



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(магистерская диссертация)

На тему: «Исследование влияния крупного города на характеристики  
атмосферы»

Исполнитель Клецова Влада Александровна  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент  
(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент  
(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна  
(фамилия, имя, отчество)

« