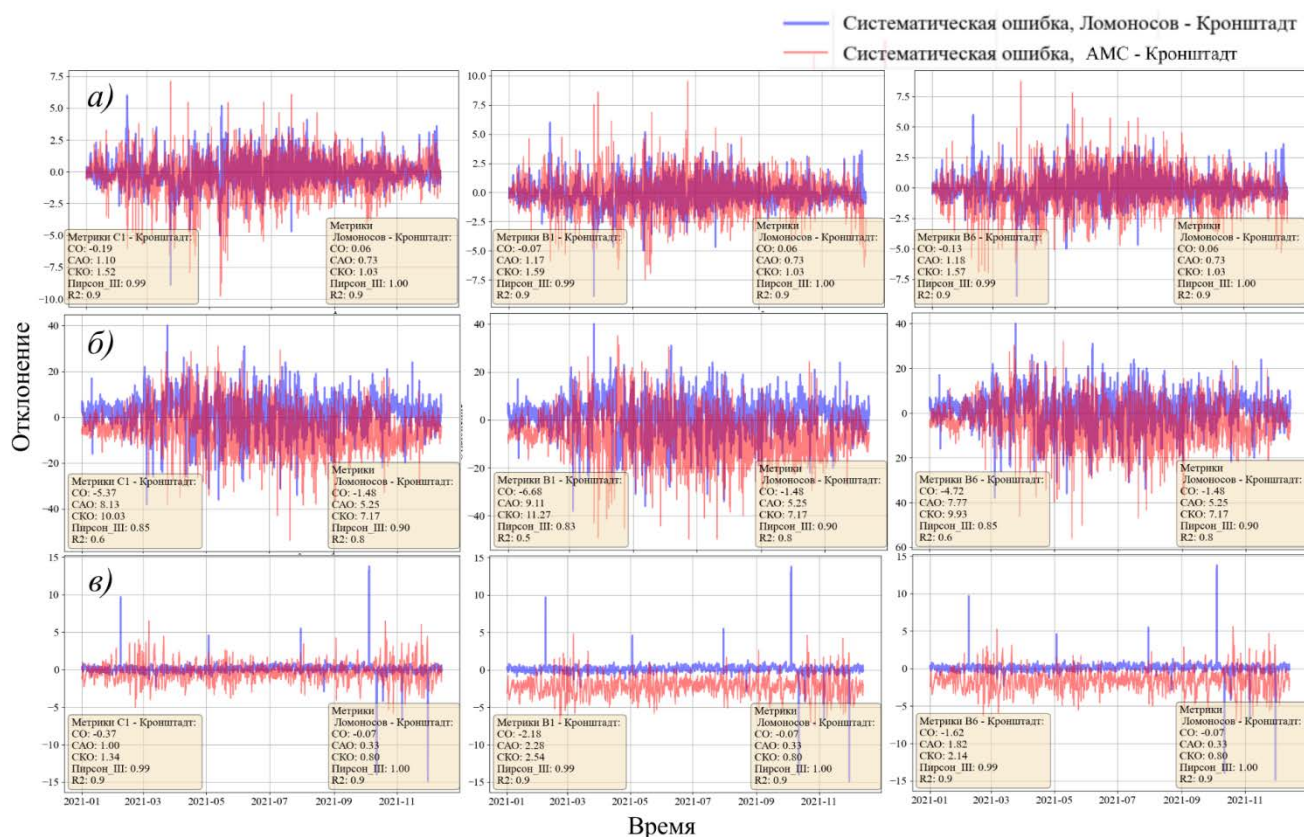


Рисунок 4.1.1 – Сравнительный анализ показателей репрезентативности данных АМС С1 (левая колонка), В1 (центральная колонка), В6 (правая колонка); а) приземной температуры, б) относительной влажности, в) давления на уровне моря

Разброс значений относительной влажности между АМС и Кронштадтом сопоставим с разбросом между Ломоносовым и Кронштадтом. Среднее абсолютное отклонение у пар АМС–Кронштадт варьируется от 8 % до 9 %, а у пары Ломоносов–Кронштадт составляет около 5 %. Однако среднее отклонение у пар АМС–Кронштадт находится на уровне 4–7 %, что существенно превышает СО между Ломоносовым и Кронштадтом, равное –1,5 %. Наибольшая неоднородность в показателях репрезентативности пар АМС–Кронштадт наблюдается в данных о давлении на уровне моря. Значения СО варьируются от 0,4 (С1) до 2,2 гПа (В1), CAO – от 1,0 до 2,3 гПа, а SKO – от 1,3 до 2,5 гПа. По сравнению с парой Ломоносов–Кронштадт (СО = 0,1 гПа, CAO = 0,3 гПа, SKO = 0,8 гПа), смещение и разброс данных с АМС значительно превышают естественную изменчивость параметра.

Таким образом, сравнительный анализ показателей репрезентативности свидетельствует о том, что 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.

4.1.2. Городской остров тепла по данным стационарных наблюдений

Чтобы оценить интенсивность ГОТ в исследуемые месяцы были собраны данные наблюдений со станций сети Росгидромета (ИЦП Санкт-Петербурга, аэропорт Пулково, Воейково, Шлиссельбург, Ломоносов, Кронштадт), а также данные о температуре на трех АМС, принадлежащих Дирекции КЗС. Из анализа отклонений температуры воздуха на метеорологических станциях относительно ИЦП по данным наблюдений за январь, март, июнь и октябрь следует, что во все исследуемые месяцы температура на ИЦП в среднем выше, чем на соседних станциях (*Рисунок 4.1.2*). Полученные результаты свидетельствуют о выраженном эффекте городского острова тепла в центральной части Санкт-Петербурга на протяжении всего года.

Устойчивой закономерностью является существенное различие в термическом режиме между прибрежными станциями к западу от мегаполиса и континентальными к востоку от него. Как в холодный, так и в тёплый периоды года средние отклонения температуры от исторического центра на станциях Ломоносов и Кронштадт меньше (от $-0,1$ до $-0,9$ °С), чем на станциях Воейково и Шлиссельбург (от $-0,9$ до $-1,7$ °С). При этом в **марте** по сравнению с **январем** наблюдается существенное возрастание изменчивости температурных различий на автоматических метеостанциях к западу от Санкт-Петербурга: СКО увеличивается до 2 °С (при $1,0-1,3$ °С в январе), а диапазон экстремальных отклонений расширяется до 12,9 °С (С1: от $-9,6$ до $3,3$ °С). В **июне** происходит увеличение абсолютной величины средних отклонений на всех станциях без исключения. На станциях Ломоносов и Кронштадт увеличиваются средние отклонения в сравнении с холодным периодом, до $-0,8$ °С и $-0,9$ °С. На станциях Воейково и Шлиссельбург значения средних отклонений достигают максимума ($-1,4$ °С и $-1,5$ °С). На АМС СКО возрастает до $2,7..2,9$ °С, а диапазон экстремальных отклонений достигает максимума: 13,6 °С на станции В1 (от $-6,7$ до $6,9$ °С). Таким образом, в рассматриваемые месяцы 2021 г. временная динамика острова тепла характеризуется его минимальной изменчивостью в холодный период (октябрь, январь) и максимальной в тёплый (июнь).

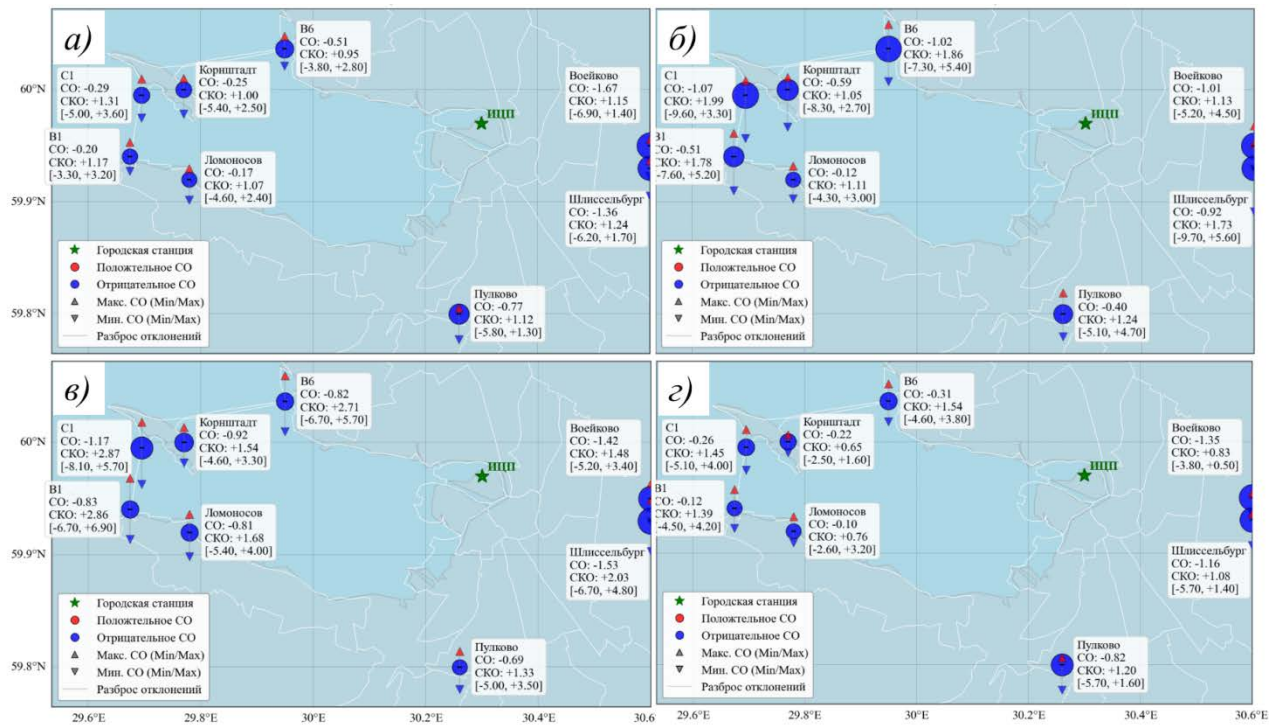


Рисунок 4.1.2 – Среднее отклонение приземной температуры на станции ИЦП от температуры на окрестных станциях за а) январь, б) март, в) июнь, г) октябрь 2021 г.

4.1.3. Остров сухости в Санкт-Петербурге по данным наземных наблюдений за относительной влажностью

Анализ отклонений относительной влажности на прибрежных и континентальных метеорологических станциях относительно ИЦП по данным наблюдений за январь, июнь и октябрь свидетельствуют о выраженном эффекте снижения относительной влажности в центральной части Санкт-Петербурга по сравнению с загородными территориями (**Рисунок 4.1.3**). Только на станции Пулково режим влажности во все месяцы наиболее близок к условиям на ИЦП с минимальными средними отклонениями (до 1 %). Сезонная динамика характеризуется существенными различиями в величине пространственных контрастов влажности. В январе максимальный контраст относительной влажности с историческим центром Санкт-Петербурга наблюдается на станции Воейково (8,5 %), тогда как на остальных станциях различия минимальны (до 3 %) по сравнению с другими анализируемыми месяцами. В октябре по сравнению с январем контрасты на загородных станциях относительно ИЦП более выражены, максимальное СО по-прежнему фиксируется на станции Воейково (9 %). В июне по сравнению с другими месяцами среднее отклонение от городской станции резко возрастает на станциях Ломоносов, Кронштадт, Шлиссельбург, достигая 8 %, одновременно существенно (в 2–3,5 раза) возрастает SKO.

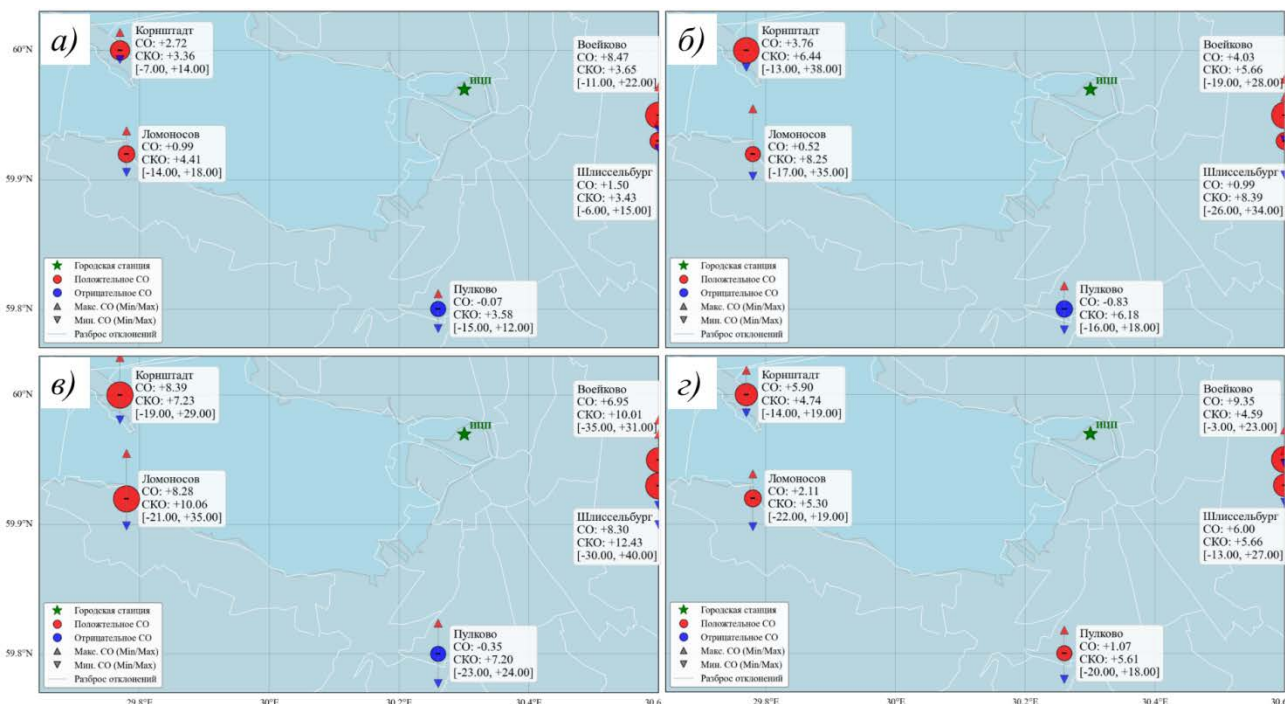


Рисунок 4.1.3 – Среднее отклонение приземной относительной влажности на станции ИЦП от температуры на окрестных станциях за а) январь, б) март, в) июнь, г) октябрь 2021 г.

4.1.4. Отрицательная пространственная аномалия скорости ветра в Санкт-Петербурге по данным наземных наблюдений

Скорость ветра в городе ниже, чем в его менее урбанизированных окрестностях, прежде всего потому, что плотная городская застройка мегаполиса оказывает тормозящее влияние на ветровые потоки. Существенную роль играет также термический фактор: в городе теплее, чем в окрестностях, что делает атмосферу над городом более неустойчивой по сравнению с сельской местностью. Тем не менее, анализ отклонений скорости приземного ветра на метеорологических станциях относительно ИЦП по данным наблюдений за январь, март, июнь и октябрь выявил значительную пространственную неоднородность (**Рисунок 4.1.4**). Выраженный эффект снижения скорости ветра в центральной части Санкт-Петербурга на протяжении всего года обнаруживается только по сравнению со станцией Пулково. Среднее ослабление ветра на ИЦП относительно этой станции находится в пределах 1,6..2,5 м/с в зависимости от сезона. Контраст между Пулково и центром города минимален в октябре и максимален в марте. Устойчивой закономерностью является минимальная изменчивость ветрового режима на станциях Воейково и Шлиссельбург во все сезоны (диапазон экстремальных отклонений от 4 до 6 м/с), что может быть связано с их защищённым континентальным положением. Относительно ИЦП среднее отклонение скорости ветра на станции Воейково слабopоложительное во все исследуемые месяцы (от 0,1 до 0,9 м/с), а в Шлиссельбурге – слабоотрицательное (от -0,5 до -0,3 м/с). Сезонная изменчивость отклонений скорости ветра относительно центра города наблюдается на прибрежных станциях. Наибольшие

колебания среднего отклонения в Кронштадте: от $-0,2$ м/с в марте до 2 м/с в октябре. Станция Ломоносов характеризуется переходом от положительных отклонений зимой и весной ($0,9$ м/с в январе и $0,5$ м/с в марте) к близким к нулю или отрицательным значениям летом и осенью ($0,3$ м/с в июне и $-0,3$ м/с в октябре).

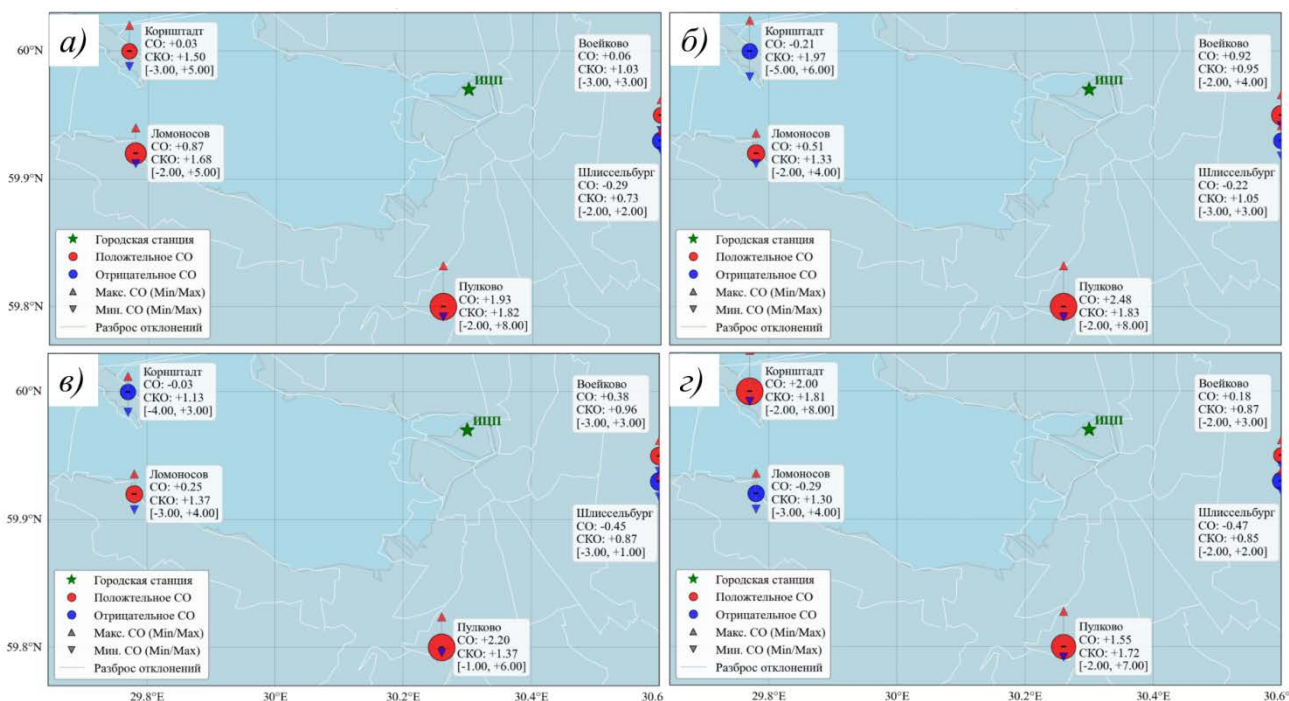


Рисунок 4.1.4 – Среднее отклонение приземной скорости ветра на станции ИЦП от температуры на окрестных станциях за а) январь, б) март, в) июнь, г) октябрь 2021 г.

Таким образом, для верификации модельных расчётов аномалий городского метеорологического режима в качестве репрезентативной городской станции принята ИЦП, несмотря на то, что некоторые из них, например, Пулковое, расположены в непосредственной близости от города. Проведённый анализ показал, что на всех остальных станциях сети в большинстве случаев средняя температура воздуха ниже, относительная влажность выше, а скорость ветра больше, чем на ИЦП.

Раздел 4.2. Моделирование с использованием простой параметризации урбанизированной поверхности

4.2.1. Методика уточнения параметров урбанизированной поверхности

В предыдущей главе при использовании методов полного анализа чувствительности для оценки влияния набора параметров на прогностические поля численной модели использовалась формула SKO. Отсюда следует, что реализованный метод полного анализа чувствительности может быть использован для определения параметров урбанизированной поверхности Санкт-Петербурга в модели деятельного слоя суши SLAB.

Для определения набора уточненных параметров, рассчитывалось СКО данных прогноза от данных наблюдений на станциях ИЦП, аэропорт Пулково, Белогорка по данным индивидуальных расчетов численной модели, выполненных ранее для проведения полного анализа чувствительности. Полученные значения СКО были использованы для построения суррогатных моделей тех типов, которые имели наилучшие коэффициенты детерминации по результатам проведенного в разделе 3.3 анализа.

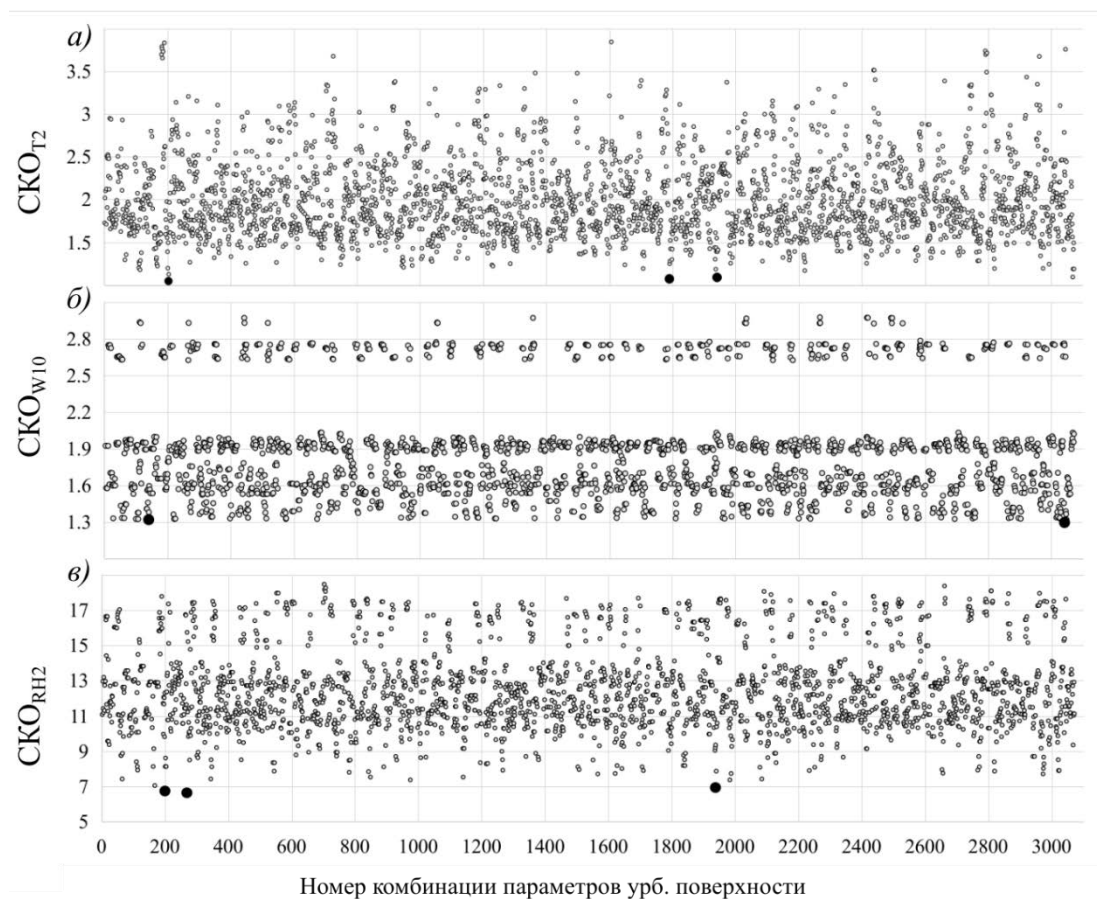


Рисунок 4.2.1 – СКО а) приземной температуры, б) скорости приземного ветра, в) приземной относительной влажности для точки станции ИЦП при различных комбинациях значений параметров урбанизированной поверхности. Маркерами сплошного черного цвета обозначены эксперименты с наименьшими значениями СКО для данного метеоэлемента

Анализ осредненных по времени результатов расчета СКО для точки станции ИЦП приведенный на **Рисунке 4.2.1** позволяет получить представление о вариации ошибки прогноза при выборе различных комбинаций значений параметров урбанизированной поверхности. СКО приземной температуры изменялось в пределах 1..4 °С, скорости приземного ветра – в пределах 1,3..3 м/с, приземной относительной влажности – в пределах 7..19 %. Наименьшим значениям СКО_{T2} (порядка 1°С) соответствуют эксперименты с низким или критически низким альбедо (0,04..0,18) и влагосодержанием почвы (0,08..0,21), высокими шероховатостью (1,7..2,3) и теплоемкостью (6,3..6,6), а также низкой излучательной способностью (0,52..0,56) поверхности.

Минимальные различия между спрогнозированной и наблюдаемой скоростью ветра (порядка 1,36 м/с) получились в экспериментах с высокой шероховатостью (2,8..2,9). Пределы вариации параметров урбанизированной поверхности в экспериментах с наименьшей SKO_{RH2} частично соответствует их вариации в экспериментах, где достигались минимальные значения SKO_{T2} : 0,04..0,14 для альбедо, 0,08..0,14 для влагосодержания, 1,8..2,3 для шероховатости, 3,4..6,4 для теплоемкости, 0,53..0,56 для излучательной способности урбанизированной поверхности.

В ходе подробного анализа результатов суррогатных моделей для случаев интенсивного развития городского острова тепла были выделены две комбинации параметров урбанизированной поверхности. Эти комбинации характеризуются минимальными значениями SKO анализируемых метеоэлементов и согласуются с типичными параметрами урбанизированной поверхности для различных городов, описанными в разделе 1.3.

Комбинация параметров №203 (*Таблица 4.2*) демонстрирует наилучшие показатели SKO приземной температуры. Однако значение альбедо в этой комбинации меньше типичных его величин для городской среды (*Таблица 1.3*), даже с учетом его уменьшения вследствие многократного переотражения солнечной радиации между стенами зданий и последующего поглощения переотраженной части. Комбинация параметров №271 представляется более реалистичной, при этом значения SKO метеоэлементов лишь незначительно отличаются от результатов эксперимента с набором №203. Хотя комбинация №271 лучше соответствует физическим характеристикам городской среды, целесообразно провести расширенную серию численных экспериментов с использованием набора параметров №203, чтобы исследовать влияние экстремальных значений параметров урбанизированной поверхности на результаты численного моделирования.

Таблица 4.2 – Значения уточненных параметров урбанизированной поверхности и SKO , полученные при расчете суррогатных моделей

№ комбинации	A	M	Z ₀	C	E	SKO_{T2}	SKO_{W10}	SKO_{RH2}
203	0.041	0.080	2.330	6.359	0.559	1,05	1,82	6,78
271	0.133	0.146	2,731	5,916	0.562	1,27	1,76	6,68
Исходная	0,15	0,10	0.5	3	0,88	1,73	1,58	11,19

Конфигурация модели соответствовала описанной в разделе 3.2, а параметры урбанизированной поверхности были заданы согласно комбинации №203. Анализировалось воспроизведение основных эффектов влияния Санкт-Петербурга на приземные метеорологические поля: городского острова тепла, городского острова сухости в поле относительной влажности и пространственной аномалии скорости ветра (*Рисунок 4.2.2*). На рисунке 4.2.2 представлены осредненные за месяц поля метеорологических величин для сроков

их максимального проявления. Результаты получены путем осреднения прогнозов за каждый срок в течение месяца.

В июне наиболее интенсивная положительная аномалия приземной температуры над городом наблюдалась в полночь по местному времени, достигая значения $\Delta T_{\text{город-фон}} \approx 2^\circ\text{C}$. Ослабление скорости приземного ветра в городе наиболее выражено в 03:00 МСК, где $\Delta W_{10\text{город-фон}}$ составляет около -1 м/с. Городской остров сухости в поле относительной влажности достигает максимального развития в 21:00 МСК ($\Delta RH_{2\text{город-фон}} \approx 10\%$) и постепенно ослабевает в течение ночи.

В марте городской остров тепла выражен слабее: аномалия не превысила 1°C . Данный эффект наиболее отчётливо проявляется в утренние часы с 06:00 до 09:00 МСК со смещением от центральных районов к юго-западным районам города, а также в вечернее время в 18:00 МСК. Ослабление скорости ветра хорошо выражено во все сроки, однако наиболее заметна и локализована эта аномалия в 12:00 МСК. Остров сухости прослеживается только в 18:00 и 21:00 МСК, при этом его интенсивность не превышает 5%. В октябре наблюдается схожая ситуация. Максимум городского острова тепла составляет 1°C , аномалия скорости ветра достигает -2 м/с, остров сухости не превышает 5%. Характерной особенностью октября является то, что все перечисленные эффекты достигают наибольшей интенсивности в один и тот же срок, а именно в 15:00 МСК.

В январе эффекты влияния городской застройки на метеорологические величины выражены значительно слабее. Городской остров тепла интенсивностью около 1°C прослеживается в 06:00 МСК. Аномалия скорости ветра величиной -1 м/с над центральными районами города фиксируется в 12:00 и 15:00 МСК. Остров сухости интенсивностью не более 5% отмечается в 09:00, 18:00 и 00:00 МСК. Ослабление интенсивности аномалий метеорологических условий в Санкт-Петербурге в зимний период является ожидаемым результатом, поскольку основной вклад в формирование аномалий городского метеорологического режима в это время года должен вносить антропогенный поток тепла, который не предусмотрен в данной конфигурации модели. При этом влияние параметров подстилающей поверхности существенно снижается вследствие короткого светового дня и наличия снежного покрова, что оставляет возможность воспроизвести аномалии только за счёт увеличенного параметра шероховатости.

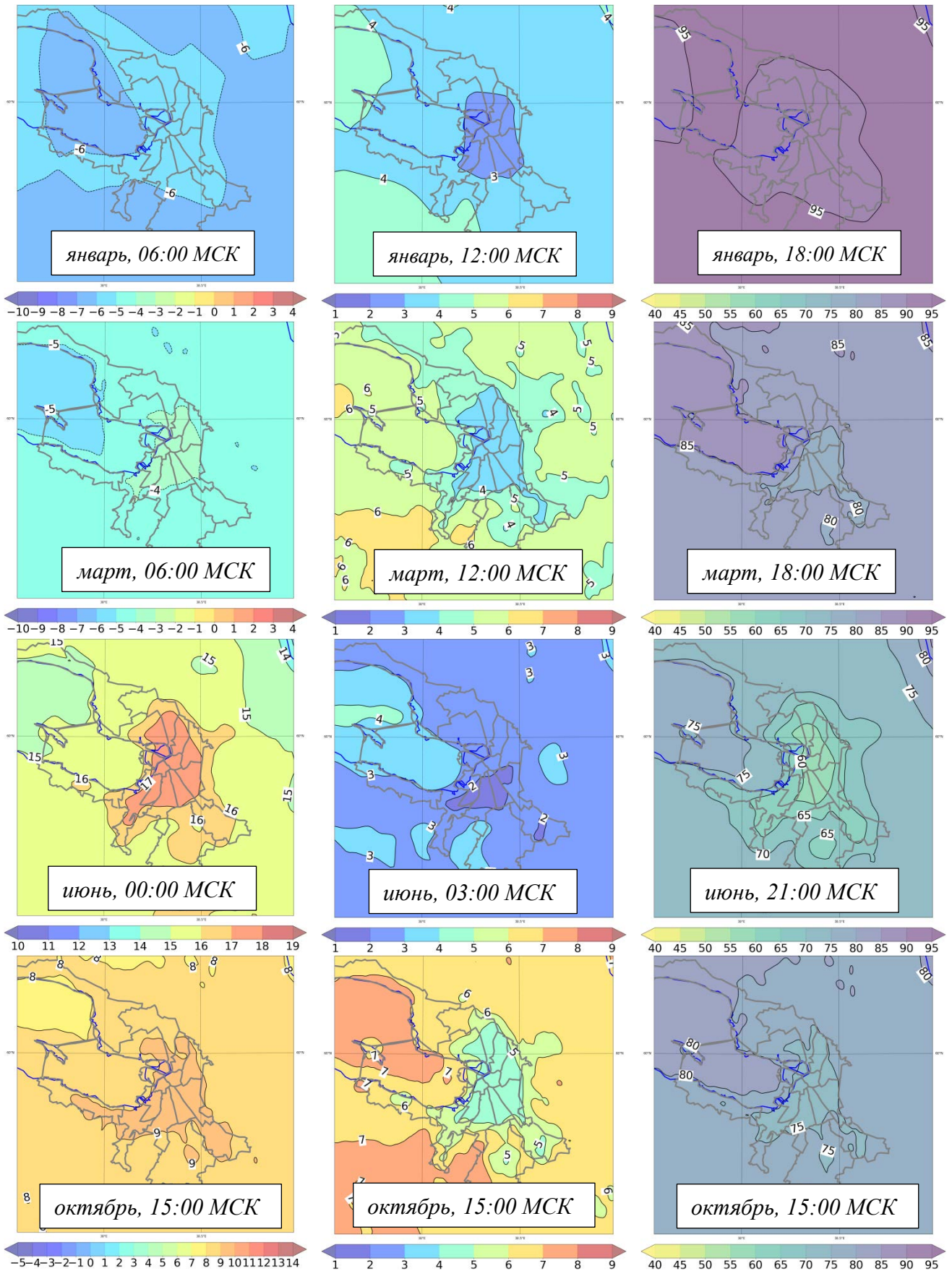


Рисунок 4.2.2 – Осредненные за месяц поля температуры воздуха на 2 м ($^{\circ}\text{C}$, левая колонка), скорости ветра на 10 м (м/с, центральная колонка) и относительной влажности на 2 м ($\%$, правая колонка) по данным модели WRF-ARW (домен 1 км). Сроки прогнозов, использованные для осреднения, указаны на каждой панели и выбраны соответствующими максимальному проявлению аномалий метеорологических величин в каждый месяц

4.2.2. Верификация результатов моделирования по данным наземных наблюдений

Согласно выводам раздела 4.1.1, данные о температуре с автоматических метеорологических станций являются репрезентативными и могут быть использованы для верификации воздействия городской застройки Санкт-Петербурга на приземные метеорологические поля. Верификация результатов моделирования ГОТ выполнялась по 9 станциям; острова сухости в поле относительной влажности и отрицательной аномалии скорости ветра – по 6 станциям.

Перед применением метода разностей для оценки адекватности воспроизведения эффектов влияния застройки мегаполиса на метеорологические поля были проанализированы систематические ошибки модели в полях приземной температуры, влажности и скорости ветра для каждой станции. Во все исследуемые месяцы модель демонстрировала устойчивую тенденцию к занижению температуры воздуха и завышению относительной влажности по сравнению с фактическими значениями. Скорость ветра оказалась завышенной на большинстве станций, за исключением Пулково.

Среднее отклонение прогноза температуры от наблюдений оставалось отрицательным на протяжении всего исследуемого периода (*Рисунок 4.2.3–4.2.5*). В **январе** СО составило $-1,0...-1,5$ °С на городской станции ИЦП и станциях, расположенных к западу от города (Ломоносов, Кронштадт), а также на автоматических метеорологических станциях В1 и В6, при СКО 2,5 °С. На станциях к югу и востоку от города (Пулково, Шлиссельбург) среднее отклонение было близким к нулю, однако СКО сохранялось на уровне 2,5 °С. Примечательно, что на станции Воейково среднее отклонение приняло положительное значение (0,5 °С), а экстремальное значение составило 6 °С. В **марте** среднее отклонение температуры оставалось отрицательным для всех станций. Наибольшие по модулю значения (2 °С) были зафиксированы на прибрежных станциях Ломоносов и Кронштадт при СКО = 2,5 °С. Меньшие значения среднего отклонения (-1 °С) отмечены на станциях Воейково и Шлиссельбург при СКО = 2,0 °С. Станция Пулково характеризовалась минимальной систематической ошибкой ($-0,5$ °С), однако диапазон экстремальных ошибок оставался значительным. АМС демонстрировали повышенные значения СКО (2,5 °С), а также наибольшие экстремальные ошибки занижения температуры.

Июнь характеризовался выраженной пространственной неоднородностью ошибок прогноза температуры. На прибрежных станциях к западу от города (Ломоносов, Кронштадт), а также на автоматических станциях В1 и В6, среднее отклонение достигло $-5,5$ °С при СКО = 5,5..6 °С. На станциях ИЦП и Шлиссельбург среднее отклонение составило $-2,5$ °С при СКО = 3,0 °С, тогда как станции Пулково и Воейково характеризовались минимальными СО. Диапазон экстремальных ошибок на прибрежных станциях был полностью смещён в область отрицательных значений, тогда как на станциях Пулково, Воейково и Шлиссельбург отмечались единичные случаи завышения температуры. Ошибки прогноза температуры в **октябре**

отличались наибольшей пространственной однородностью среди всех рассматриваемых месяцев. Среднее отклонение на большинстве станций составило $-0,5$ °C при СКО = $1,5$ °C. Анализ экстремальных ошибок указывает на отсутствие выраженной асимметрии в распределении отклонений прогноза.

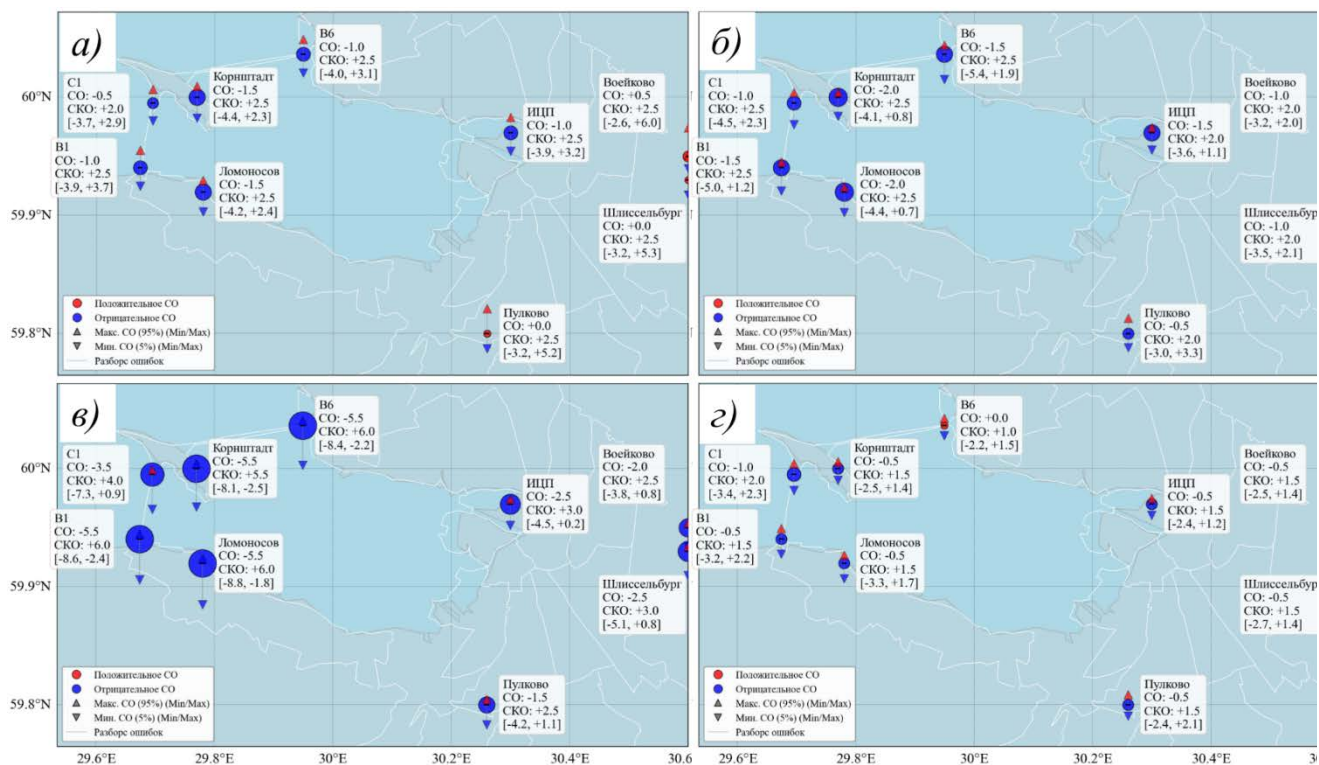


Рисунок 4.2.3 – Ошибки прогноза приземной температуры на станциях за а) январь, б) март, в) июнь, г) октябрь 2021 г.

Среднее отклонение прогноза относительной влажности оставалось положительным на протяжении всего исследуемого периода на большинстве станций (**Рисунок 4.2.4**). В **январе** ошибки прогноза относительной влажности оказались минимальными среди всех рассматриваемых месяцев: среднеквадратическое отклонение не превышало 8,5 % на всех станциях. Среднее отклонение варьировалось в пределах от 4 % до 6,5 %: наименьшие значения зафиксированы на станциях ИЦП и Пулково, наибольшее – в Ломоносове (6,5 %). Исключением стала станция *Воейково*, где среднее отклонение приняло отрицательное значение (-2 %) при СКО = 4 %. Ошибки прогноза относительной влажности в **марте** существенно возросли по сравнению с январём, однако сохранили пространственную *однородность*. СКО находилось в диапазоне от 15,5 % (Пулково, Воейково) до 19 % (Ломоносов). Среднее отклонение оставалось положительным на всех станциях и варьировалось от 9 % в Воейково до 14,5 % в Ломоносове. Максимальные положительные ошибки достигали 30..36 %. Станция Воейково вновь выделялась минимальными значениями систематической ошибки и наибольшим диапазоном отрицательных отклонений (до -7 %).

В июне ошибки прогноза относительной влажности достигли максимальных значений среди всех рассматриваемых месяцев. Среднеквадратическое отклонение изменялось от 14 % (Воейково) до 20,5 % (Ломоносов). Среднее отклонение существенно возросло на прибрежных станциях *Кронштадт* и *Ломоносов*, достигнув 17 % и 18,5 % соответственно. На остальных станциях среднее отклонение оставалось в пределах от 8,5 % (Воейково) до 11,5 % (Пулково). Максимальные положительные ошибки достигали 35 % на прибрежных станциях. Станция Воейково вновь выделялась минимальным средним отклонением и наибольшим диапазоном отрицательных ошибок (до $-10,7$ %). В октябре СО оставалось положительным на всех станциях. Минимальные значения зафиксированы на станциях *Кронштадт* (3,5 %) и *Воейково* (4 %), максимальное – в *Пулково* (8 %). Вместе с тем СКО возросло по сравнению с январём и варьировалось от 10,0 % (*Кронштадт*, *Воейково*) до 12,5 % (*Ломоносов*). Диапазон экстремальных ошибок расширился в область отрицательных значений (до $-9,6$ % в *Кронштадте*).

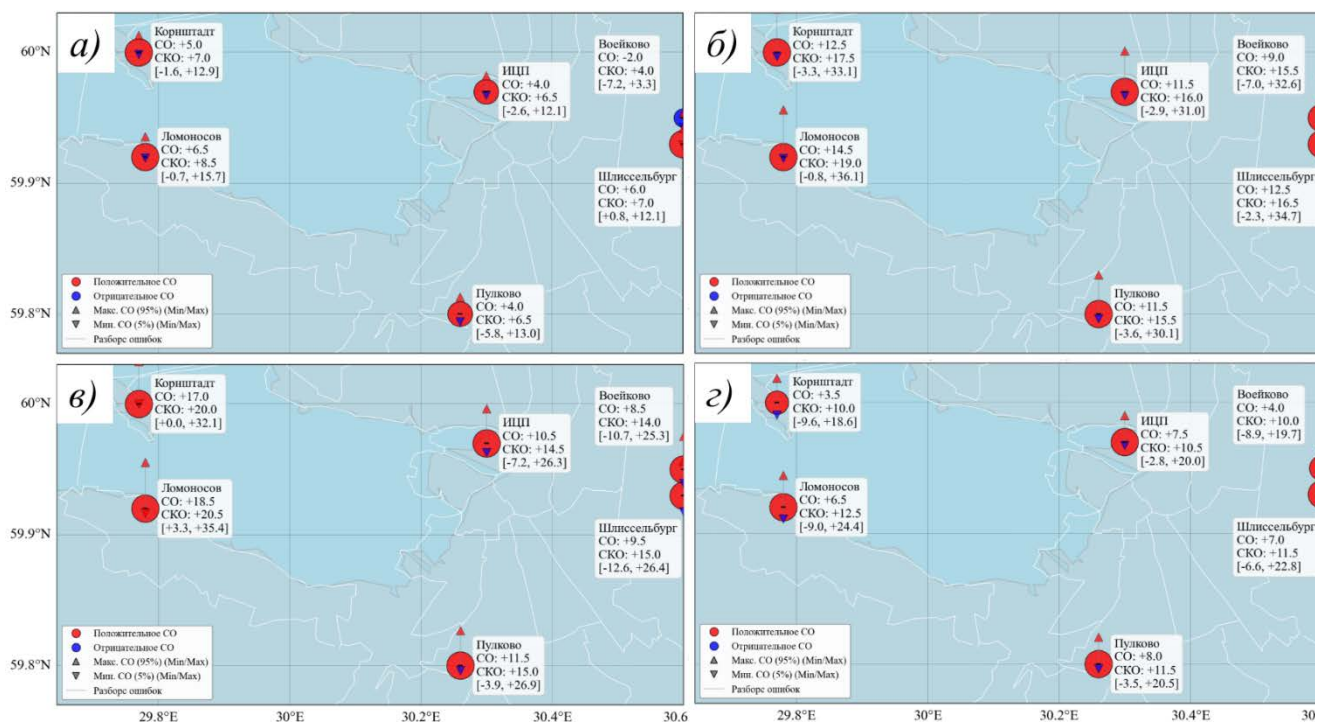


Рисунок 4.2.4 – Ошибки прогноза относительной влажности на станциях за а) январь, б) март, в) июнь, г) октябрь 2021 г.

Среднее отклонение прогноза скорости ветра было положительным на большинстве станций во все рассматриваемые месяцы. Исключением являлась станция *Пул'ково*, где СО оставалось отрицательным или минимальным положительным в течение всего года (**Рисунок 4.2.5**).

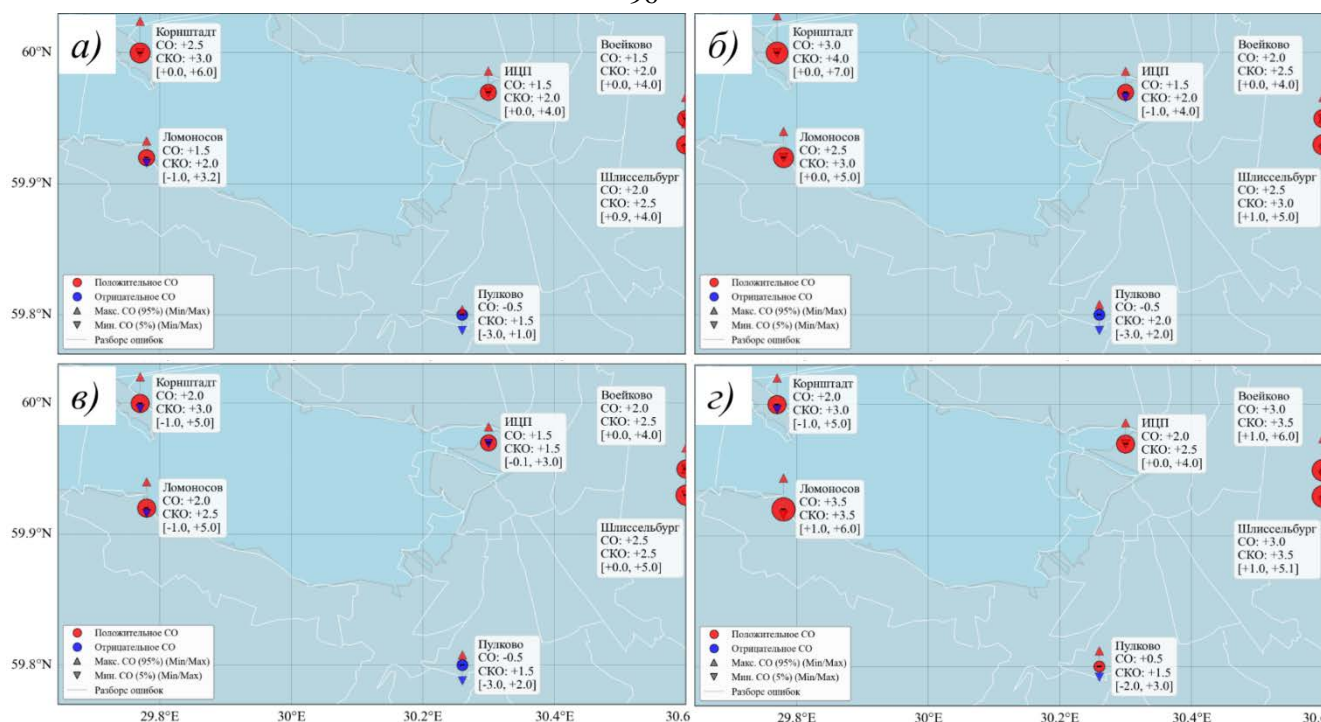


Рисунок 4.2.5 – Ошибки прогноза скорости ветра на станциях за а) январь, б) март, в) июнь, г) октябрь 2021 г.

В **январе** СКО скорости ветра составило 2 м/с на городской станции и станциях к востоку от города. К западу от города ошибка возрастала: в Кронштадте СКО достигло 3 м/с при максимальной ошибке 6 м/с. Станция Пулково выделялась единственным отрицательным средним отклонением ($-0,5$ м/с) при минимальном СКО = 1,5 м/с. На остальных станциях СО было положительным и варьировалось в пределах 1,5..2,5 м/с: минимальные значения отмечены на ИЦП, Ломоносове и Воейково, максимальное – в Кронштадте. Характер ошибок прогноза скорости ветра в **марте** был аналогичен январю, однако величина ошибок возросла. Среднеквадратическое отклонение изменялось от 2 м/с на станциях ИЦП и Пулково до 4 м/с в Кронштадте. Среднее отклонение в Пулково по-прежнему оставалось единственным отрицательным ($-0,5$ м/с), тогда как на остальных станциях оно было положительным и изменялось в диапазоне от 1,5 м/с на ИЦП до 3 м/с в Кронштадте (где также наблюдалось максимальное положительное СО в поле экстремальных значений). Среднеквадратическое отклонение скорости ветра в **июне** распределено наиболее однородно среди всех анализируемых месяцев: 2,5..3 м/с на станциях к западу от города (Ломоносов, Кронштадт), 2,5 м/с на станциях к востоку (Воейково, Шлиссельбург) и 1,5 м/с на станциях ИЦП и Пулково. Среднее отклонение характеризовалось умеренными положительными значениями (1,5..2,5 м/с) на большинстве станций. По сравнению с другими месяцами ошибки прогноза скорости ветра в **октябре** на всех станциях, включая Пулково, приобрели положительный знак. Тем не менее СО в Пулково осталось наименьшим среди всех станций и составило 0,5 м/с при СКО = 1,5 м/с. Наибольшие

значения СО (до 3,5 м/с) зафиксированы на станциях Ломоносов, Воейково и Шлиссельбург при СКО = 3,5 м/с и максимальных ошибках до 6,0 м/с. На станциях ИЦП и Кронштадт среднее отклонение составило 2 м/с при СКО = 2,5 и 3 м/с соответственно. Примечательно, что на станциях Ломоносов, Воейково и Шлиссельбург минимальные значения СО были положительными (1 м/с), что свидетельствует об устойчивом завышении скорости ветра моделью на этих станциях.

Проведённый анализ систематических ошибок модели позволяет сформулировать следующие **выводы**. 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. При анализе отрицательной аномалии скорости ветра исключена станция Пулково за все месяцы.

Результаты сравнительного анализа (*Рисунок 4.2.6–4.2.9*) представляют собой разности значений приземных параметров между городской и окрестными станциями Санкт-Петербурга.

При этом сплошными линиями показана средняя разность между ИЦП и всеми загородными станциями, а заливкой – разброс значений разностей при использовании различных пар «ИЦП–окрестная станция». В желтых прямоугольниках на графики разностей нанесены осредненные за неделю фактические и прогностические значения метеорологического параметра для станции ИЦП. Средняя суточная облачность и средняя суточная толщина снежного покрова также приведены для станции ИЦП.

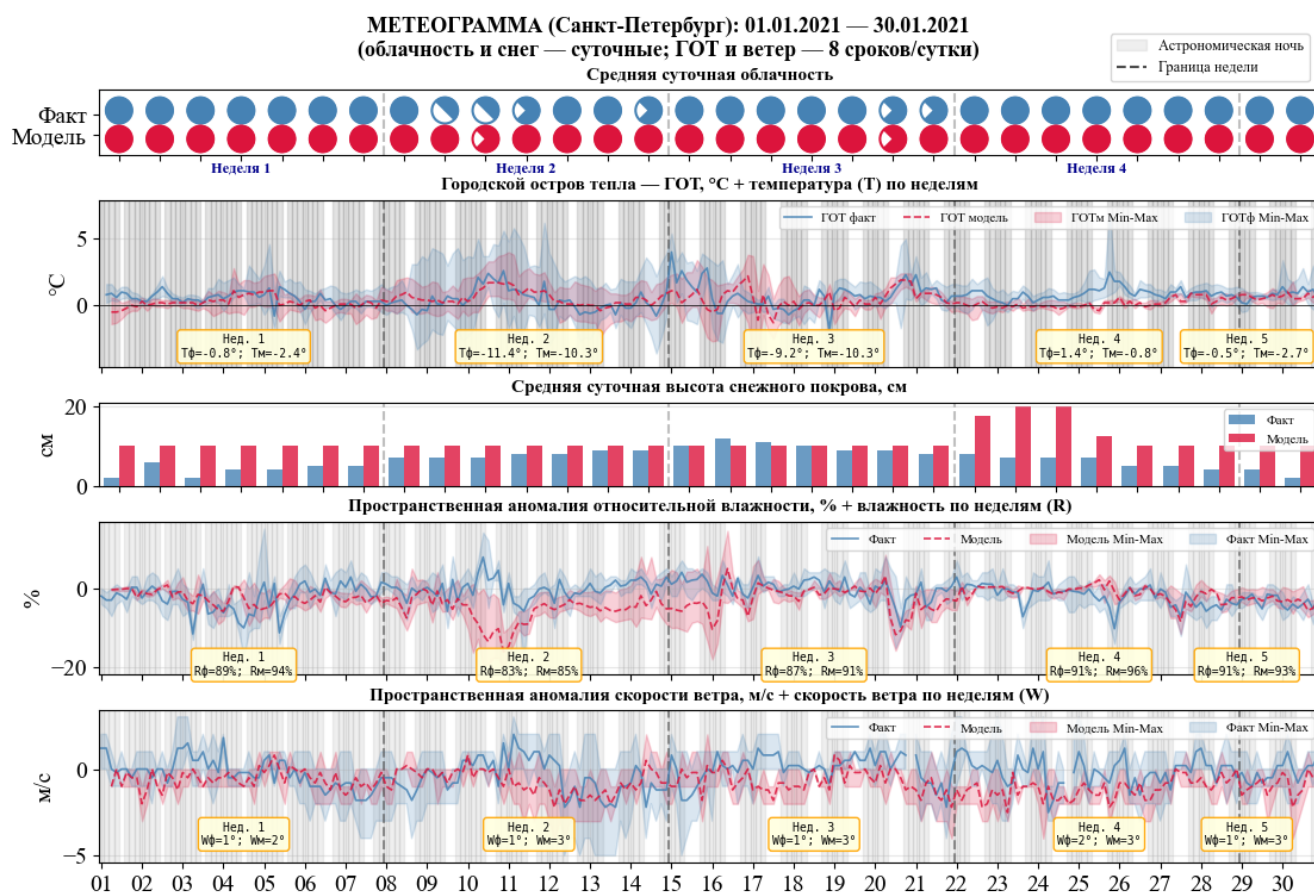


Рисунок 4.2.6 – Сопоставление аномалий городского метеорологического режима по данным наблюдений и по данным модели за январь 2021 г.

В январе на протяжении всего месяца над городом наблюдалась сплошная облачность, что в совокупности с короткой продолжительностью дня (от 6 часов начале месяца до 8 в конце) приводило к тому, что солнечное излучение на поверхность практически не поступало. В этих условиях радиационный прогрев поверхности исключён, а снежный покров выравнивает альбедо городской и загородной территорий, нивелируя вклад термических параметров урбанизированной подстилающей поверхности. Из всех модифицированных параметров значимым остаётся лишь шероховатость. Интенсивность городского острова тепла по данным модели в среднем за январь на $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже, чем по данным наблюдений (среднее $\text{ГОТ}_{\text{ф}} = 0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, среднее $\text{ГОТ}_{\text{м}} = 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$). Систематическое занижение интенсивности ГОТ объясняется прежде

всего отсутствием в модели параметризации антропогенного потока тепла. Внимания заслуживает вторая неделя месяца, когда модель в среднем не занижала интенсивность ГОТ. Данный результат объясняется компенсацией ошибок: на фоне низких температур ($T_{\phi} = -11^{\circ}\text{C}$ во вторую неделю при $T_{\phi} = -2^{\circ}\text{C}$ в первую и $T_{\phi} = 1^{\circ}\text{C}$ в четвёртую) испарение в городе по данным модели оказывается сильно подавленным, что проявляется в выраженном острове сухости. По данным модели он достигает максимума в период наибольшего развития ГОТ в ночь на 11 марта (среднее значение -15% , максимальное -17%), тогда как по данным наблюдений остров сухости отсутствует и разность относительной влажности между городом и пригородом положительна (4%). В первую и четвёртую недели, когда температура была близка к 0°C , аномалии относительной влажности по данным наблюдений и модели сопоставимы, затраты тепла на испарение воспроизводятся корректно, и компенсации отсутствия антропогенного потока тепла в модели не происходит. Аномалия скорости ветра в модели на протяжении всего месяца превышает наблюдаемую (в среднем $-0,8\text{ м/с}$ при $-0,2\text{ м/с}$ по наблюдениям). При этом по абсолютным значениям смоделированная скорость ветра в городе во все недели выше, чем фактическая.

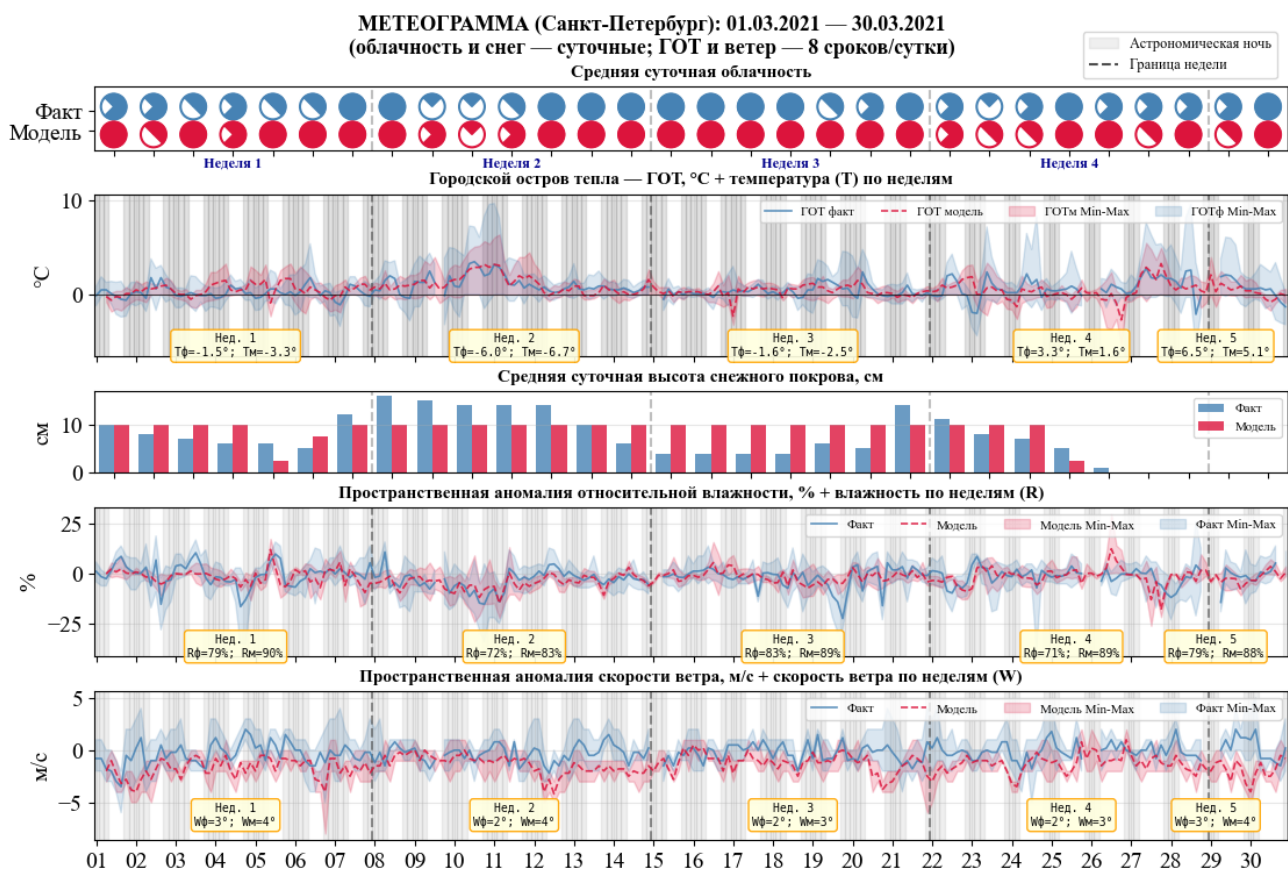


Рисунок 4.2.7 – Сопоставление аномалий городского метеорологического режима по данным наблюдений и по данным модели за март 2021 г.

В марте продолжительность дня увеличивается с 10 до 13 часов к концу месяца. В марте 2021

г большую часть периода в городе сохранялся снежный покров, сошедший лишь в середине четвёртой недели. По сравнению с январём возросло число дней с переменной облачностью, что усилило влияние радиационных и термических процессов на формирование приземных полей. В среднем за месяц интенсивность ГОТ по данным модели и наблюдений практически совпадает ($\text{ГОТ}_ф = \text{ГОТ}_м = 0.6^\circ\text{C}$). Пока снежный покров сохранялся и вклад радиационных факторов оставался умеренным, модель успешно воспроизводила среднюю интенсивность ГОТ, хотя максимальные значения его интенсивности не достигали фактических в ряде случаев. Однако в конце месяца, после схода снежного покрова, радиационные факторы начинают действовать в полную силу, и модификации параметров урбанизированной поверхности становится недостаточно для воспроизведения как средней, так и максимальной аномалий приземной температуры. Обращает на себя внимание систематическое превышение фоновой влажности в модели над наблюдаемой на ИЦП (первая и вторая недели: 12 %, третья: 6 %, четвёртая: 18 %), тогда как средняя интенсивность острова сухости за месяц (-2%) по данным модели совпадала с наблюдаемой. Как и в январе, прогнозируемая аномалия скорости ветра стабильно превосходила фактическую (в среднем на 1 м/с), а в городе скорость ветра по-прежнему прогнозировалась выше наблюдаемой.

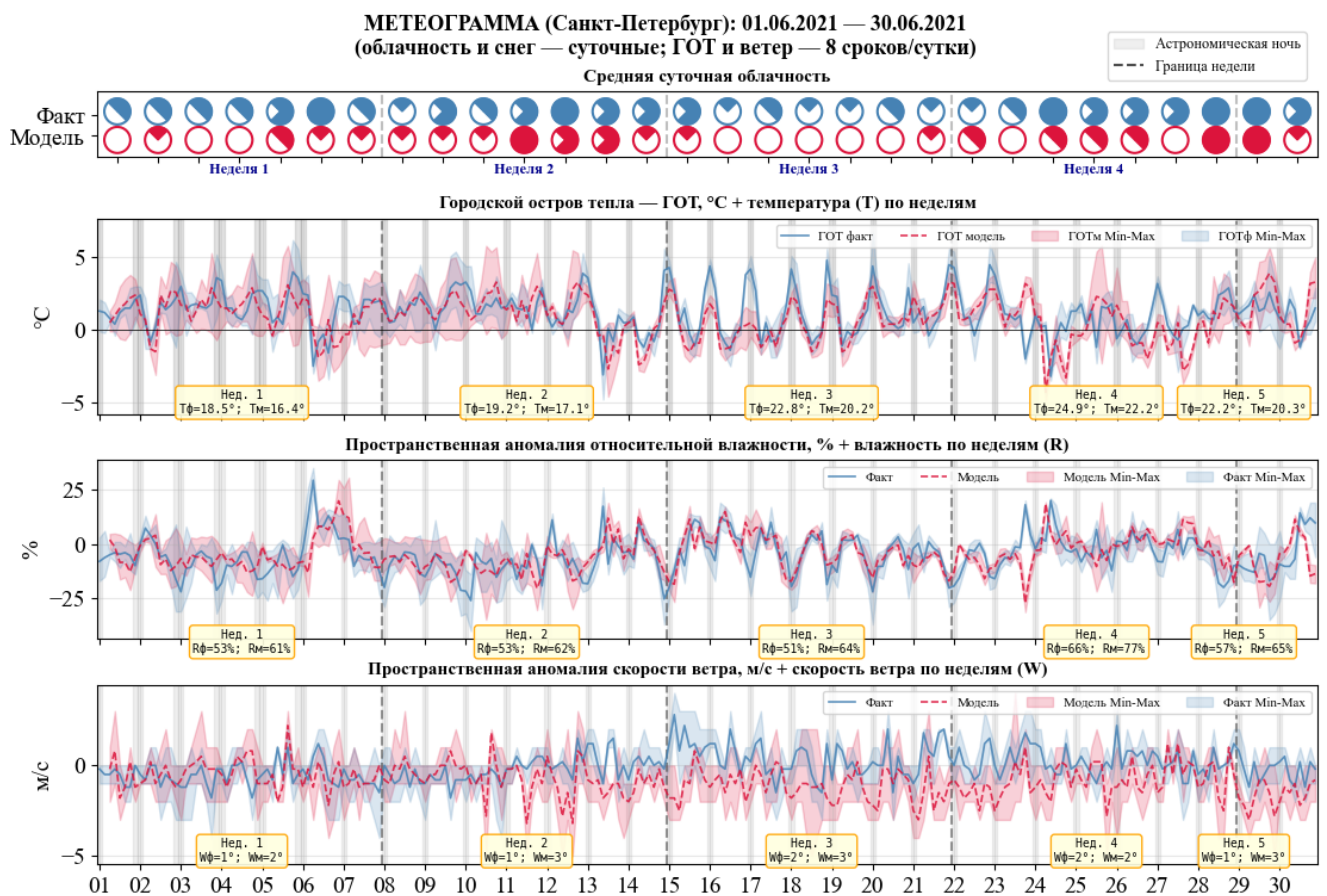


Рисунок 4.2.8 – Сопоставление аномалий городского метеорологического режима по данным наблюдений и по данным модели за июнь 2021 г.

Июнь в Санкт-Петербурге – это период «белых ночей», когда продолжительность светового дня составляет от 18 до 19 часов. Состояние неба в июне 2021 г. по данным ИЦП характеризовалось переменной облачностью или ясным небом большую часть месяца. Прогнозируемая средняя интенсивность ГОТ была ниже наблюдаемой: $ГОТ_{\phi} = 1,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $ГОТ_{\text{м}} = 0,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$. В первые три недели модель удовлетворительно воспроизводила суточный ход интенсивности ГОТ с выраженными ночными максимумами, однако систематически занижала его амплитуду, особенно в третью неделю, когда по данным наблюдений ГОТ достигает максимального развития в ночные часы. Аномалия относительной влажности в среднем за месяц отрицательная, ее прогностическая интенсивность близка к фактической (-4% и -5% соответственно). Вместе с тем сохраняется характерная для модели особенность, отмеченная ранее в марте: влажность на городской станции, систематически завышается на $8\text{--}13 \%$. Аномалия скорости ветра в модели стабильно отрицательна ($-0,8 \text{ м/с}$), тогда как наблюдаемая близка к нулю на протяжении месяца, а в третью неделю фактическая аномалия приобрела положительные значения, что может косвенно указывать на проявление эффекта городского бриза.

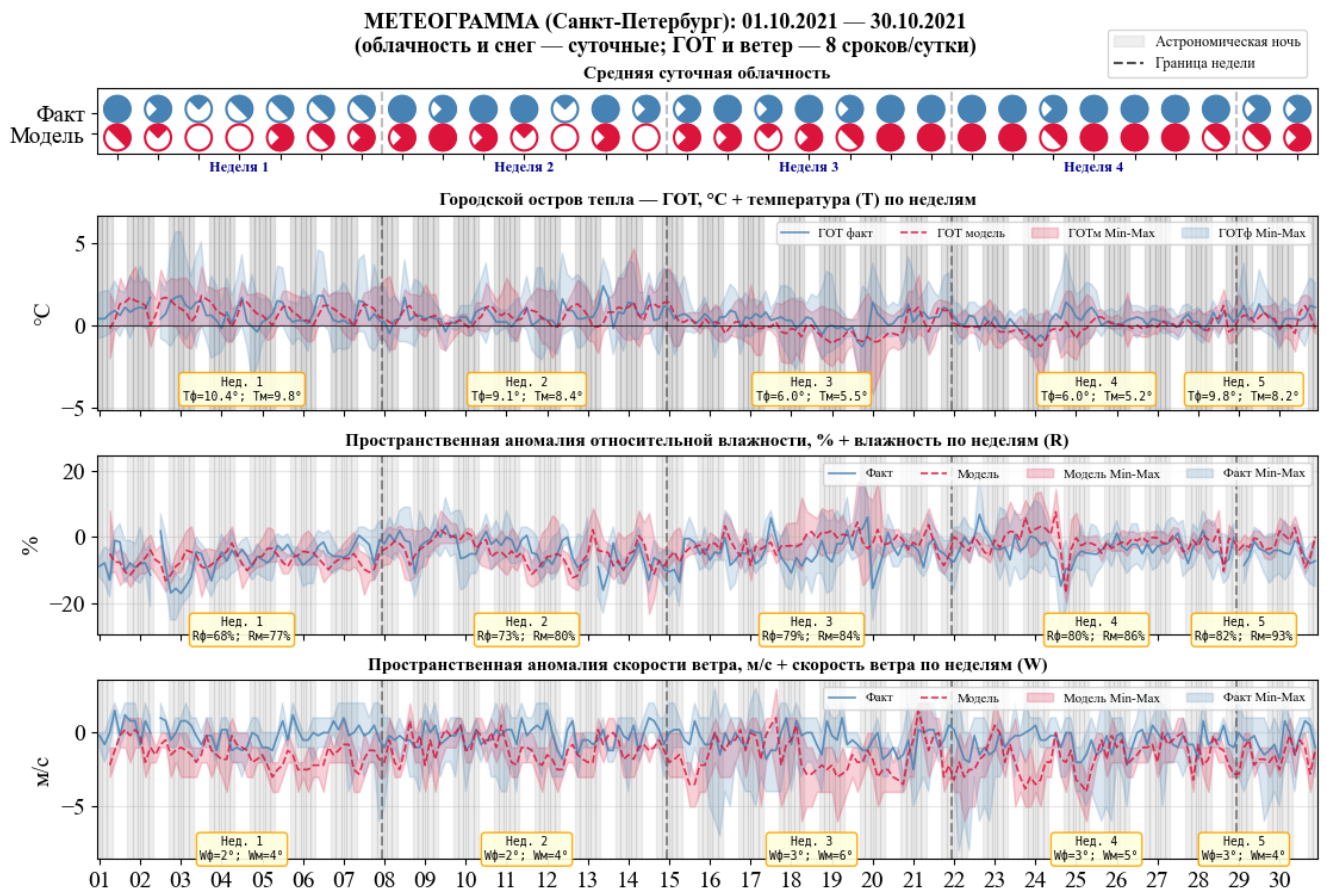


Рисунок 4.2.9 – Сопоставление аномалий городского метеорологического режима по данным наблюдений и по данным модели за октябрь 2021 г.

В октябре среднемесячная интенсивность ГОТ по данным модели была вновь ниже, чем по

данным наблюдений ($0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ при $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ по наблюдениям). В первые две недели средняя интенсивность ГОТ моделью воспроизведена удовлетворительно, однако максимальные значения были занижены, а положение максимумов смещено относительно данных наблюдений. Третья неделя характеризовалась максимальным систематическим занижением ГОТ за весь месяц ($T = 6,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, облачность 75% , долгота дня 10 часов). Погодные условия за четвертую неделю соответствовали глубокой осени: почти сплошная облачность, короткий день. При снижении температуры и сокращении светового дня относительный вклад антропогенного потока тепла, полностью отсутствующий в модели, возрос. За счет этого $\text{ГОТ}_{\text{ф}}$ оставался положительным, тогда как модель прогнозировала нулевые или слабо отрицательные значения $\text{ГОТ}_{\text{м}}$ практически ежедневно. Фоновая влажность в модели стабильно завышена на $3..9\%$ в зависимости от недели, что сопоставимо с мартом. Расхождение аномалий влажности нарастает к концу месяца, однако среднемесячная величина острова сухости в модели сопоставима с наблюдаемой (-4 и -5% соответственно). Аномалия скорости ветра, как и в прошлые месяцы завышена моделью ($-1,3$ при $-0,5\text{ м/с}$ по наблюдениям), а средняя скорость ветра в городе наоборот завышена на протяжении всего месяца.

Таким образом, использование модели WRF-ARW с уточненными параметрами урбанизированной поверхности в простой параметризации городского подслоя позволяет воспроизводить некоторые эффекты влияния застройки Санкт-Петербурга на поля приземных метеорологических величин. Однако конфигурация модели имеет ряд недостатков, из-за которых в дальнейшем для описания взаимодействия городской подстилающей поверхности с атмосферой **целесообразно использовать специализированные модели городского подслоя, которые позволят более реалистично воспроизвести процессы в городском подслое Санкт-Петербурга.** Во-первых, упрощенная 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. Во-вторых, даже при задании параметров городской поверхности, близких к экстремальным, интенсивность ГОТ в июне оказывается ниже наблюдаемой, хотя именно летом вклад от измененных свойств урбанизированной поверхности в формирование ГОТ максимален. В-третьих, модель не учитывает выбросы антропогенного тепла, что приводит к занижению интенсивности ГОТ в январе.

Раздел 4.3. Моделирование с использованием схемы городского подслоя ВЕР_ВЕМ

Критическим вопросом в современном моделировании городского климата является выбор оптимального уровня сложности и детализации для представления городских поверхностей в мезомасштабных климатических моделях. Как отмечают [Baklanov et al., 2009], принцип

"пригодности для цели" (fitness-for-purpose) является важнейшим соображением при выборе подходящего уровня детализации в зависимости от конкретных целей и области практического применения модели. Для достижения цели, сформулированной в разделе 4.2, была выбрана региональная прогностическая модель WRF-ARW версии 4.3 с интегрированной многоуровневой параметризацией городского подслоя ВЕР, объединенной с моделью энергопотребления зданий ВЕМ. Для проведения численных экспериментов с современной параметризацией городского подслоя в разработанную конфигурацию модельной области были внесены следующие изменения. Шаг по пространству для второй вложенной сетки увеличен с 1 до 0,6 км, параметризация деятельного слоя природных поверхностей изменена на схему Noah LSM, совместимую с ВЕР_ВЕМ.

Как отмечается в фундаментальном обзоре [Тарасова и др., 2023], развитие моделей городского подслоя носило преимущественно экстенсивный характер, при котором версии городских параметризаций улучшались путем учета новых физических процессов и объектов городской инфраструктуры. Так, развитие схем ВЕР и ВЕМ было направлено на учет в модели современных тенденций в сферах городского планирования и повышения энергоэффективности зданий. В частности, были реализованы обновления для моделирования влияния озелененных крыш и солнечных панелей, что позволило оценивать воздействие этих современных технологий на городской микроклимат и энергетический баланс зданий.

Однако, как справедливо отмечается в той же работе, чем больше блоков и процессов описывает параметризация, тем больше необходимо предоставить информации о входных параметрах, которыми характеризуется городская поверхность. Это создает новые вызовы, связанные с необходимостью получения, обработки и усвоения больших объемов информации о городской геометрии и свойствах городских поверхностей.

4.3.1. Уточнение и интеграция данных о геометрических свойствах зданий Санкт-Петербурга в многоуровневую модель городского подслоя

Компоненты городского ландшафта, имеющие отношение к формированию аномалий погодного режима, могут быть организованы по масштабу в грани, элементы, улицы и кварталы, а также районы [Oke et al., 2017]. Каждый уровень такой иерархической организации требует специфических подходов к сбору и обработке пространственных данных, что создает значительные методологические и технические вызовы для исследователей городского климата.

Для решения этой проблемы была создана международная инициатива World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT), которая предоставляет стандартизированную методологию сбора и организации городских данных на различных уровнях детализации. Данные уровня L0 основаны на типологии локальных климатических зон (Local Climate Zones, ЛКЗ [Stewart & Oke,

2012]), разработанной для описания климатически значимых свойств поверхности. Преимущества этого подхода заключаются в его универсальности (адаптирован к особенностям урбанизированных поверхностей в различных городах мира), а также связи каждого из 17 основных типов зон с типичными диапазонами значений ключевых параметров городской застройки. Пространственное разрешение данных составляет 100 метров, при этом за локальные климатические зоны считаются участки, однородные на протяжении минимум 400 м² [Stewart & Oke, 2012]. Практическая применимость этого подхода обоснована наличием в базе данных WUDAPT данных для более чем 4000 городов мира.

Данные уровней L1 и L2 обеспечивают значительно более высокую детализацию городских характеристик, включая точные контуры отдельных зданий, их высоты, материалы конструкций и другие морфологические параметры. Примеры таких данных, доступные на портале WUDAPT, включают, например, глобальные карты застройки с пространственным разрешением от 12 до 30 метров, карты высот зданий для городов Европы, растровые данные о площади оснований зданий для городов США.

Для описания свойств природных типов подстилающей поверхности использовался продукт MODIS IGBP с пространственным разрешением 30 угловых секунд. 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. Карта локальных климатических зон Санкт-Петербурга, предоставленная на портале в 2021 году для исследователей [Demuzere et al., 2021; Mansheim, 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 (*Таблица 4.3*).

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.

Таблица 4.3 – Изменение площадей ЛКЗ при интерполяции на сетку модели

ЛКЗ	Описание	WUDAPT		Модель		Изменение <i>Δ, п.п.</i>
		<i>км²</i>	<i>%</i>	<i>км²</i>	<i>%</i>	
1	Компактная высокоэтажная	0	0,0	19	0,7	0,7
2	Компактная среднеэтажная	92	3,5	69	2,4	-1,1
3	Компактная малоэтажная	0	–	0	–	–
4	Открытая высокоэтажная	436	16,6	480	16,7	0,1
5	Открытая среднеэтажная	438	16,7	465	16,2	-0,5
6	Открытая малоэтажная	1 329	50,6	1 458	50,8	0,2
7	Облегченная малоэтажная	0	–	0	–	–
8	Крупногабаритная малоэтажная	259	9,9	337	11,7	1,8
9	Рассеянная	44	1,7	21	0,7	-1,0
10	Тяжёлая промышленность	28	1,1	21	0,7	-0,4
	Итого	2 626	100	2 870	100	

Модель WRF-ARW, объединенная с параметризацией городского подслоя, способна использовать набор из 22 морфологических параметров городской застройки. Среди ключевых параметров можно выделить плотность фронтальной площади для различных направлений ветра (FAD0, FAD45, FAD90, FAD135), долю площади оснований зданий (PAD) и крыш (RAD), долю площади застройки (LF), среднюю высоту зданий (MH), стандартное отклонение высоты зданий (STDH), взвешенную по площади среднюю высоту зданий (HGT) и распределение высот зданий по высотам (HI).

Согласно [Glotfelty et al., 2013], параметры HI, FAD_x, PAD, RAD разрешены по вертикали с использованием 5-метровых слоев в диапазоне от 0 до 75 метров высоты. Параметры с 4-мя индексами содержат информацию для четырех основных направлений ветра (0°, 45°, 90°, 135°). Параметр HI используется исключительно в многоуровневых параметризациях ВЕР и ВЕР_ВЕМ, в то время как MH, STDH, LF применяются только в одноуровневой схеме.

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 городской геометрии в модели ВЕР_ВЕМ, в первую очередь информации о распределении высот зданий. В качестве источника информации о городской застройке использовалась база данных OpenStreetMap (OSM, <https://www.openstreetmap.org/export>). Векторные объекты проецировались на расчётную сетку модели WRF; здания, контуры которых пересекали границы ячеек, разделялись пропорционально площади основания, попадающей в каждую ячейку. На этапе предварительной обработки ячейки классифицировались как «пустые» (содержащие исключительно природную поверхность) либо «непустые» (включающие элементы застройки). Для непустых ячеек вычислялись морфологические параметры, необходимые для работы ВЕР_ВЕМ: отношение суммарной площади оснований зданий к площади ячейки (PAD), вертикальное распределение площади

зданий по высотам от 0 до 75 м (HI), а также средняя высота зданий, взвешенная по площади оснований (HGT). Помимо этого, для непустых ячеек уточнялась доля непроницаемых поверхностей (URB_FRC), 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.

URB_FRC является критически важным параметром для совместной работы Noah LSM и модели городского подслоя. Основная функция модели подстилающей поверхности и схемы ВЕР заключается в предоставлении нижних граничных условий для связанной атмосферной модели, включая потоки явного и скрытого тепла с поверхности и температуру поверхности. Для ячеек, классифицированных как городские, это взаимодействие осуществляется через информацию о доле городской поверхности в пределах ячейки. Модель подстилающей поверхности рассчитывает температуру поверхности для растительной части, а ВЕР_ВЕМ предоставляет температуру для непроницаемых поверхностей. Итоговые потоки тепла масштаба сетки рассчитываются как средневзвешенные значения потоков с соответствующих типов поверхности.

В процессе инициализации модели городского подслоя исходные параметры (PAD, HI, HGT) были трансформированы в набор **производных** параметров, которые непосредственно используются в расчетных блоках ВЕР_ВЕМ (*Рисунок 4.3.1*). Распределение высот зданий было использовано для расчета двух вероятностных функций: вероятности того, что здание имеет высоту, равную заданному значению (ss), и вероятности того, что высота здания больше или равна заданному значению (pb). Остальные параметры были применены для расчета усредненной геометрии городского каньона, а именно для определения средней ширины улиц (ws) и средней ширины зданий в ячейке (bs). Преобразованные параметры используются непосредственно в блоке расчета **длин перемешивания** и в **радиационном блоке ВЕР**.

В блоке расчета **длин перемешивания** используются параметры геометрии каньона и распределения высот, которые влияют на определение интенсивности и характер турбулентного обмена в приземном слое атмосферы. Как правило, длина перемешивания увеличивается, что связано с повышенной шероховатостью урбанизированной поверхности.

Влияние производных параметров на расчет процессов в **радиационном блоке ВЕР** происходит следующим образом. На первом этапе осуществляется модификация приходящей радиации с учетом городской геометрии. При расчете эффектов затенения зданиями, вероятностные распределения высот зданий и средняя ширина улиц используются для определения доли площади, находящейся в тени при данной высоте солнца над горизонтом. После рассчитывается длинноволновый и коротковолновый радиационный обмен, где вероятностное распределение высот зданий позволяет учесть эффективность многократного поглощения и переизлучения длинноволнового излучения, а также многократные отражения

коротковолнового солнечного излучения внутри городского каньона. На втором этапе на основе полученных результатов вычисляются результирующие восходящие коротковолновые и длинноволновые радиационные потоки, покидающие городской каньон. Эти потоки, зависящие от всех преобразованных геометрических параметров застройки, передаются в атмосферный блок модели WRF-ARW в качестве нижнего граничного условия для расчета радиационного баланса «атмосфера-подстилающая поверхность».

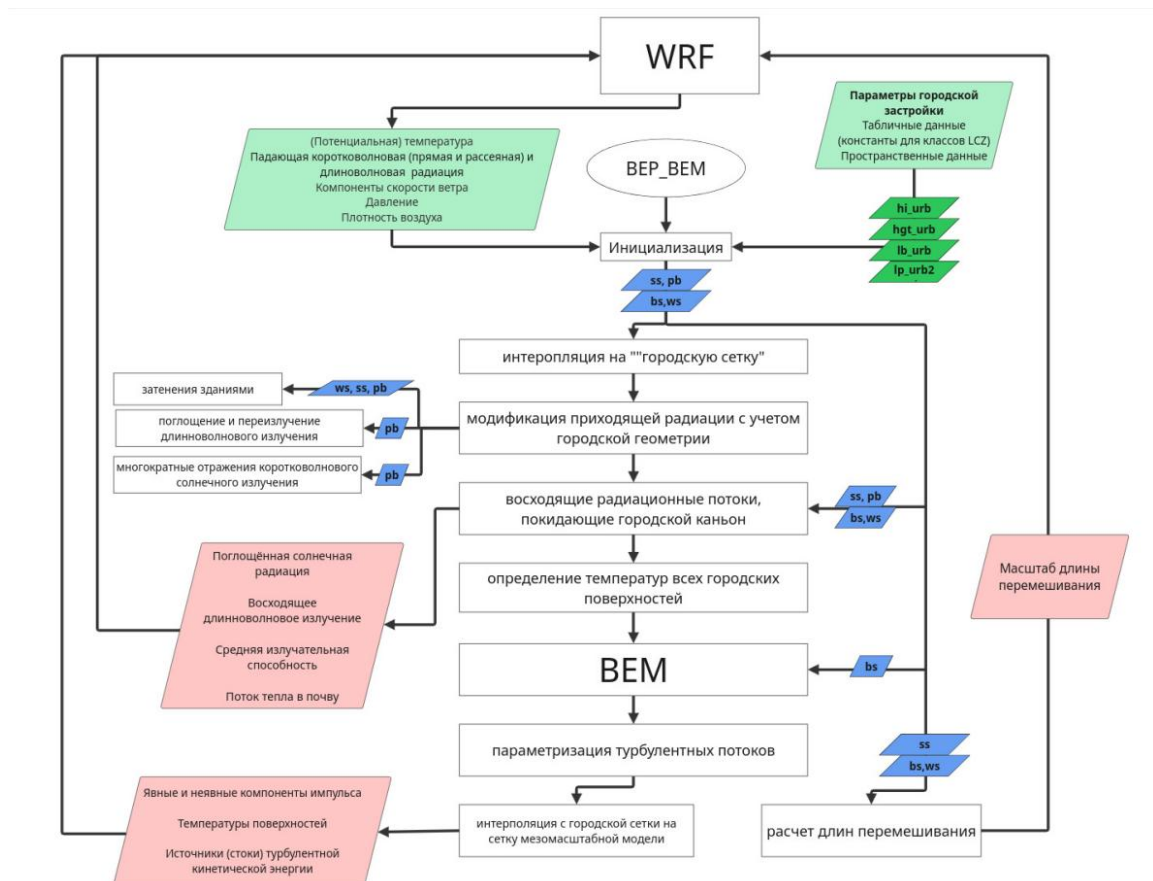


Рисунок 4.3.1 – Блок-схема работы параметризации ВЕР_ВЕМ с уточненными параметрами урбанизированной поверхности

Через обновленные компоненты радиационного баланса преобразованные параметры влияют опосредованно на определение температур всех городских поверхностей, что, в свою очередь, приводит к корректировке расчетов турбулентных потоков. В блоке параметризации турбулентных потоков рассчитываются явные и неявные компоненты импульса, еще раз обновляются температуры поверхностей, рассчитываются источники или стоки турбулентной кинетической энергии с учетом вклада вертикальных (стены) и горизонтальных поверхностей зданий (крыши и дороги). Перед передачей выходных данных ВЕР в ядро динамической модели WRF-ARW они интерполируются с городской сетки на сетку мезомасштабной модели.

При активации модели энергопотребления зданий часть уточненных морфологических

параметров городской застройки начинает влиять на расчеты в данном блоке опосредованно, через предоставление данных о температуре снаружи и о компонентах радиационного баланса. Один параметр – ширина зданий (bs) – используются ВЕМ непосредственно. Он влияет, в первую очередь, на компоненты радиационного баланса поверхностей, включая учет пропускания части солнечной радиации через оконные проемы и ее последующего поступления внутрь помещений.

На этапе интеграции ВЕМ с ВЕР, последняя получает от первой массивы температур и удельной влажности воздуха для каждого этажа здания, температуры различных элементов конструкций, включая стены, окна, дороги, крыши и полы, а также потоки явного и скрытого тепла. Потоки тепла подразделяются на выделяемые с каждого этажа наружу и генерируемые за счет процессов естественной вентиляции здания. Дополнительно учитываются тепловые потоки, поступающие в здание через ограждающие конструкции, такие как крыша, и циркулирующие внутри конструкций здания. Таким образом, суммарный поток влаги от всех зданий в ячейке сетки, в результате смоделированных процессов вентиляции и кондиционирования, передаётся в ядро WRF-ARW в качестве явного источника (или стока) в уравнении влажности.

4.3.2. Верификация результатов моделирования по данным наземных наблюдений

Как и в случае верификации результатов моделирования с использованием простой параметризации урбанизированной поверхности, перед оценкой эффектов влияния городской застройки Санкт-Петербурга на метеорологические поля методом разностей, были проанализированы систематические ошибки прогноза модели для точек станций наблюдений. В сравнении с результатами эксперимента с простой параметризацией городского подслоя, полученные в этом разделе результаты отличаются гораздо большей пространственной неоднородностью.

Оценка ошибок приземной температуры по данным стационарных наблюдений приведена на **рисунке 4.3.2**. В **январе** модель демонстрирует систематическое занижение приземной температуры воздуха на всех станциях, СО ведет себя достаточно однородно и изменяется в пределах $-1..-2$ °С. Наименьшее среднее отклонение наблюдается на станциях ИЦП и Шлиссельбург, наибольшее – на станциях Пулково, Ломоносов и Кронштадт ($ME = -2,0$ °С). СКО составляет от 2 °С на станции ИЦП до 3 °С на станциях Пулково, Ломоносов и Кронштадт. Анализ экстремальных отклонений выявляет выраженную асимметрию ошибок: максимальные отрицательные ошибки достигают -6 °С (Ломоносов), тогда как положительные ошибки не превышают 3,5 °С (Шлиссельбург). Станция ИЦП, расположенная в центральной части города, характеризуется наименьшими значениями всех метрик ошибок прогноза. В **марте** сохраняется тенденция к систематическому занижению температуры моделью, однако пространственное распределение ошибок несколько изменяется. СО варьируется от -1 °С (ИЦП и Воейково) до $-2,5$ °С (Ломоносов и Кронштадт). СКО составляет от 2,0 °С на станциях ИЦП, Пулково и

Воейково до $3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ на станции В1. Асимметрия экстремальных ошибок в марте выражена ещё более отчётливо: максимальные отрицательные отклонения достигают $-6,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (С1), тогда как положительные ошибки не превышают $2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (С1). Станция ИЦП по-прежнему характеризуется наименьшими значениями всех метрик ошибок.

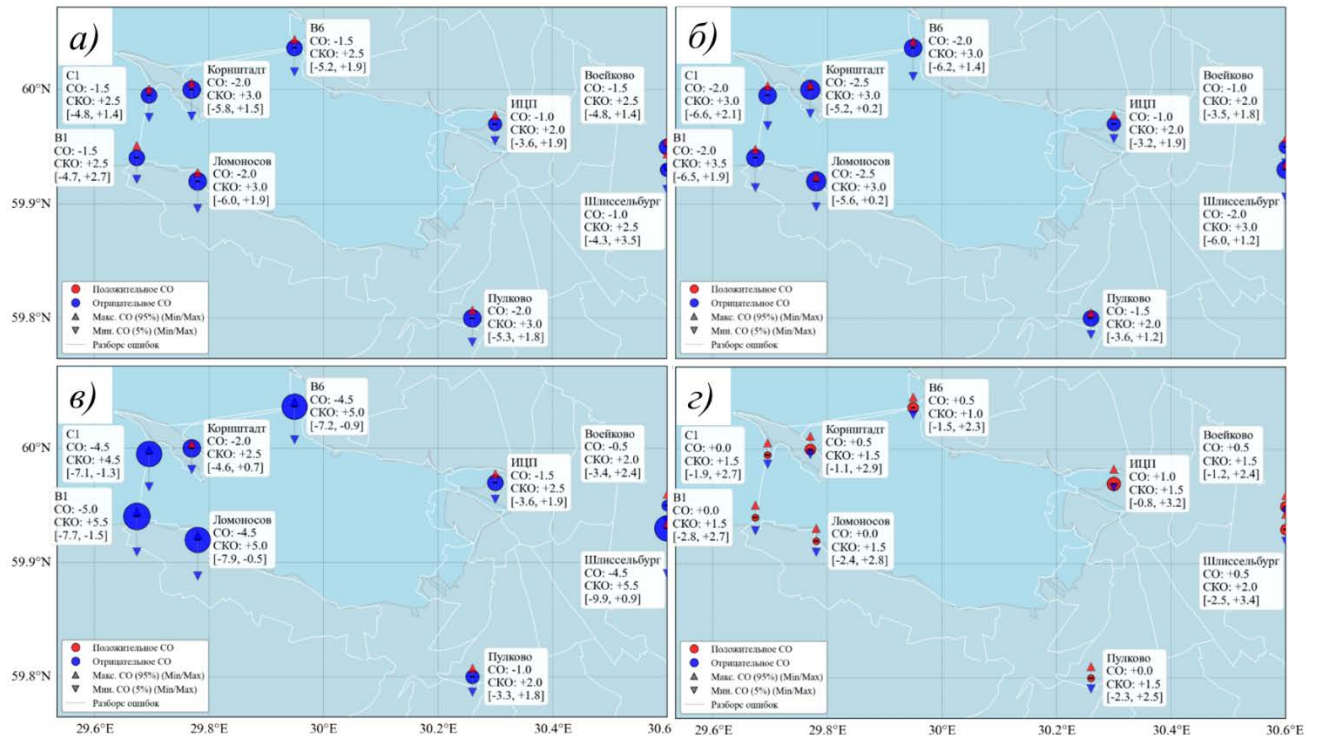


Рисунок 4.3.2 – Ошибки прогноза приземной температуры на станциях за а) январь, б) март, в) июнь, г) октябрь 2021 г.

В **июне** наблюдается значительное увеличение ошибок прогноза температуры на большинстве станций, при этом модель по-прежнему систематически занижает температуру. Наименьшие значения CO отмечаются на станциях Воейково ($\text{CO} = -0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) и Пулково ($\text{CO} = -1\text{ }^{\circ}\text{C}$), тогда как на АМС и станции Шлиссельбург среднее отклонение достигает $-4,5...-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. SKO существенно возрастает по сравнению с зимне-весенним периодом, достигая $5..5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ на станциях Ломоносов, Шлиссельбург, В1 и В6, тогда как на станциях Пулково и Воейково сохраняется на уровне $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Характерной особенностью экстремальных ошибок июня является появление станций с исключительно отрицательными ошибками на протяжении всего месяца (Ломоносов, С1, В1 и В6). Экстремальные отрицательные ошибки достигают максимальных значений на станции Шлиссельбург и на станции Ломоносов. На городской станции ИЦП и в Кронштадте величина ошибок несколько больше, но сопоставима с величиной ошибок в Воейково и Пулково. В **октябре** качество прогноза температуры существенно улучшается по сравнению с другими анализируемыми месяцами, при этом характер систематической ошибки меняется на положительный. CO принимает положительные ($1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ на станции ИЦП) или

нулевые значения на всех станциях ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$ на станциях Пулково, Ломоносов, С1 и В1). СКО характеризуется высокой пространственной однородностью, составляя $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ на большинстве станций. Диапазон экстремальных ошибок также значительно сужается: отрицательные отклонения не превышают $-2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (В1), а положительные достигают $3,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Шлиссельбург). Экстремальные ошибки симметрично распределяются относительно нуля, что указывает на отсутствие выраженных систематических искажений в воспроизведении температурного режима.

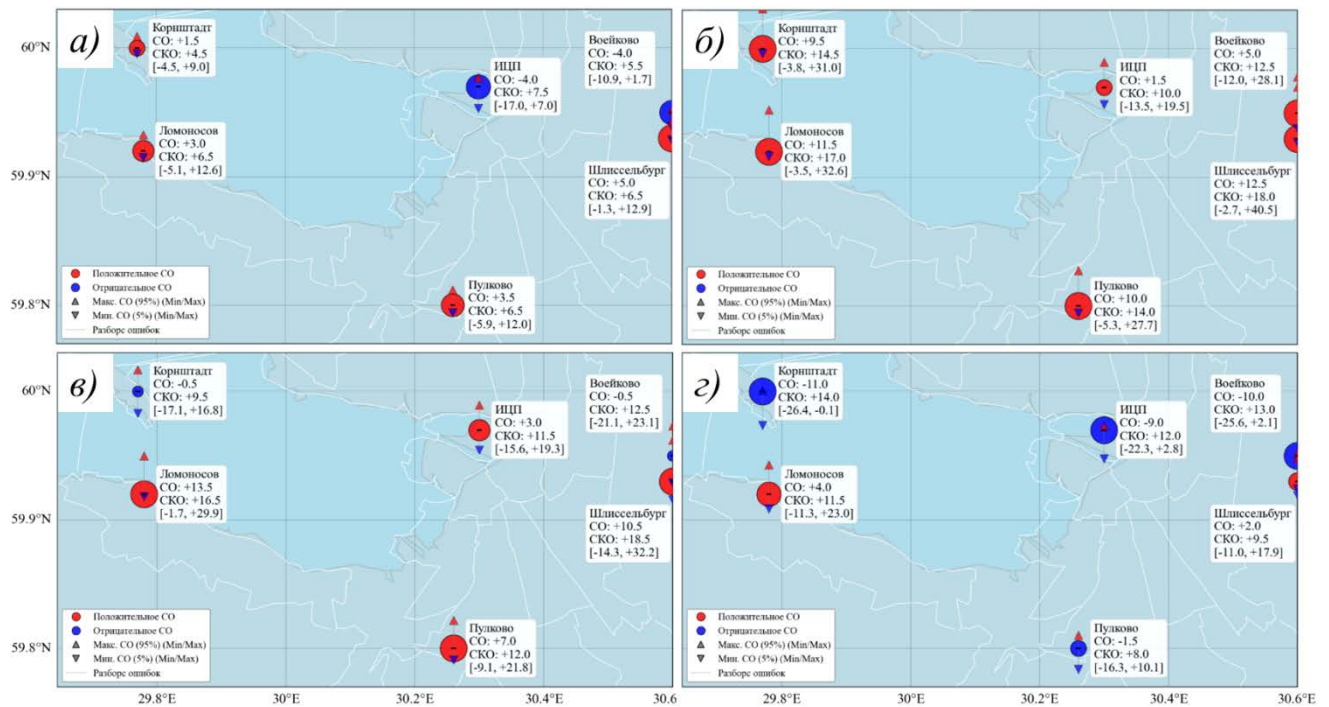


Рисунок 4.3.3 – Ошибки прогноза приземной влажности воздуха на станциях за а) январь, б) март, в) июнь, г) октябрь 2021 г.

Если систематическое отклонение приземной температуры ведет себя достаточно однородно на всех станциях за выбранный месяц, то средние ошибки прогноза **относительной влажности** дифференцированы по пространству (**Рисунок 4.3.3**). В **январе** СO варьируется от -4% на станциях ИЦП и Воейково до 5% в Шлиссельбурге. При этом анализ экстремальных отклонений выявляет значительную асимметрию ошибок на станции ИЦП, а Воейково характеризуется наиболее выраженным занижением влажности и практически отсутствующими положительными отклонениями. СКО составляет от $4,5\%$ на станции Кронштадт до $7,5\%$ на станции ИЦП. В **марте** наблюдается существенное увеличение величины СO с резким расширением диапазона положительных ошибок и сокращением отрицательных (минимальные значения СO не опускаются ниже -5% на большинстве станций). Среднее отклонение возрастает до $10\text{--}12,5\%$ на станциях Пулково, Ломоносов, Кронштадт и Шлиссельбург, при этом на городской станции сохраняется минимальное значение $1,5\%$. СКО увеличивается в $1,5\text{--}2,5$ раза по сравнению с январём, достигая $17\text{--}18\%$ на станциях Ломоносов и Шлиссельбург. В **июне** пространственная

структура ошибок дает возможность разделить станции на две группы. В первую группу включены станции Кронштадт и Воейково, где средняя ошибка близка к нулю, однако СКО остается высоким (9,5..12,5 %). На ИЦП и Пулково СКО сопоставимо со станциями первой группы, однако СО на станции Пулково занимает промежуточное положение. Во вторую группу входят станции Ломоносов и Шлиссельбург, где сохраняется как выраженное систематическое завышение влажности, так и максимальная величина положительных ошибок. В **октябре** средняя ошибка принимает отрицательные значения на станциях ИЦП, Кронштадт, Воейково (–9..–10 %) и Пулково (–1,5 %), тогда как на станциях Ломоносов и Шлиссельбург сохраняется слабое по сравнению с июнем завышение (до 4 %). При этом по величине экстремальных положительных отклонений относительной влажности Пулково ближе к станциям Ломоносов и Шлиссельбург. Среднеквадратическая ошибка снижается по сравнению с июнем, составляя 8..14 %.

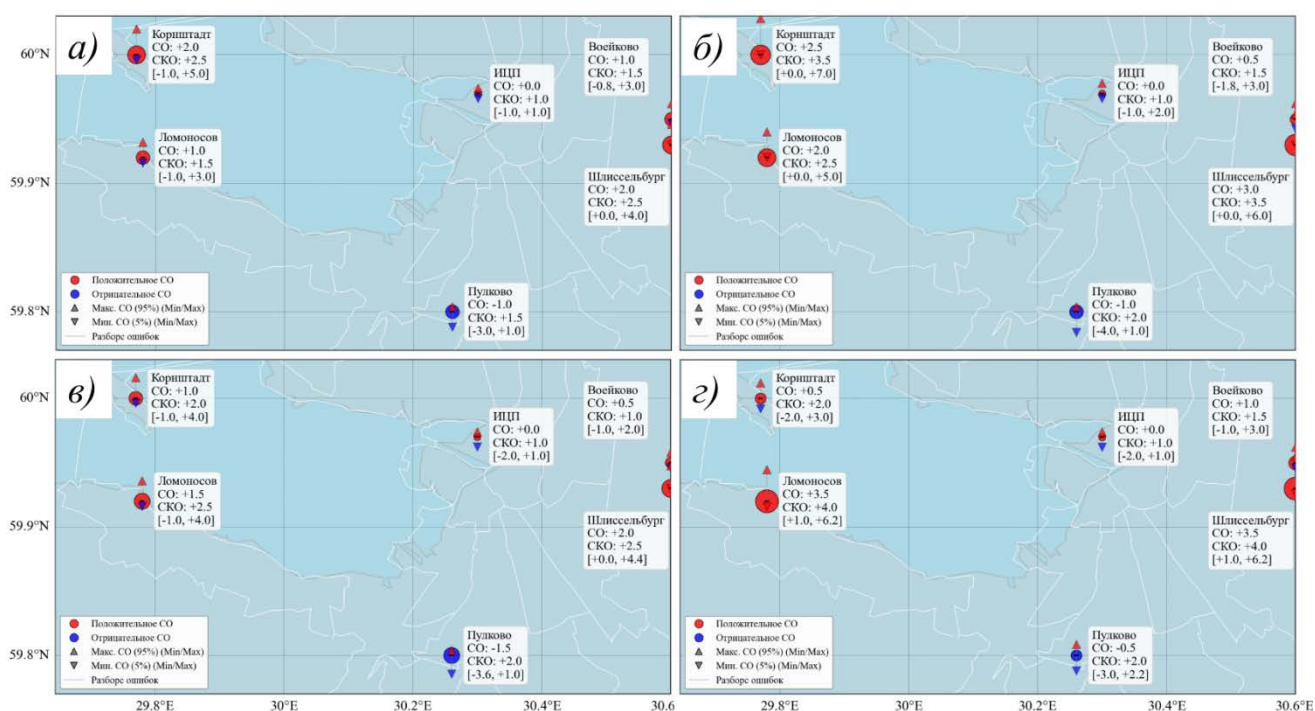


Рисунок 4.3.4 – Ошибки прогноза приземной скорости ветра на станциях за а) январь, б) март, в) июнь, г) октябрь 2021 г.

Характерной особенностью пространственного распределения ошибок прогноза скорости ветра (**Рисунок 4.3.4**) является минимальное отклонение прогностических значений от данных наблюдений на станции ИЦП. В **январе** модель демонстрирует преимущественно систематическое завышение скорости ветра на большинстве станций. Средняя ошибка варьируется от 0 м/с (ИЦП) до 2 м/с (Кронштадт и Шлиссельбург), при этом занижение скорости ветра отмечается только на станции Пулково (–1 м/с). Минимальная среднеквадратическая ошибка составляет 1 м/с (ИЦП), максимальная – 2,5 м/с (Кронштадт и Шлиссельбург). На

последних двух станциях также зафиксированы наибольшие положительные отклонения скорости ветра (5 и 4 м/с соответственно). В **марте** тенденция к систематическому завышению скорости ветра усиливается на прибрежных станциях и в Шлиссельбурге, вслед за этим растёт и СКО. Станция Пулково по-прежнему демонстрирует занижение скорости ветра. На городской станции по-прежнему наблюдается нулевое отклонение прогноза, остаётся минимальным и СКО (1 м/с). Характерной особенностью марта является появление станций с исключительно положительными ошибками (Ломоносов, Кронштадт и Шлиссельбург).

В **июне** наблюдается некоторое снижение систематических ошибок на прибрежных станциях по сравнению с весенним периодом. В Шлиссельбурге СО сохраняется на уровне 2 м/с и сохраняет асимметричный в сторону завышения. На станции Пулково систематическое занижение усиливается по сравнению с мартом до $-1,5$ м/с. СКО характеризуется меньшей пространственной неоднородностью: от 1 (ИЦП и Воейково) до 2,5 м/с (Ломоносов и Шлиссельбург). В **октябре** на станциях Ломоносов и Шлиссельбург средняя ошибка и СКО достигают максимума за весь анализируемый период. При этом на станции Кронштадт систематическая ошибка снижается, а станция ИЦП сохраняет стабильно низкие ошибки. На станции Пулково впервые появляются положительные ошибки (до 2 м/с) за счет чего на станции наблюдается наименьшее среди всех месяцев систематическое занижение.

На основании проведённого анализа ошибок модели относительно точек станций наблюдений можно сформулировать следующие **выводы** касательно набора станций для оценки качества прогноза городских аномалий метеорологических условий. Для оценки **ГОТ** в январе и октябре целесообразно использовать все доступные данные наблюдений, поскольку пространственная структура ошибок температуры в эти месяцы характеризуется 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. Оценка качества прогноза **отрицательной аномалии относительной влажности** существенно ограничена 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 составляет станция Шлиссельбург во все месяцы и станция Ломоносов октябре.

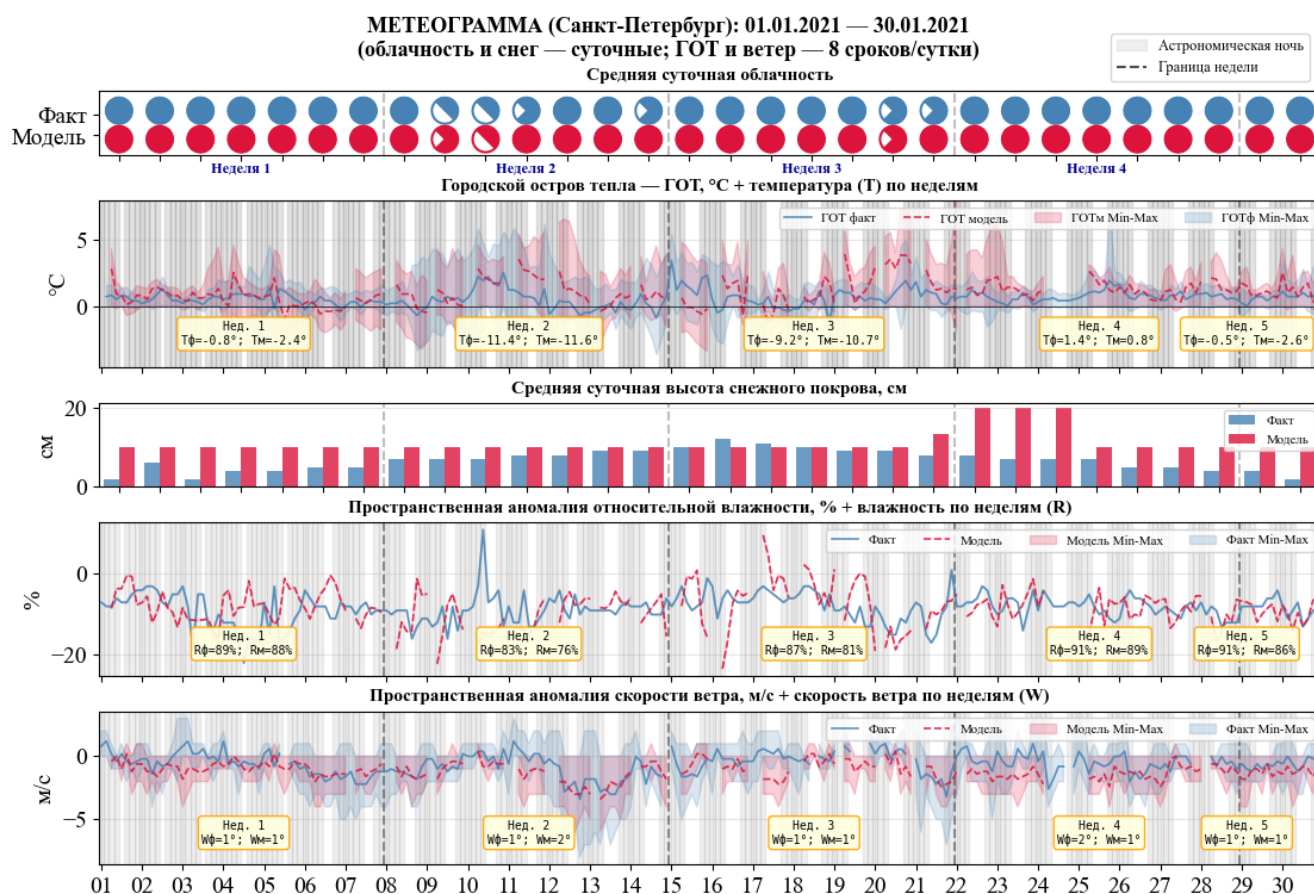


Рисунок 4.3.5 – Сопоставление аномалий городского метеорологического режима по данным наблюдений и по данным эксперимента с моделью ВЕР_ВЕМ за январь 2021 г.

В январе среднемесячная интенсивность ГОТ по данным численного эксперимента составила $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, по данным наблюдений она равнялась $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Анализ метеограммы (**Рисунок 4.3.5**) показал, что, за исключением первой недели, прогностические средние и максимальные значения интенсивности ГОТ были завышены, а также диапазон $\text{ГОТ}_{\text{м-мин-макс}}$ оказался шире фактического. Наибольшее завышение отмечалось при низких температурах во вторую и третью недели, когда вклад антропогенного потока тепла в интенсивность ГОТ должен был быть наибольшим. Прогностическая температура в городе (по данным станции ИЦП) оставалась ниже фактической на протяжении всего месяца. В поле относительной влажности с применением новой параметризации городского подслоя было достигнуто улучшение: среднемесячная интенсивность острова сухости совпала с фактической и составила -8% . Вместе с тем относительная влажность в городе была занижена относительно данных ИЦП (в первую неделю на 1% , во вторую – на 7% , в третью – на 6% , в четвёртую – на 2%). Аномалия скорости ветра в численном эксперименте оставалась стабильно отрицательной: занижение ветра составляло $-1,1\text{ м/с}$ при наблюдаемых $-0,6\text{ м/с}$. Однако благодаря новой параметризации скорость ветра в городе практически во все недели совпадала с наблюдаемой: прогноз скорости ветра на станции ИЦП соответствовал фактическим значениям в первую и третью недели, а во вторую и

четвёртую расхождение не превышало 1 м/с.

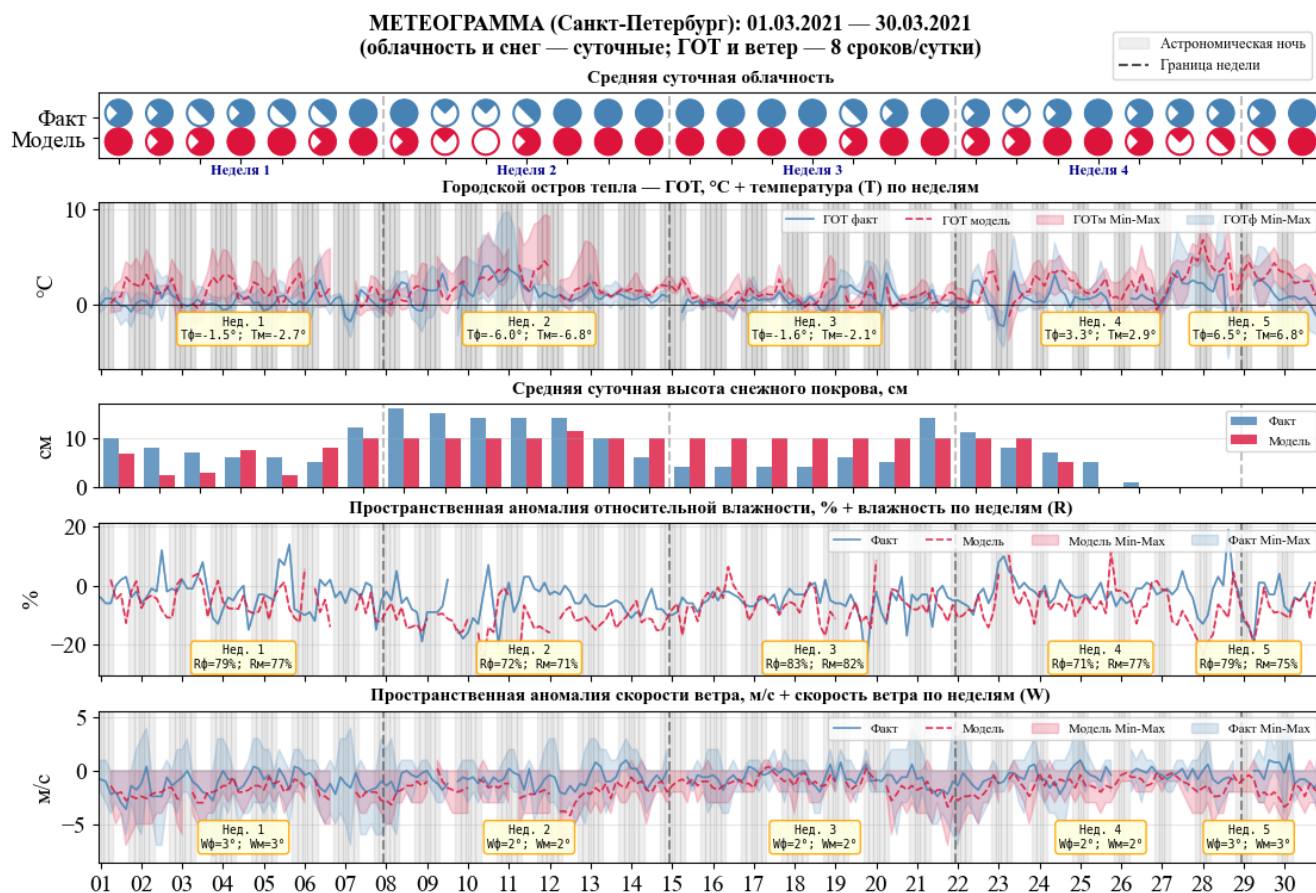


Рисунок 4.3.6 – Сопоставление аномалий городского метеорологического режима по данным наблюдений и по данным эксперимента с моделью ВЕР_ВЕМ за март 2021 г.

В марте (**Рисунок 4.3.6**) картина прогноза интенсивности ГОТ оказалась схожей с январём: среднемесячная интенсивность ГОТ в численном эксперименте была выше наблюдаемой (1,7 °С при 0,8 °С по наблюдениям), диапазон экстремальных значений ГОТ оказался шире фактического, а максимальная интенсивность ГОТ была завышена. Отклонения прогностической температуры на станции ИЦП, в отличие от января, уменьшились: разница более 1 °С наблюдалась в первую неделю марта, а к концу месяца она сократилась до величины менее 0,5 °С. Среднемесячная интенсивность острова сухости в этом месяце оказалась выражена сильнее фактической (−7 % при −4 % по наблюдениям). Разница прогноз-факт относительной влажности на станции ИЦП сократилась по сравнению с январём: в большинстве недель влажность по данным модели была ниже на 1..2 %, за исключением четвертой недели, когда расхождение достигло 6 %. Аномалия скорости ветра по-прежнему оставалась отрицательной и была выражена сильнее в численном эксперименте (среднемесячные значения составили −1,6 м/с при −0,8 м/с по наблюдениям). В первые три недели диапазон отрицательных значений аномалии хорошо совпадал с фактическим, однако ситуации, когда скорость ветра в городе превышала значения на загородных станциях, в

численном эксперименте практически отсутствовали, тогда как по данным наблюдений такие случаи происходили в ночное время достаточно регулярно. Средняя скорость ветра на станции ИЦП в прогнозе была идентична фактической.

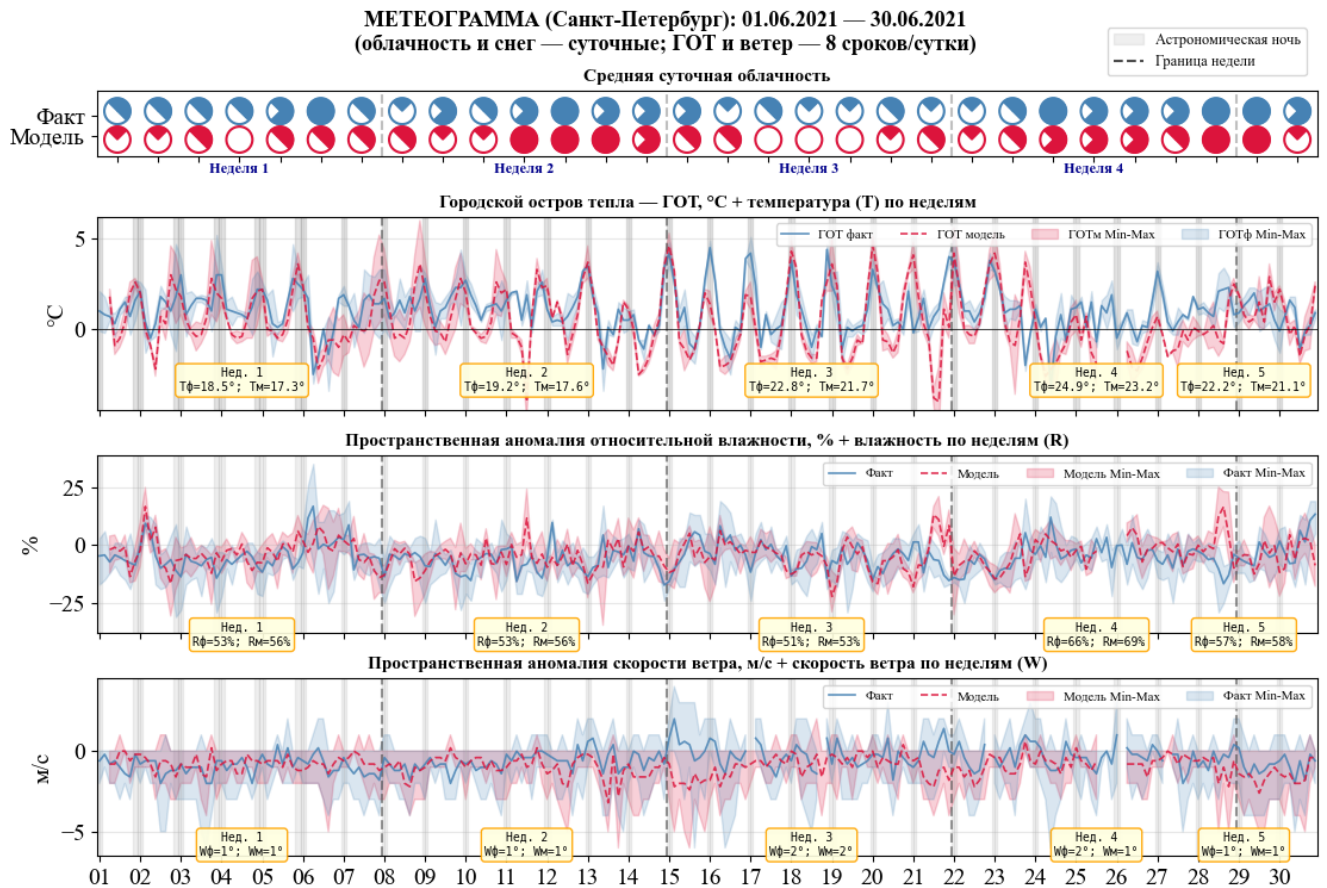


Рисунок 4.3.7 – Сопоставление аномалий городского метеорологического режима по данным наблюдений и по данным эксперимента с моделью ВЕР_ВЕМ за июнь 2021 г.

В июне (**Рисунок 4.3.7**) средняя интенсивность ГОТ неожиданно оказалась ниже фактической ($0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ при наблюдаемых $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$). При этом максимумы ГОТ в численном эксперименте были воспроизведены достаточно корректно как в диапазоне средних, так и в диапазоне максимальных значений. Ошибка была связана с достаточно сильным выхолаживанием в численном эксперименте в середине дня: в фактических данных также присутствовали минимумы ГОТ днем, однако они находились около нуля или были на $1..2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже, тогда как в численном эксперименте выхолаживание оказалось примерно на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ сильнее. В конце третьей недели этот дневной эффект проявился особенно заметно и был связан с тем, что численный эксперимент не воспроизвёл «остров сухости», а напротив, дал дневной «остров влажности» в городе интенсивностью около 15% . Аналогичная ситуация произошла и в конце четвёртой недели, однако в этом случае ошибка в поле влажности не повлияла на прогноз ГОТ так сильно, как в конце третьей недели. Что касается городской аномалии влажности в целом, то в июне

среднемесячные значения её интенсивности в численном эксперименте и по данным наблюдений оказались близки (-4% при -5% по наблюдениям). Значение влажности на станции ИЦП на этот раз было выше, чем в численном эксперименте, во все недели, однако разница составляла лишь $2..3\%$. Прогностическая аномалия скорости ветра по-прежнему оставалась отрицательной и была выражена сильнее наблюдаемой (среднемесячные значения составили $-0,9$ м/с при наблюдаемых $-0,6$ м/с). В большинстве случаев диапазон отрицательных значений прогностической аномалии хорошо совпадал с фактическим, однако в третью неделю фактическая аномалия приобрела положительные значения фактической аномалии не были воспроизведены моделью, как и в эксперименте с простой параметризацией городского подслоя.

Средняя прогностическая скорость ветра на станции ИЦП была идентична фактической.

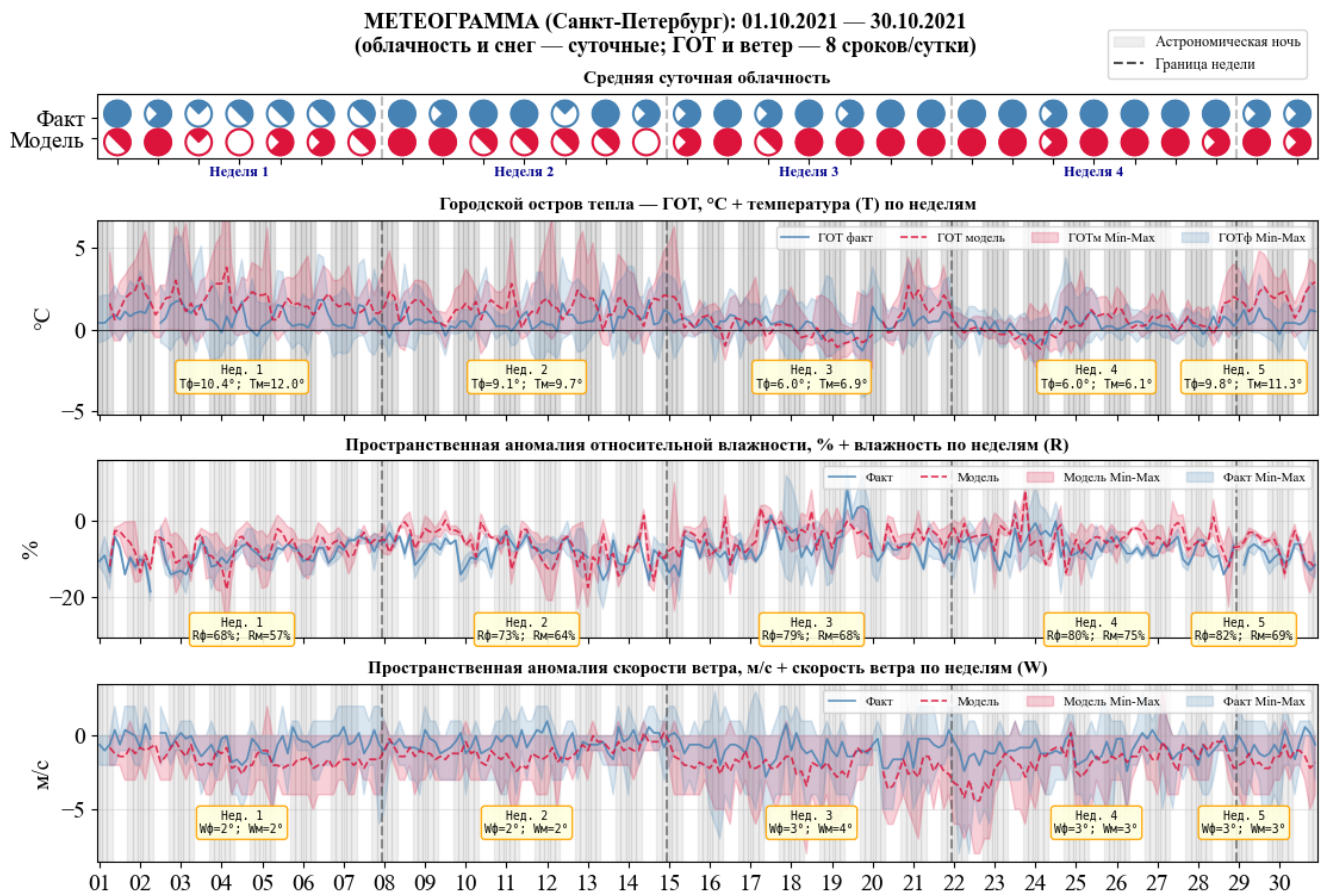


Рисунок 4.3.8 – Сопоставление аномалий городского метеорологического режима по данным наблюдений и по данным эксперимента с моделью ВЕР_ВЕМ за октябрь 2021 г.

В октябре (**Рисунок 4.3.8**) среднемесячная интенсивность ГОТ по данным численного эксперимента вновь превосходила фактическую ($1,0$ °C при $0,5$ °C по наблюдениям). В первую и во вторую недели ночной ГОТ в численном эксперименте был ярко выражен, тогда как по фактическим данным он отсутствовал, и его максимальная интенсивность приходилась на дневные часы. Температура в численном эксперименте на станции ИЦП в этот период превышала

фактическую, особенно в первую неделю, когда разница достигала 1,5 °С. В третью и четвертую недели суточный ход интенсивности ГОТ пришёл в согласие с фактическими результатами, хотя в конце третьей недели и в конце месяца средние и максимальные значения интенсивности ГОТ в численном эксперименте оставались выше фактических. Среднемесячная интенсивность острова сухости по данным численного эксперимента оказалась ниже фактической (–6 % при наблюдаемых –8 %). Лучшее всего прогностическая интенсивность аномалии соответствовала фактической в первую неделю, затем интенсивность острова сухости начала занижаться в численном эксперименте. Так с конца третьей недели и до конца месяца численный эксперимент давал менее выраженный остров сухости, чем наблюдался по факту практически во все сроки. Аномалия скорости ветра по-прежнему оставалась отрицательной и была выражена сильнее в прогнозе (среднемесячные значения составили –1,6 м/с при –0,7 м/с по наблюдениям). Ситуации, когда скорость ветра в городе превышала значения на загородных станциях, в прогнозе практически отсутствовали. В первую неделю диапазон отрицательных значений аномалии по прогнозу был шире, чем по факту, далее диапазоны начали хорошо совпадать. Средняя прогностическая скорость ветра на станции ИЦП была идентична фактической, за исключением третьей недели, когда разница составила 1 м/с.

4.3.3. Верификация результатов моделирования температуры подстилающей поверхности по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ)

Проблема ограниченности стационарных наблюдений является одним из ключевых методологических вызовов в области городской климатологии. Метеорологические станции сети, как правило, располагаются за пределами городов или на их окраинах, что не позволяет в полной мере отразить климатические особенности урбанизированных территорий, а также создает существенный пробел в данных, необходимых для анализа и верификации результатов численного моделирования.

В настоящее время в Санкт-Петербурге функционирует 1 метеорологическая станция, полностью соответствующая стандартам наблюдений, установленным в соответствующих наставлениях [Наставление., 1985]. На этом фоне важным источником данных наблюдений служат спутниковые измерения. Для анализа результатов численных экспериментов с моделью городского подسоя можно использовать множество доступных спутниковых продуктов, поскольку влияние урбанизации на нижнюю атмосферу проявляется в модификации целого ряда метеорологических полей: температуры воздуха и деятельного слоя почвы, влажности, скорости и направления ветра, характеристик осадков и др. Наиболее целесообразным представляется сопоставление смоделированных и спутниковых данных о температуре подстилающей поверхности (Land Surface Temperature, LST). Спутниковые измерения LST основаны на прямой

регистрации уходящего теплового излучения поверхности в инфракрасном диапазоне спектра, что обеспечивает физически обоснованную оценку температурного поля с пространственным разрешением, достаточным для наблюдения внутригородских контрастов. Тогда как, получение температуры воздуха и осадков требует косвенного восстановления из данных ДЗЗ, поля влажности (водяной пар в столбе воздуха) в ночные часы имеют более грубое разрешение в сравнении с LST, а измерение ветра по спутникам доступно только над водной поверхностью. С точки зрения численного моделирования, выбор LST тоже удачен, поскольку в схеме ВЕР_ВЕМ температура подстилающей поверхности является диагностической переменной, непосредственно рассчитываемой схемой городского подслоя на основе уравнения теплового баланса.

Для исследования эффектов влияния застройки такого крупного мегаполиса, как Санкт-Петербург, на метеорологические поля приоритетное значение имеет **временное разрешение данных**, поскольку пространственные масштабы этих эффектов достаточно велики. Указанному требованию в наибольшей степени отвечают данные спектрорадиометра MODIS, установленного на борту спутника Terra. Данный прибор осуществляет съёмку земной поверхности в 36 спектральных каналах с длиной волны от 0,4 до 14,4 мкм и пространственным разрешением от 250 м до 1 км. Над территорией Санкт-Петербурга спутник выполняет в среднем 4 пролёта в сутки, что обеспечивает высокую периодичность наблюдений.

Для верификации использован продукт MOD11_L2 версии 6.1, содержащий данные о температуре и излучательной способности поверхности суши с пространственным разрешением 1000 м и 5-минутным временным интервалом формирования спутниковых сцен. Продукт создаётся с применением обобщённого алгоритма разделённого окна (Wan and Dozier, 1996) и относится к уровню обработки L2, что означает сохранение исходной геопривязки без дополнительных пространственных или временных преобразований. При формировании продукта используются данные о яркостной температуре MODIS (MOD021KM), о классификации землепользования (MOD12Q1) и снежного покрова (MOD10_L2) а также данные о геолокации (MOD03) и об облачной маске (MOD35_L2). Последние два типа данных служат для маскирования облачных пикселей и водных поверхностей.

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). Данный показатель был первоначально разработан для оценки прогнозов осадков [Roberts and Lean, 2008] и продолжает успешно применяться для этих целей в настоящее время [Муравьев и др., 2022; Муравьев, Киктев, 2024]. Применительно к оценке качества прогноза осадков наиболее ценными особенностями FSS являются вероятностный характер самой оценки и возможность выделения пространственных масштабов «полезного» прогноза. Результаты оценок прогнозов различной заблаговременности интерпретируются в терминах полезности прогноза и практической предсказуемости явления определённой интенсивности.

В случае применения FSS для верификации прогностических полей температуры подстилающей поверхности можно выделить следующие наиболее важные особенности метода. Во-первых, метод обеспечивает учёт ошибки пространственного смещения, то есть толерантен к небольшим сдвигам прогнозируемых тепловых аномалий относительно наблюдаемых. Во-вторых, метод позволяет учитывать масштаб аномалий LST и определять пространственный масштаб, на котором прогноз становится полезным. В-третьих, метод обладает гибкостью в отношении пороговых значений: пороги температуры для спутниковых и прогностических данных могут различаться, однако объекты, выделенные с помощью этих порогов, представляют один и тот же физический смысл – области повышенного прогрева. Выделение нескольких порогов дает возможность дифференцированной оценки мастерства прогноза для территорий с различной степенью урбанизации. Следует отметить, что установить зависимость мастерства прогноза от заблаговременности в данной реализации метода не представляется возможным ввиду ограниченного количества спутниковых снимков и их нерегулярности во времени.

Алгоритм расчета. Поля LST представлены массивами размерностью 68×152 ячейки, покрывающими территорию Санкт-Петербурга и окрестностей. Область анализа ограничена координатами от 59.62° до 60.22° с. ш. и от 29.46° до 30.82° в. д. 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, то есть $LCZ = 5$ и $LCZ = 2$;

3. LST_2 – средняя температура только в ячейках, классифицированных как компактные среднеэтажные, то есть $LCZ = 2$.

Трансформация в бинарное поле выполняется следующим образом: если температура в данной ячейке равна или превышает пороговое значение, ей присваивается значение 1 (0 в противном случае). Окрестность ячейки представляет собой **квадратное окно** со стороной n ячеек сетки, где рассматриваемая ячейка располагается в центре окрестности. По этой причине сторона окрестности состоит из нечётного числа ячеек. В данном исследовании минимальная длина стороны окна составляет 1 км, что соответствует одной ячейке. Плотность ячеек (P) с температурой, равной или превышающей порог, в окрестности определяется как отношение числа ячеек со значением 1 к общему числу ячеек в окрестности.

Среднеквадратическая ошибка между прогнозируемыми (P_{frct}) и наблюдаемыми (P_{obs}) плотностями (Fractions Brier Score, FBS) рассчитывается по всем ячейкам N как

$$FBS = \frac{1}{N} \sum_N (P_{frct} - P_{obs})^2 \quad (4.1)$$

Наихудшая возможная ошибка (WE) определяется

$$WE = \frac{1}{N} [P_{frct}^2 + P_{obs}^2] \quad (4.2)$$

Итоговое значение FSS вычисляется как

$$FSS = 1 - \frac{FBS}{WE} \quad (4.3)$$

Значения FSS изменяются в диапазоне от 0 до 1, где 1 соответствует идеальному прогнозу с полным совпадением пространственных структур, а 0 означает отсутствие мастерства прогноза. Прогноз считается полезным при значениях FSS выше 0,5.

При размере окрестности, равном единичной ячейке P может принимать только значения 0 или 1, что соответствует попиксельному сравнению. При увеличении размера окрестности появляются промежуточные значения P , уменьшается количество ячеек с крайними значениями плотности, а поле плотностей становится более сглаженным. Метод при этом становится более толерантным к ошибкам пространственного смещения (*Рисунок 4.3.9*).

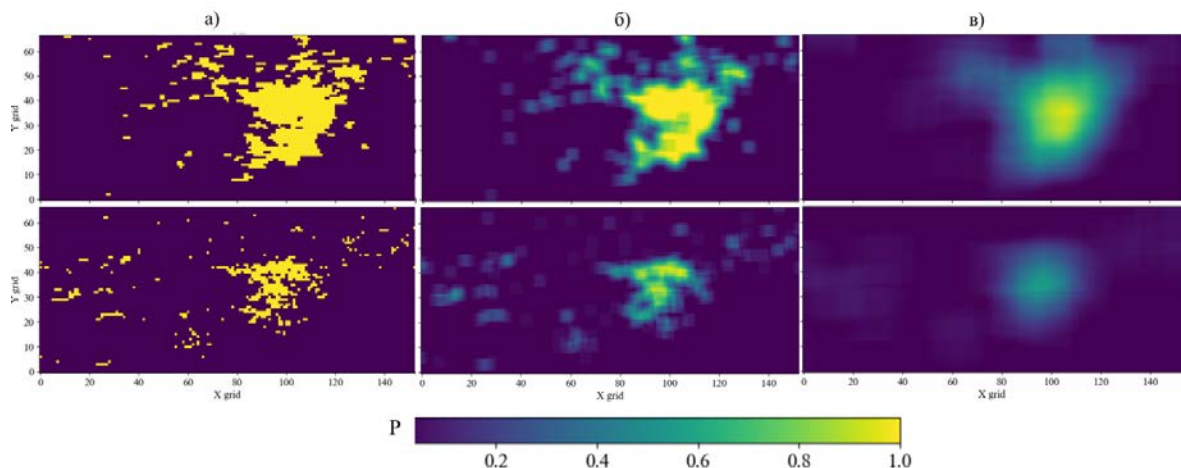


Рисунок 4.3.9 – Распределение плотности ячеек с температурой поверхности не менее 26 °С в зависимости от длины стороны окна: а) 1 км, б) 5 км, в) 21 км. Данные приведены за 8 июня 2021 г., 09:00 ВСВ. Верхний ряд: значения, рассчитанные по спутниковому снимку; нижний ряд – по смоделированным данным.

Для определения оптимального размера окрестности 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, что в совокупности составило 189 значений FSS (27 сроков × 7 размеров окна). Полученные значения были осреднены за выбранный период, после чего был построен график зависимости осреднённого FSS от размера окна (**Рисунок 4.3.10**).

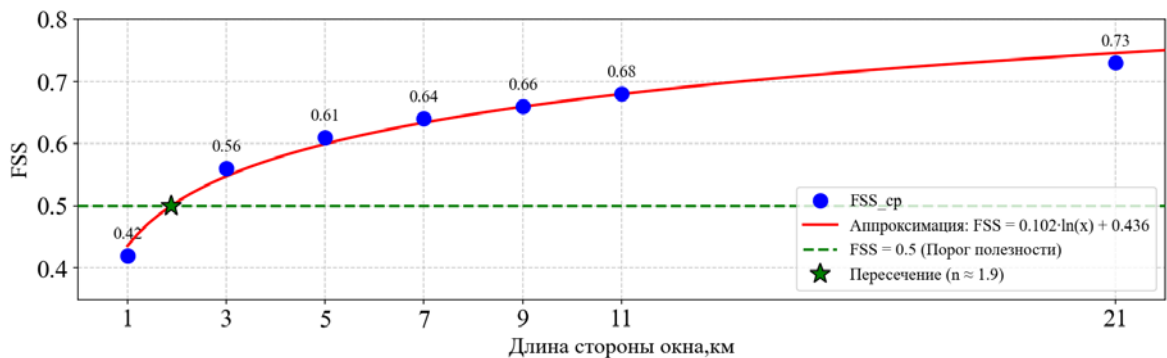


Рисунок 4.3.10 – Зависимость оценки мастерства прогноза LST от размеров окрестности

Анализ графика показывает, что с увеличением размера окрестности значение FSS возрастает нелинейно. Наилучшим образом экспериментальные данные удалось аппроксимировать логарифмической зависимостью вида

$$FSS = 0,102 \times \ln(NS) + 0,436 , \quad (4.4)$$

где NS – длина стороны окна в километрах.

Согласно уравнению (4.4), свободный член 0,436 близок к пороговому значению полезности прогноза (0,5), что свидетельствует о достаточно высоком качестве пространственного согласования модельных и спутниковых полей LST даже без учёта допустимого смещения. Коэффициент при логарифме 0,102 характеризует скорость роста мастерства прогноза с увеличением размера окрестности. Его относительно небольшое значение указывает на умеренную чувствительность FSS к изменению пространственного масштаба осреднения. Это означает, что основной вклад в качество прогноза обеспечивается уже на малых масштабах, а дальнейшее увеличение размера окна приводит лишь к постепенному улучшению согласованности полей. 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 4.3.11*).

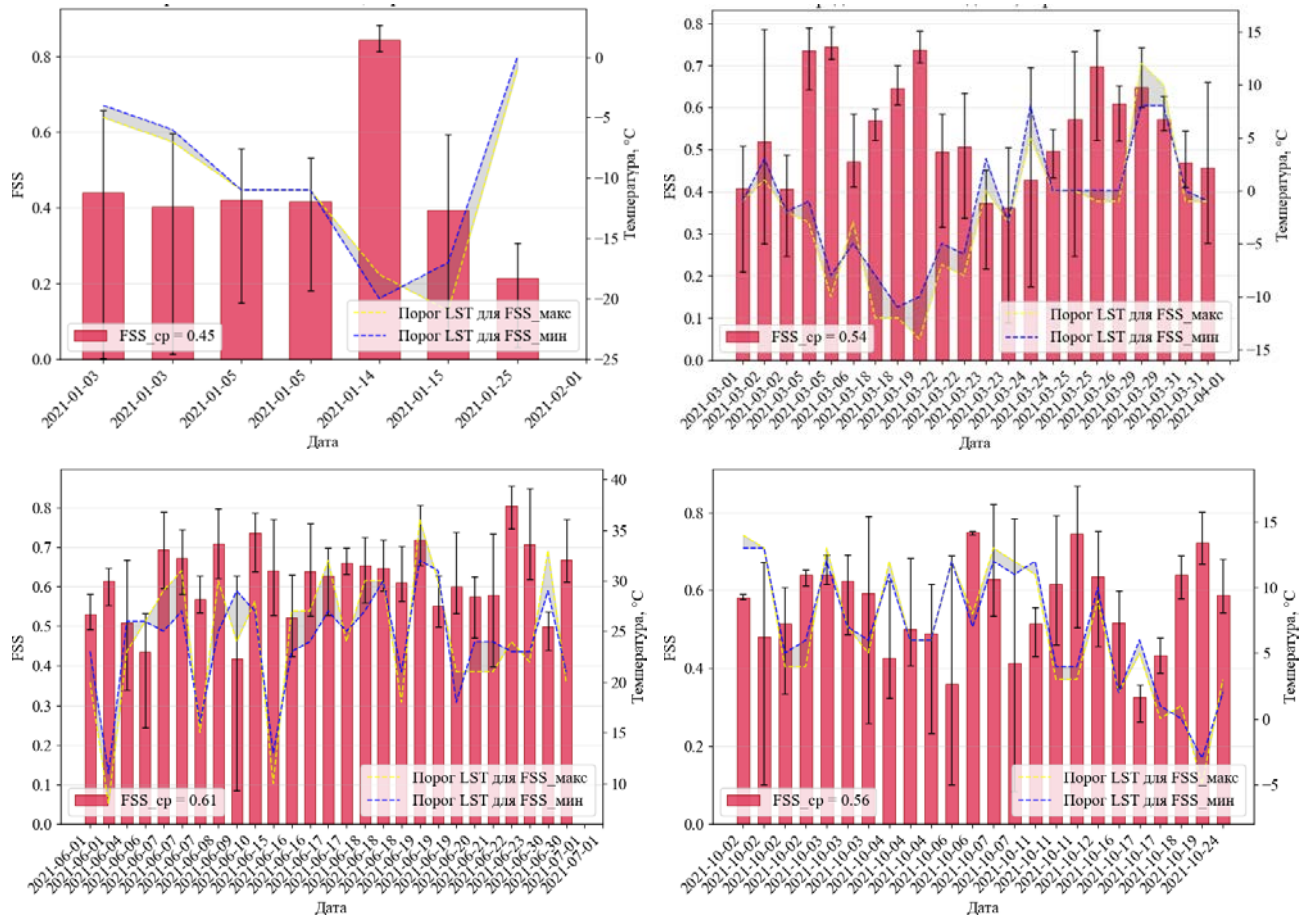


Рисунок 4.3.11 – Временной ход показателя FSS при размере длины стороны окна 5 км

Подробный анализ графиков FSS для размера окна 5 км при пороговых значениях LST_{urb} , $LST_{5,2}$ и LST_2 проведен для марта, июня и октября 2021 (*Рисунок 4.3.11*). Наилучшее качество прогноза пространственной структуры полей LST наблюдалось в июне, тогда как в переходные сезоны мастерство прогноза было несколько ниже, хотя и превышало пороговое значение полезности. В марте минимальное значение среднего для трех порогов FSS (далее FSS₃) составило 0,36 (24 марта, утро), максимальное было равным 0,75 (5 марта, ночь). Из 22 доступных сроков наблюдений в 12 случаях (55 %) средний FSS превышал порог полезности 0,5. В июне диапазон значений FSS₃ составил от 0,42 до 0,8, при этом порог полезности превышен в 24 случаях из 27 (89 %). В октябре минимальное значение FSS₃ равно 0,33 (17 октября, утро), максимальное составило 0,75 (6 октября, вечер), а порог полезности преодолен в 15 случаях из

24 (63 %). Июнь характеризовался не только наибольшим средним FSS, но и наименьшей разницей между средними значениями максимального и минимального FSS₃ (0,20), тогда как в марте и октябре эта разница составляет 0,24 и 0,28 соответственно. Это свидетельствует о более стабильном мастерстве прогноза LST в летний период вне зависимости от выбранного порога температуры.

Анализ соотношения порогов для максимального и минимального FSS не выявляет устойчивой закономерности величины мастерства прогноза. Оно может снижаться как при высоких, так и при низких пороговых значениях. Тем не менее в марте в 8 случаях пороги совпадают, в октябре – в 6 случаях, а в июне совпадения величины пороговых значений отсутствуют. Снижение мастерства прогноза в марте и в октябре может быть связано с величиной температурного контраста. Для проверки этого предположения была проанализирована абсолютная разность между пороговыми значениями LST для минимального и максимального FSS:

$$\Delta LST = |\text{Порог LST для FSS}_{\text{мин}} - \text{Порог LST для FSS}_{\text{макс}}| \quad (4.5),$$

где ΔLST характеризует диапазон температур, в котором метод FSS демонстрирует чувствительность к пространственной структуре полей LST, равных или предвещающих пороговые значения.

В марте при $\Delta LST = 0$ средний FSS составляет 0,49 (в 6 из 8 случаев совпадения порогов средний FSS не превышает порога полезности 0,5); при $\Delta LST = 1..2 \text{ } ^\circ\text{C}$ – 0,53; при $\Delta LST = 3..4 \text{ } ^\circ\text{C}$ – 0,58; при $\Delta LST \geq 5 \text{ } ^\circ\text{C}$ – 0,66. В июне минимальная разность порогов составляет 1°C . При $\Delta LST = 1..2 \text{ } ^\circ\text{C}$ средний FSS равен 0,58; при $\Delta LST = 3..4 \text{ } ^\circ\text{C}$ – 0,63; при $\Delta LST \geq 5 \text{ } ^\circ\text{C}$ – 0,67. В октябре при $\Delta LST = 0$ средний FSS составляет 0,47; при $\Delta LST = 1^\circ\text{C}$ – 0,56; при $\Delta LST \geq 2^\circ\text{C}$ – 0,64. Таким образом, наблюдается устойчивая тенденция к улучшению качества прогноза с увеличением абсолютной разности порогов.

Совпадение порогов для максимального и минимального FSS характерно для случаев с однородным температурным полем, когда контраст между урбанизированными и природными территориями выражен слабо. В этих условиях пространственная структура городского острова тепла не проявляется достаточно чётко, что затрудняет как её идентификацию по спутниковым данным, так и воспроизведение в модели. Большая абсолютная разность порогов указывает на наличие выраженного температурного контраста с чёткой пространственной структурой. Именно в таких случаях модель демонстрирует наиболее высокое мастерство в воспроизведении пространственного распределения температуры подстилающей поверхности, и как следствие, более высокое и стабильное качество прогноза.

Выводы к главе 4

Анализ разностей ошибок прогноза между экспериментами с простой параметризацией урбанизированной поверхности и современной моделью городского подслоя ВЕР_ВЕМ (*Рисунок 3.5*), позволяет сделать следующие выводы.

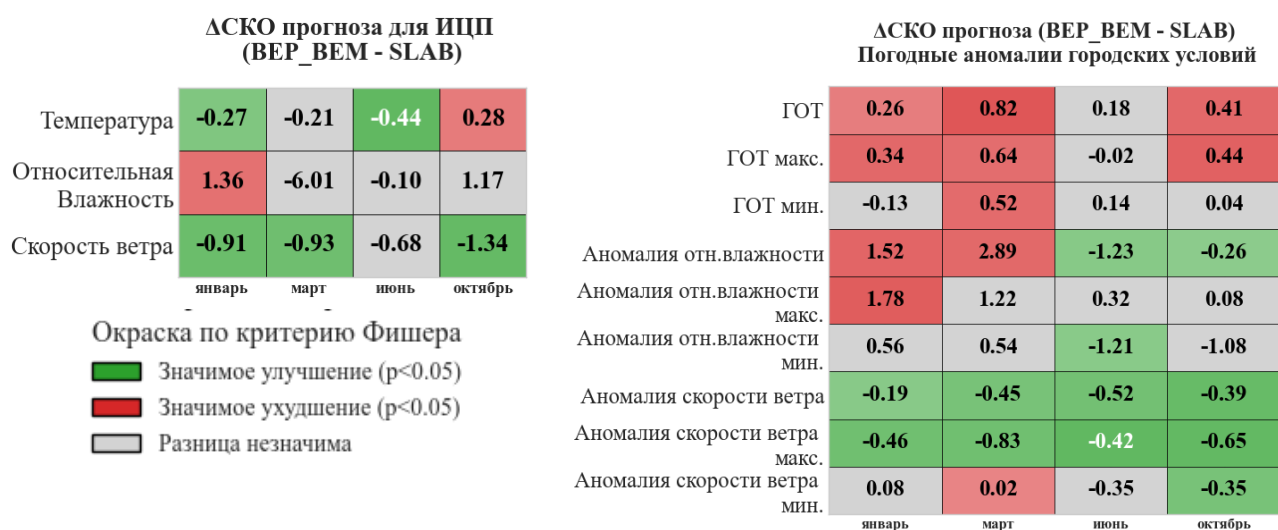


Рисунок 3.5 – Анализ разностей СКО прогнозов относительно наблюдений между экспериментами с многоуровневой моделью городского подслоя ВЕР_ВЕМ и простой параметризацией урбанизированной поверхности

Использование многоуровневой параметризации городского подслоя существенно изменяет отклик модели в полях приземных метеорологических величин по сравнению с простой параметризацией. 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 наблюдаемых 0,8 °С 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 воспроизведена многоуровневой 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. Для сравнения дисперсий результатов моделирования относительно данных наблюдений рассчитан критерий Фишера (F). Для интенсивности ГОТ дисперсия ошибки ВЕР_ВЕМ значимо превысила дисперсию SLAB в январе, марте и октябре ($F = 1,6..2,7$, $p < 0,01$), тогда как в июне различия не значимы. Для температуры на ИЦП различия значимы во все месяцы, кроме марта, в январе и июне дисперсия ВЕР_ВЕМ значимо ниже, чем в SLAB.

Городской остров сухости воспроизведён моделью с многоуровневой параметризацией городского подслоя наиболее корректно в январе (-8 %, совпадает с наблюдаемым) и июне (-4 %

при -5% по наблюдениям), тогда как в марте и октябре его интенсивность расходится с фактической. Наиболее заметное преимущество ВЕР_ВЕМ в воспроизведении относительной влажности на станции ИЦП проявилось в марте: среднее СКО прогноза уменьшилось на 6% по сравнению с результатом простой модели городского подслоя. В июне изменения СКО незначительны, а в январе и октябре СКО на станции ИЦП в многоуровневой модели оказалось даже на 1% выше. Критерий Фишера показал, что различия дисперсий ошибок прогноза относительной влажности на ИЦП не подтверждаются статистически во все месяцы, кроме января. 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 ($p < 0,05$) по критерию Фишера ($F = 1,4$ и $1,3$ соответственно). Минимумы аномалии влажности значимо лучше воспроизведены ВЕР_ВЕМ в июне ($F = 1,4$). 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).

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 при сопоставлении с данными наблюдений. Верификация пространственного распределения температуры подстилающей поверхности по спутниковым данным MODIS Terra показала, что конфигурация модели ВЕР_ВЕМ демонстрирует наилучшее мастерство прогноза в летний период (июнь), когда порог полезности FSS превышен в 89% случаев. В переходные сезоны мастерство прогноза снижается, что связано с ослаблением температурного контраста между урбанизированными и природными территориями и менее выраженной пространственной структурой городского острова тепла.

Для внедрения в практику ФГБУ «Северо-Западное УГМС» целесообразно использовать

конфигурацию мезомасштабной модели WRF-ARW с многоуровневой параметризацией ВЕР_ВЕМ и утонченными 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.

Заключение

По результатам решения поставленных задач:

1. выполнен анализ чувствительности прогностических полей к изменению параметров урбанизированной поверхности в модели деятельного слоя суши. Установлено, что днем наибольшее влияние на метеорологические элементы оказывают альbedo, шероховатость и влагосодержание, а ночью – шероховатость и тепловая инерция. Показано, что совместное влияние параметров подстилающей поверхности ночью выражено существенно сильнее, чем днем.
2. проведена верификация простой модели городского подслоя SLAB с уточненными параметрами урбанизированной поверхности. Установлено, что модель систематически занижает приземную температуру воздуха, завышает относительную влажность и переоценивает скорость приземного ветра. Сопоставление с наблюдениями показало, что SLAB недооценивает интенсивность городского острова тепла и переоценивает силу ослабления ветра в городской черте, а также не в полной мере воспроизводит наблюдаемую интенсивность городского острова сухости.
3. на основе анализа чувствительности установлено, что параметр шероховатости оказывает наибольшее влияние на приземные метеорологические поля, что обосновало необходимость детализации морфологических характеристик городской застройки. Вычислены значения ключевых параметров, характеризующих свойства застройки Санкт-Петербурга (распределение высот зданий, площадь застройки и доля непроницаемых поверхностей), и выполнена их интеграция в многоуровневую модель городского подслоя ВЕР_ВЕМ.
4. показано, что использование многоуровневой параметризации городского подслоя ВЕР_ВЕМ существенно изменяет отклик модели в полях приземных метеорологических величин по сравнению с простой схемой SLAB. Наиболее выраженный положительный эффект достигнут при прогнозе скорости ветра и ее аномалии в городской черте.
5. верификация температуры подстилающей поверхности по спутниковым данным MODIS Terra показала, что конфигурация модели ВЕР_ВЕМ демонстрирует наилучшее мастерство прогноза пространственного распределения температуры подстилающей поверхности в летний период. В переходные сезоны мастерство прогноза снижается, что связано с ослаблением температурного контраста между урбанизированными и природными территориями и менее выраженной пространственной структурой городского острова тепла.
6. установлено, что ВЕР_ВЕМ обладает большим потенциалом для воспроизведения городских метеорологических аномалий Санкт-Петербурга, однако качество их описания

зависит от сезона. Наибольшее улучшение достигнуто для городской аномалии ветрового режима, тогда как для городского острова тепла и острова сухости сохраняются сезонные расхождения с наблюдениями, что указывает на необходимость дальнейшего уточнения параметров городской среды.

Список сокращений и условных обозначений

АМС	– автоматическая метеорологическая станция
АПТ	– антропогенный поток тепла
АЧ	– анализ чувствительности прогностических полей к изменению параметров подстилающей поверхности в численной модели
ВДНХ	– Выставка достижений народного хозяйства
ВМО	– Всемирная метеорологическая организация
ВСВ	– всемирное скоординированное время
ГИС	– геоинформационная система
ГОТ	– городской остров тепла
ГПС	– городской пограничный слой
ГФО	– Главная физическая обсерватория
ДЗЗ	– дистанционное зондирование земли
ИЦП	– Информационный центр погоды
КАД	– кольцевая автомобильная дорога
КЗС	– комплекс защитных сооружений
ЛКЗ	– локальные климатические зоны
МГУ	– Московский государственный университет
МКАД	– Московская кольцевая автомобильная дорога
МСК	– московское время
ОГМС	– объединенная гидрометеорологическая станция
РГГМУ	– Российский Государственный Гидрометеорологический Университет
РСО	– разности сумм осадков
САО	– среднее абсолютное отклонение
СКО	– среднеквадратическое отклонение
СО	– среднее отклонение
СПб	– Санкт-Петербург
ТКЭ	– турбулентная кинетическая энергия
УГМС	– управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
(Ф)БГУ	– (федеральное) бюджетное государственное учреждение
ФКП	– Федеральное казённое предприятие
ВЕМ	– Building Energy Model – модель энергопотребления зданий
ВЕР	– Building Effect Parameterization – параметризация влияния зданий
COSMO	– Consortium for Small-scale Modeling – консорциум по мезомасштабному моделированию атмосферных процессов, и модель атмосферы, развиваемая данным консорциумом
COSMO-CLM	– COSMO Climate Limited-area Modelling – климатическая версия модели COSMO
COSMO-Ru	– Российская версия модели COSMO
ENVI-met	– Environmental Meteorology – численная модель микроклимата городской среды
GFS	– Global Forecast System – глобальная система численного прогноза погоды США
LES	– Large Eddy Simulation – метод крупных вихрей
LSM	– Land Surface Model – модель деятельного слоя суши

LUCY	– Large scale Urban Consumption of energy – модель потребления энергии в крупных городах
METROMEX	– Metropolitan Meteorological Experiment – метеорологический эксперимент по исследованию влияния урбанизации на атмосферу
MODIS IGBP	– Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer International Geosphere-Biosphere Programme – спектрорадиометр среднего разрешения для съемки поверхности Земли и облачности, а также международная программа исследования геосферы и биосферы
MYJ	– Mellor-Yamada-Janjić – параметризация планетарного пограничного слоя Мейлора-Ямады-Янича
NCEP	– National Centers for Environmental Prediction – Национальные центры прогнозирования окружающей среды США
RRTMG	– Rapid Radiative Transfer Model for GCMs – параметризация быстрого переноса излучения для глобальных климатических моделей
SLAB	– простая модель деятельного слоя суши, применяемая на ранних этапах воспроизведения влияния города на нижнюю тропосферу в WRF-ARW
SLUCM	– Single-Layer Urban Canopy Model – одноуровневая модель городского подслоя
ST	– индекс суммарного влияния по Соболю
SURY	– Semi-empirical URban canopY parameterization – полуэмпирическая параметризация городского покрова
TEB	– Town Energy Budget – модель энергетического баланса города
TERRA	– модель деятельного слоя суши в COSMO
TERRA_URB	– Urban version of TERRA – городская версия модели TERRA
UHIARC	– Urban Heat Island Arctic Research Campaign – кампания продолжительных экспериментальных измерений в городах Арктической зоны
WRF-ARW	– Weather Research and Forecasting - Advanced Research WRF – численная модель атмосферы
WUDAPT	– World Urban Database and Access Portal Tools – международная инициатива, направленная на сбор, стандартизацию и распространение данных о городских районах по всему миру
WUDAPT2WRF	– инструмент интеграции данных WUDAPT в модель WRF
YSU	– Yonsei University – схема параметризации пограничного слоя атмосферы

Список литературы

1. Александров Г.Г. Антропогенные потоки тепла в столичных агломерациях России и Китая / Г.Г. Александров, И.Н. Белова, А.С. Гинзбург // Доклады Академии наук. – 2014. – Т. 457, № 1. – С. 101-101.
2. Брусова Н.Е. Особенности режима осадков в Московском регионе в 2008–2017 гг. / Н.Е. Брусова, И.Н. Кузнецова, М.И. Нахаев // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2019. – № 1. – С. 127–142.
3. Бутаков Н.Ю. Оценка качества воспроизведения приземной температуры Санкт-Петербурга моделью WRF: выпускная квалификационная работа. – СПб., 2020. – 81 с.
4. Варенцов М.И. Особенности пограничного слоя атмосферы г. Надыма по данным экспериментальных измерений и вихререзающего моделирования / М.И. Варенцов, И.А. Репина, А.В. Глазунов, Т.Е. Самсонов, П.И. Константинов, В.М. Степаненко, В.Н. Лыкосов и др. // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2022. – № 6. – С. 64–78.
5. Варенцов М.И. Воспроизведение острова тепла Московской агломерации в рамках региональной климатической модели COSMO-CLM / М.И. Варенцов, Т.Е. Самсонов, А.В. Кислов, П.И. Константинов // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2017. – № 6. – С. 25-37.
6. Варенцов М.И. Вертикальная структура городского «острова тепла» по данным микроволнового дистанционного зондирования / М.И. Варенцов, В.П. Юшков, Е.А. Миллер, П.И. Константинов // Динамика и обменные процессы в атмосфере / под ред. О.Г. Чхетиани, М.Е. Горбунов, С.Н. Куличков, И.А. Репина. – Москва: ГЕОС, 2017. – С. 113-129.
7. Всемирная метеорологическая организация (ВМО). От заблаговременных предупреждений к заблаговременным действиям / ВМО. – Женева, 2020. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://wmo.int/ru/news/media-centre/doklad-o-sostoyanii-klimaticheskogo-obsluzhivaniya-v-2020-godu-ot-zablagovremennykh-preduprezhdeniy> (дата обращения: 25.04.2024).
8. Гинзбург А.С. Зависимость антропогенного потока тепла от температуры воздуха (на примере Санкт-Петербурга) / А.С. Гинзбург, И.А. Евсиков, В.А. Фролькис // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 57, № 5. – С. 526-538.
9. Глазунов А.В. Вихререзающее моделирование турбулентности в городской среде с упрощенной и реалистичной морфологиями поверхностей / А.В. Глазунов, Е.В. Мортиков, А.В. Дебольский, А.Д. Пашкин // Метеорология и гидрология. – 2025. – № 6. – С. 79–99.
10. Глазунов А.В. Масштабы длины турбулентности в городской среде и их связь со спектром флуктуаций скорости / А.В. Глазунов, Е.В. Мортиков, А.В. Дебольский // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2024. – Т. 394, № 4. – С. 58–77.

11. Глазунов А.В. Численное моделирование устойчиво стратифицированных турбулентных течений над городской поверхностью. Спектры и масштабы, параметризация профилей температуры и скорости / А.В. Глазунов // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2014а. – Т. 50, № 4. – С. 406–419.
12. Глазунов А.В. Численное моделирование устойчиво стратифицированных турбулентных течений над плоской и городской поверхностями / А.В. Глазунов // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2014б. – Т. 50, № 3. – С. 271–281.
13. Горбаренко Е.В. Аэрозольная мутность атмосферы в Москве в конце XX века / Е.В. Горбаренко // Метеорология и гидрология. – 2003. – № 7. – С. 13-18.
14. Горбаренко Е.В. Многолетние изменения аэрозольной оптической толщины атмосферы в России / Е.В. Горбаренко, А.Е. Ерохина, А.Б. Лукин // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 7. – С. 41-48.
15. Горлач И.А. Опыт исследования вертикальной структуры городского острова тепла на основе спутниковых данных / И.А. Горлач, А.В. Кислов, Л.И. Алексеева // Исследования Земли из космоса. – 2017. – № 4. – С. 36-46.
16. Горшенин А.К. Гибридные модели экстремального градиентного бустинга для восстановления пропущенных значений в данных об осадках / А.К. Горшенин, О.П. Мартынов // Информатика и ее применения. – 2019. – Т. 13, № 3. – С. 34-40.
17. Золина О.Г. Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России / О.Г. Золина, О.Н. Булыгина // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2016. – № 1. – С. 84-103.
18. Киктев Д.Б., Муравьев А.В., Бундель А.Ю. Методические рекомендации по верификации метеорологических прогнозов. М.: АМА ПРЕСС, 2021. 94 с.
19. Кислов А.В. «Остров тепла» московской агломерации и урбанистическое усиление глобального потепления / А.В. Кислов, М.И. Варенцов, И.А. Горлач, Л.И. Алексеева // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2017. – № 4. – С. 12-19.
20. Климат Ленинграда / под ред. Ц.А. Швер, Е.В. Алтыкиса, Л.С. Евтеевой. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 252 с.
21. Климат Москвы / под ред. А.А. Дмитриева, Н.П. Бессонова. – Л.: Гидрометеиздат, 1969.
22. Климат Санкт-Петербурга и его изменения / под ред. В.П. Мелешко, А.В. Мещерской, Е.И. Хлебниковой. – СПб.: ГУ «Главная геофизическая обсерватория», 2010.
23. Кузнецова И. Н. Городской остров тепла в Москве: определение, границы, изменчивость / И. Н. Кузнецова, Н. Е. Брусова, М. И. Нахаев // Метеорология и гидрология. – 2017. – № 5. – С. 49-61.
24. Ладохина Е.М. Определение периодов максимальной интенсивности острова тепла в Санкт-

- Санкт-Петербурге для валидации модели численных прогнозов погоды в городе / Е.М. Ладохина, К.Г. Рубинштейн, В.Ю. Цепелев // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2020. – № 2. – С. 109-125.
25. Ладохина Е.М. Анализ влияния мегаполиса Санкт-Петербург на осадки и ветер для валидации численного прогноза погоды / Е.М. Ладохина, К.Г. Рубинштейн // Оптика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 34, № 1. – С. 36-45.
26. Ладохина Е.М. Чувствительность численного прогноза метеорологических полей к изменению параметров, характеризующих урбанизированную поверхность Санкт-Петербурга / Е.М. Ладохина, К.Г. Рубинштейн, А.В. Кулюшина // Оптика атмосферы и океана. – 2022. – Т. 35, № 11. – С. 932-943.
27. Ладохина Е.М. Комплексный анализ чувствительности прогностических полей к изменению параметров подстилающей поверхности Санкт-Петербурга / Е.М. Ладохина // Метеорология и гидрология. – 2025. – № 1. – С. 70-81.
28. Ландсберг Г.Е. Климат города / Г.Е. Ландсберг. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 248 с.
29. Локощенко М.А. О высотной протяженности городского "острова тепла" над Москвой / М.А. Локощенко, И.А. Корнева, А.В. Кочин, А.З. Дубовецкий, М.А. Новицкий, П.Е. Разин // Доклады Академии наук. – 2016. – Т. 466, № 2. – С. 213-213.
30. Лучицкая И.О. Климат Новосибирска и его изменения / И.О. Лучицкая, Н.И. Белая, С.А. Арбузов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014.
31. Марчук Г.И. Численные методы в прогнозе погоды / Г.И. Марчук. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1967. – 356 с.
32. Матвеев Л.Т. Облака и вихри-основа колебаний погоды и климата / Л.Т. Матвеев, Ю.Л. Матвеев. – Российский государственный гидрометеорологический университет, 2013.
33. Менжулин Г.В. Комплексная методика расчета и оценки нарушений естественного климатического режима в мегаполисе Санкт-Петербург / Г.В. Менжулин, А.А. Павловский // Ученые записки РГГМУ. – 2016. – № 43. – С. 154-173.
34. Мостаманди С.В. Развитие технологий сверхкраткосрочных и краткосрочных прогнозов опасных метеорологических явлений на основе анализа данных наблюдений и результатов численного прогноза гидродинамической модели WRF / С.В. Мостаманди, И.А. Тарабукин, Е.В. Дорофеев // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – 2015. – № 579. – С. 178-204.
35. Муравьев А. В., Киктев Д. Б. Качество, предсказуемость и полезность в задачах радиолокационного наукастинга осадков // Метеорология и гидрология. – 2024. – № 7. – С. 93.
36. Муравьев А. В., Бундель А. Ю., Киктев Д. Б., Смирнов А. В. Опыт пространственной

- верификации радиолокационного наукастинга осадков: определение и статистика объектов, ситуаций и условных выборок // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2022. – № 2. – С. 384.
37. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам / Гос. ком. СССР по гидрометеорологии и контролю природ. среды. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985.
38. Оке Т.Р. Климат пограничного слоя / Т.Р. Оке. – Л.: Гидрометеоиздат, 1982.
39. Покровская Т.В. Климат Ленинграда и его окрестностей / Т.В. Покровская, А.Т. Бычкова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1967.
40. Рубинштейн К.Г. Оценки изменения температуры воздуха и количества осадков в крупных городах (на примере Москвы и Нью-Йорка) / К.Г. Рубинштейн, А.С. Гинзбург // Метеорология и гидрология. – 2003. – № 2. – С. 29–38.
41. Сальтелли А. Анализ чувствительности нелинейных математических моделей: численные опыты / А. Сальтелли, И.М. Соболев // Математическое моделирование. – 1995. – Т. 7, № 11. – С. 16-28.
42. Самсонов Т.Е. Определение параметров городской среды Московского мегаполиса для детализированного численного прогноза погоды в рамках модели COSMO / Т.Е. Самсонов, М.И. Варенцов // Метеорология и гидрология. – 2020. – № 7. – С. 112-119.
43. Смирнова М.М. Оценка воспроизведения региональной моделью характеристик пограничного слоя атмосферы / М.М. Смирнова, К.Г. Рубинштейн, В.П. Юшков // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 12. – С. 5-16.
44. Тарасова М. А., Варенцов М. И., Степаненко В. М. Параметризации взаимодействия атмосферы с городской поверхностью: обзор и перспективы развития // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2023. – Т. 59, № 2. – С. 127–148.
45. Торопова М.Л. Воспроизведение стратификации атмосферы с целью прогноза конвективных явлений при помощи мезомасштабной модели WRF-ARW / М.Л. Торопова, И.Н. Русин // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – 2019. – № 593. – С. 160-176.
46. Фролькис В.А. Моделирование антропогенного потока тепла в течение отопительного периода на примере Санкт-Петербурга / В.А. Фролькис, И.А. Евсиков // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве. – 2022.
47. Чернавская М.М. Тренд температуры воздуха некоторых крупнейших городов СССР / М.М. Чернавская // Известия АН СССР. Серия географическая. – 1985. – № 3. – С. 94.
48. Швер Ц.А. Атмосферные осадки на территории СССР / Ц.А. Швер. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. – 304 с.
49. Allen L. Global to city scale urban anthropogenic heat flux: model and variability / L. Allen, F.

- Lindberg, C.S.B. Grimmond // *International Journal of Climatology*. – 2011. – Vol. 31, № 13. – P. 1990.
50. Allen S.M. Extreme cold weather alerts in Toronto, Ontario, Canada and the impact of a changing climate / S.M. Allen, W.A. Gough, T. Mohsin, B.Y. Tam // *Urban Climate*. – 2014. – Vol. 8. – P. 21-29.
 51. Alexandrov G.G. Anthropogenic impact of Moscow district heating system on urban environment / G.G. Alexandrov, A.S. Ginzburg // *Energy Procedia*. – 2018. – Vol. 149. – P. 161-169.
 52. Au S.K. Estimation of small failure probabilities in high dimensions by subset simulation / S.K. Au, J.L. Beck // *Probabilistic Engineering Mechanics*. – 2001. – Vol. 16, № 4. – P. 263-277.
 53. Avgoustoglou E. Design and evaluation of sensitivity tests of COSMO model over the Mediterranean area / E. Avgoustoglou, A. Voudouri, P. Khain [et al.] // *Perspectives on Atmospheric Sciences*. – Springer Atmospheric Sciences, 2017. – P. 49-54.
 54. Baki H. A sensitivity study of WRF model microphysics and cumulus parameterization schemes for the simulation of tropical cyclones using GPM radar data / H. Baki, S. Chinta, C. Balaji, B. Srinivasan // *Journal of Earth System Science*. – 2021. – Vol. 130. – P. 1-30.
 55. Baklanov A. Meteorological and air quality models for urban areas / A. Baklanov, S. Grimmond, A. Mahura, M. Athanassiadou (Eds.) // *Springer Science & Business Media*. – 2009. – 323 p.
 56. Baklanov A. Integrated urban services: Experience from four cities on different continents / A. Baklanov, B. Cárdenas, T. C. Lee, S. Leroyer, V. Masson, L. T. Molina, T. Müller, C. Ren, F. R. Vogel, J. A. Voogt // *Urban Climate*. – 2020. – Vol. 32. – 100610.
 57. Barlage M. Impact of physics parameterizations on high resolution weather prediction over two Chinese megacities / M. Barlage, S. Miao, F. Chen // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2016. – Vol. 121, № 9. – P. 4487-4498.
 58. Bellprat O. Objective calibration of regional climate models / O. Bellprat, S. Kotlarski, D. Luthi, C. Schar // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2012. – Vol. 117, № D23115.
 59. Berardi U. The effect of a denser city over the urban microclimate: The case of Toronto / U. Berardi, Y. Wang // *Sustainability*. – 2016. – Vol. 8, № 8. – P. 822.
 60. Changnon Jr S.A. METROMEX: An investigation of inadvertent weather modification / S.A. Changnon Jr, F.A. Huff, R.G. Semonin // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 1971. – Vol. 52, № 10. – P. 958-968.
 61. Manabe S. Climate and the ocean circulation: I. The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface / S. Manabe // *Monthly Weather Review*. – 1969. – Vol. 97, № 11. – P. 739-774.
 62. Pitman A.J. The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models / A.J. Pitman // *International Journal of Climatology*. – 2003. – Vol. 23, № 5. – P. 479-510.
 63. Deardorff J.W. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a

- layer of vegetation / J.W. Deardorff // *Journal of Geophysical Research: Oceans.* – 1978. – Vol. 83, № C4. – P. 1889-1903.
64. Chen F. Development and application of land-surface models for mesoscale atmospheric models: Problems and Promises / F. Chen, R. Pielke Sr., K. Mitchell // *Observation and Modeling of the Land Surface Hydrological Processes* / ed. by V. Lakshmi, J. Alberston, J. Schaake. – American Geophysical Union, 2001. – P. 107-135.
65. Chen F. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity / F. Chen, J. Dudhia // *Monthly Weather Review.* – 2001. – Vol. 129, № 4. – P. 569-585.
66. Chen L. Model analysis of urbanization impacts on boundary layer meteorology under hot weather conditions: A case study of Nanjing, China / L. Chen, M. Zhang, Y. Wang // *Theoretical and Applied Climatology.* – 2016. – Vol. 125, № 3. – P. 713-728.
67. Ching J. WUDAPT: An urban weather, climate, and environmental modeling infrastructure for the anthropocene / J. Ching, G. Mills, B. Bechtel [et al.] // *Bulletin of the American Meteorological Society.* – 2018. – Vol. 99, № 9. – P. 1907-1924.
68. Demuzere M. LCZ Generator: a web application to create Local Climate Zone maps / M. Demuzere, J. Kittner, B. Bechtel // *Frontiers in Environmental Science.* – 2021. – Vol. 9. – Article 637455. – 12 p.
69. Dokukin S.A. The influence of anthropogenic heat fluxes on the temperature and wind regimes of the Moscow and St. Petersburg regions / S.A. Dokukin, A.S. Ginzburg // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* – 2020. – Vol. 606.
70. Doms G. A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO Model. Part II: Physical Parameterization / G. Doms, M. Baldauf. – Offenbach: Deutscher Wetterdienst, 2011. – 154 p.
71. Dudhia J. A multi-layer soil temperature model for MM5 / J. Dudhia // *Preprints. The Sixth PSU/NCAR mesoscale model users' workshop.* – Boulder, CO, USA, 1996. – P. 22-24.
72. Errebai F.B. Impact of urban heat island on cooling energy demand for residential building in Montreal using meteorological simulations and weather station observations / F.B. Errebai, D. Strebel, J. Carmeliet, D. Derome // *Energy and Buildings.* – 2022. – Vol. 273. – P. 112410.
73. Freund Y. Experiments with a new boosting algorithm / Y. Freund, R.E. Schapire // *13th International Conference on Machine Learning.* – 1996. – Vol. 96. – P. 1-9.
74. Friedl M.A. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets / M.A. Friedl, D. Sulla-Menashe, B. Tan, A. Schneider, N. Ramankutty, A. Sibley, X. Huang // *Remote Sensing of Environment.* – 2010. – Vol. 114, № 1. – P. 168-182.
75. Friedman J.H. Greedy function approximation: a gradient boosting machine / J.H. Friedman // *Annals of Statistics.* – 2001. – Vol. 29, № 5. – P. 1189-1232.

76. Garbero V. Evaluating the urban canopy scheme TERRA_URB in the COSMO model for selected European cities / V. Garbero, M. Milelli, E. Bucchignani, P. Mercogliano, M. Varentsov, I. Rozinkina, F. Repola // *Atmosphere*. – 2021. – Vol. 12, № 2. – P. 237.
77. Giannaros T.M. Numerical study of the urban heat island over Athens (Greece) with the WRF model / T.M. Giannaros, D. Melas, I.A. Daglis, I. Keramitsoglou, K. Kourtidis // *Atmospheric Environment*. – 2013. – № 73. – P. 103-111.
78. Glazunov A. Large-eddy simulation and stochastic modeling of Lagrangian particles for footprint determination in the stable boundary layer / A. Glazunov, Ü. Rannik, V. Stepanenko, V. Lykosov, M. Auvinen, T. Vesala, I. Mammarella // *Geoscientific Model Development*. – 2016. – Vol. 9, No. 9. – P. 2925–2949.
79. Glotfelty T. NUDAPT 44 documentation / T. Glotfelty, M. Tewari, K. Sampson, M. Duda, F. Chen, J. Ching // *National Center for Atmospheric Research Research Applications Laboratory Doc.* – 2013. – № 9. – 14 p.
80. Gough W.A. Impact of urbanization on the nature of precipitation at Toronto, Ontario, Canada / W.A. Gough // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. – 2021. – Vol. 60, № 4. – P. 425-435.
81. Gutiérrez E. A Mechanical Drag Coefficient Formulation and Urban Canopy Parameter Assimilation Technique for Complex Urban Environments / E. Gutiérrez, A. Martilli, J.L. Santiago, J.E. González // *Boundary-Layer Meteorology*. – 2015. – Vol. 157, № 2. – P. 333-341.
82. Hastings W.K. Monte Carlo sampling methods using Markov chains and their applications / W.K. Hastings // *Biometrika*. – 1970. – Vol. 57, № 1. – P. 97-109.
83. Holt T. Urban canopy modeling of the New York City metropolitan area: A comparison and validation of single- and multilayer parameterizations / T. Holt, J. Pullen // *Monthly Weather Review*. – 2007. – Vol. 135, № 5. – P. 1906-1930.
84. Hong S.-Y. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes / S.-Y. Hong, Y. Noh, J. Dudhia // *Monthly Weather Review*. – 2006. – Vol. 134. – P. 2318-2341.
85. Iacono M.J. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models / M.J. Iacono, J.S. Delamere, E.J. Mlawer [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2008. – Vol. 113, № 13. – P. 22.
86. Inoue E. On the turbulent structure of airflow within crop canopies / E. Inoue // *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*. – 1963. – Vol. 41, № 6. – P. 317-326.
87. Jandaghian Z. The effect of increasing surface albedo on urban climate and air quality: a detailed study for Sacramento, Houston, and Chicago / Z. Jandaghian, H. Akbari // *Climate*. – 2018. – Vol. 6, № 2. – P. 1-19.
88. Janjic Z.I. The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes / Z.I. Janjic // *Monthly Weather Review*. – 1994.

- Vol. 122. – P. 927-945.
89. Ji D. Assessing parameter importance of the weather research and forecasting model based on global sensitivity analysis methods / D. Ji, W. Dong, T. Hong, T. Dai, Z. Zheng, S. Yang, X. Zhu // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2018. – Vol. 123, № 9. – P. 4443-4460.
 90. Kim S.W. Urban heat island (UHI) intensity and magnitude estimations: A systematic literature review / S.W. Kim, R.D. Brown // *Science of the Total Environment*. – 2021. – № 779. – P. 146-389.
 91. Konstantinov P. A high density urban temperature network deployed in several cities of Eurasian Arctic / P. Konstantinov, M. Varentsov, I. Esau // *Environmental Research Letters*. – 2018. – Vol. 13, № 7. – P. 075007.
 92. Kottek M. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated / M. Kottek, J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, F. Rubel // *Meteorologische Zeitschrift*. – 2006. – Vol. 15. – P. 259-263.
 93. Kusaka H. Numerical simulation of urban heat island effect by the WRF model with 4-km grid increment: An inter-comparison study between the urban canopy model and slab model / H. Kusaka, F. Chen, M. Tewari, J. Dudhia, D.O. Gill, M.G. Duda, W. Wang, Y. Miya // *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*. – 2012. – № 90. – P. 33-45.
 94. Kusaka H. A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models / H. Kusaka, H. Kondo, Y. Kikegawa, F. Kimura // *Boundary-Layer Meteorology*. – 2001. – Vol. 101, № 3. – P. 329-358.
 95. Lowry W.P. Empirical estimation of urban effects on climate: a problem analysis / W.P. Lowry // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. – 1977. – Vol. 16, № 2. – P. 129-135.
 96. Lam J.S.L. Application of refined land-use categories for high resolution mesoscale atmospheric modelling / J.S.L. Lam, A.K.H. Lau, J.C.H. Fung // *Boundary-Layer Meteorology*. – 2006. – Vol. 119, № 2. – P. 263-288.
 97. Landsberg H.E. Atmospheric changes in a growing community (the Columbia, Maryland experience) / H.E. Landsberg // *Urban Ecology*. – 1979. – Vol. 4, № 1. – P. 53-81.
 98. Lauer A. Effect of urban heat island mitigation strategies on precipitation and temperature in Montreal, Canada: case studies / A. Lauer, F.S. Pausata, S. Leroyer, D. Argueso // *PLOS Climate*. – 2023. – Vol. 2, № 6. – P. e0000196.
 99. Lokoshchenko M.A. Urban 'heat island' in Moscow / M.A. Lokoshchenko // *Urban Climate*. – 2014. – Vol. 10. – P. 550-562.
 100. Lokoshchenko M.A. Urban heat island and urban dry island in Moscow and their centennial changes / M.A. Lokoshchenko // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. – 2017. – Vol. 56, № 10. – P. 2729-2745.
 101. Lokoshchenko M.A. Underground urban heat island below Moscow city / M.A. Lokoshchenko, I.A.

- Korneva // *Urban Climate*. – 2015. – Vol. 13. – P. 1-13.
102. Loridan T. High resolution simulation of the variability of surface energy balance fluxes across central London with urban zones for energy partitioning / T. Loridan, F. Lindberg, O. Jorba, S. Kotthaus, S. Grossman-Clarke, C.S.B. Grimmond // *Boundary-Layer Meteorology*. – 2013. – Vol. 147, № 3. – P. 493-523.
103. Mansheim T. WUDAPT Level 0 training data for Saint Petersburg (Russian Federation), submitted to the LCZ Generator / T. Mansheim [Electronic resource]. – 2021. – URL: https://lcz-generator.rub.de/factsheets/33a9e61fd605fc59e16a19e919991cf6686e4717/33a9e61fd605fc59e16a19e919991cf6686e4717_factsheet.html (accessed: 27.04.2025).
104. Masson V. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models / V. Masson // *Boundary-Layer Meteorology*. – 2000. – Vol. 94, № 3. – P. 357-397.
105. McClarren R.G. Local Sensitivity Analysis Based on Derivative Approximations / R.G. McClarren // *Uncertainty Quantification and Predictive Computational Science*. – 2018. – P. 95-109.
106. Mitchell K. The Community Noah Land-Surface Model (LSM). User's Guide. Public Release Version 2.7.1 / K. Mitchell [et al.] // NCEP/EMC Doc. – 2005. – 26 p.
107. Morini E. The impact of albedo increase to mitigate the urban heat island in Terni (Italy) using the WRF model / E. Morini, A.G. Touchaei, B. Castellani, F. Rossi, F. Cotana // *Sustainability*. – 2016. – Vol. 8, № 10. – P. 1-14.
108. Morris K.I. Urbanisation and urban climate of a tropical conurbation, Klang Valley, Malaysia / K.I. Morris, A. Chan, K.J.K. Morris, M.C. Ooi, M.Y. Oozeer, Y.A. Abakr, M.S.M. Nadzir, I.Y. Mohammed // *Urban Climate*. – 2017. – № 19. – P. 54-71.
109. Murphy J.M. Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations / J.M. Murphy, D.M. Sexton, D.N. Barnett [et al.] // *Nature*. – 2004. – Vol. 430, № 7001. – P. 768-772.
110. Neelin J.D. Considerations for parameter optimization and sensitivity in climate models / J.D. Neelin, A. Bracco, H. Luo [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2010. – Vol. 107, № 50. – P. 21349-21354.
111. Nemunaitis-Berry K.L. Sensitivity of predictions of the urban surface energy balance and heat island to variations of urban canopy parameters in simulations with the WRF model / K.L. Nemunaitis-Berry, P.M. Klein, J.B. Basara, E. Fedorovich // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. – 2017. – Vol. 56, № 3. – P. 573-595.
112. Nunez M. The energy balance of an urban canyon / M. Nunez, T.R. Oke // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. – 1977. – Vol. 16, № 1. – P. 11-19.
113. Oke T.R. The urban boundary layer in Montreal / T.R. Oke, C. East // *Boundary-Layer Meteorology*. – 1971. – Vol. 1. – P. 411-437.

114. Oke T.R. The energetic basis of the urban heat island / T.R. Oke // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 1982. – Vol. 108, № 455. – P. 1-24.
115. Oke T.R. *Urban climates* / T.R. Oke, G. Mills, A. Christen, J.A. Voogt. – Cambridge: Cambridge University Press, 2017. – 546 p.
116. Robert C.P. *Monte Carlo Statistical Methods* / C.P. Robert, G. Casella. – New York: Springer, 1999. – Vol. 2. – 649 p.
117. Roberts N. M. Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events / N. M. Roberts, H. W. Lean // *Monthly Weather Review*. – 2008. – Vol. 136, № 1. – P. 78–97.
118. Rockel B. The regional climate model COSMO-CLM (CCLM) / B. Rockel, A. Will, A. Hense // *Meteorologische Zeitschrift*. – 2008. – Vol. 17, № 4. – P. 347-348.
119. Salamanca F. A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations - Part I (II). Validation with one dimension off-line simulations / F. Salamanca, A. Martilli // *Theoretical and Applied Climatology*. – 2010. – Vol. 99, № 3. – P. 345-356.
120. Salamanca F. A numerical study of the Urban Heat Island over Madrid during the DESIREX (2008) campaign with WRF and an evaluation of simple mitigation strategies / F. Salamanca, A. Martilli, C. Yagüe // *International Journal of Climatology*. – 2012. – Vol. 32, № 15. – P. 2372-2386.
121. Saltelli A. Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices / A. Saltelli // *Computer Physics Communications*. – 2002. – Vol. 145, № 2. – P. 280-297.
122. Saltelli A. *Global Sensitivity Analysis: The Primer* / A. Saltelli, M. Ratto, T. Andres [et al.]. – John Wiley & Sons, 2008. – 304 p.
123. Santiago J.L. A Dynamic Urban Canopy Parameterization for Mesoscale Models Based on Computational Fluid Dynamics Reynolds-Averaged Navier-Stokes Microscale Simulations / J.L. Santiago, A. Martilli // *Boundary-Layer Meteorology*. – 2010. – Vol. 137, № 3. – P. 417-439.
124. Schmidt W. Zum einfluss grosser städte auf das klima / W. Schmidt // *Naturwissenschaften*. – 1917. – Vol. 5, № 30. – P. 494-495.
125. Schmidt W. Kleinklimatische aufnahmen durch temperaturfahrten / W. Schmidt // *Meteorologische Zeitschrift*. – 1930. – Vol. 47. – P. 92-106.
126. Stewart I.D. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature / I.D. Stewart // *International Journal of Climatology*. – 2011. – Vol. 31, № 2. – P. 200-217.
127. Stewart I.D. Local climate zones for urban temperature studies / I.D. Stewart, T.R. Oke // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2012. – Vol. 93, № 12. – P. 1879-1900.
128. Sobol I.M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates / I.M. Sobol // *Mathematics and Computers in Simulation*. – 2001. – Vol. 55. – P. 271-280.

129. Taha H. Modifying a mesoscale meteorological model to better incorporate urban heat storage: A bulk-parameterization approach / H. Taha // *Journal of Applied Meteorology*. – 1999. – Vol. 38, № 4. – P. 466-473.
130. Tewari M. Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model / M. Tewari, F. Chen, W. Wang, J. Dudhia, M.A. LeMone, K. Mitchell, M. Ek, G. Gayno, J. Wegiel, R.H. Cuenca // 20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction. – 2004. – P. 11-15.
131. Thompson G. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization / G. Thompson, P.R. Field, R.M. Rasmussen, W.D. Hall // *Monthly Weather Review*. – 2008. – Vol. 136, № 12. – P. 5095-5115.
132. Trusilova K. Implementation of an urban parameterization scheme into the regional climate model COSMO-CLM / K. Trusilova, B. Früh, S. Brienen, A. Walter, V. Masson, G. Pigeon, P. Becker // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. – 2013. – Vol. 52, № 10. – P. 2296-2311.
133. Varentsov M. Megacity-induced mesoclimatic effects in the lower atmosphere: A modeling study for multiple summers over Moscow, Russia / M. Varentsov, H. Wouters, V. Platonov, P. Konstantinov // *Atmosphere*. – 2018a. – Vol. 9, № 2. – P. 50.
134. Varentsov M. Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city / M. Varentsov, P. Konstantinov, A. Baklanov [et al.] // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2018b. – Vol. 18, № 23. – P. 17573-17587.
135. Varentsov M. Impact of urban canopy parameters on a megacity's modelled thermal environment / M. Varentsov, T. Samsonov, M. Demuzere // *Atmosphere*. – 2020. – Vol. 11, № 12. – P. 1349.
136. Voudouri A. Optimization of high resolution COSMO model performance over Switzerland and Northern Italy / A. Voudouri, P. Khain, I. Carmona [et al.] // *Atmospheric Research*. – 2018. – Vol. 213. – P. 70-85.
137. Wang Z.H. Analyzing the sensitivity of WRF's single-layer urban canopy model to parameter uncertainty using advanced Monte Carlo simulation / Z.H. Wang, E. Bou-Zeid, S.K. Au, J.A. Smith // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. – 2011. – Vol. 50, № 9. – P. 1795-1814.
138. Wouters H. The efficient urban canopy dependency parametrization (SURY) v1.0 for atmospheric modelling: Description and application with the COSMO-CLM model for a Belgian summer / H. Wouters, M. Demuzere, U. Blahak, K. Fortuniak, B. Maiheu, J. Camps, D. Tielemans, N.P. van Lipzig // *Geoscientific Model Development*. – 2016. – Vol. 9, № 9. – P. 3027-3054.
139. Xgboost developers. xgboost Release 1.1.1 [Электронный ресурс]. – URL: https://xgboost.readthedocs.io/_/downloads/en/release_1.1.0/pdf/ (дата обращения: 01.01.2023).
140. Ye C. Derivation of the characteristics of the Surface Urban Heat Island in the Greater Toronto area using thermal infrared remote sensing / C. Ye, M. Wang, J. Li // *Remote Sensing Letters*. – 2017. –

Vol. 8, № 7. – P. 637-646.

141. Zhang C. Improved representation of boundary layer clouds over the southeast Pacific in ARW-WRF using a modified Tiedtke cumulus parameterization scheme / C. Zhang, Y. Wang, Hamilton // *Monthly Weather Review*. – 2011. – Vol. 139, № 11. – P. 3489-3513.
142. Zonato A. Exploring the effects of rooftop mitigation strategies on urban temperatures and energy consumption / A. Zonato, A. Martilli, E. Gutierrez, F. Chen, C. He, M. Barlage, F. Salamanca, E. Bou-Zeid, L. Giovannini // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2021. – Vol. 126, № 21. – e2021JD035002.

Приложение

РОСГИДРОМЕТ

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Северо-Западное управление по гидрометеорологии
и мониторингу окружающей среды»
(ФГБУ «Северо-Западное УГМС»)

23 линия В.О., д. 2а, Санкт-Петербург, 199106
тел. (812) 323-66-19, факс (812) 328-09-62
e-mail: secretary@meteo.nw.ru; <http://www.meteo.nw.ru>
ОКПО 27514299; ОГРН 1137847021729,
ИНН/КПП 7801593651/780101001

15.06.2026 № 11-20-1046

ФГБУ «Гидрометцентр России»

Диссертационный совет

Д 26.1.002.01

Москва, Б. Предтеченский пер.,

11-13, 123376

Справка о внедрении

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационного исследования **Ладохиной Е.М.** на тему **«Численное моделирование влияния свойств городской застройки Санкт-Петербурга на метеорологические поля»** обладают актуальностью и представляют практический интерес в качестве ценного вспомогательного материала при составлении прогнозов погоды. Разработанная в рамках исследования конфигурация численной модели WRF-ARW с многоуровневой параметризацией городского подслоя ВЕР_ВЕМ и уточнёнными данными о реальных геометрических характеристиках городской застройки внедрена в оперативную практику и используется синоптиками для краткосрочного прогноза метеорологических параметров в городской среде. Оценка успешности прогноза за 2025 г. подтвердила полезность модели, в особенности для прогноза приземной температуры в тёплый период года.

Начальник Гидрометцентра ФГБУ
«Северо-Западное УГМС»



А.М. Колесов

А.М.Колесов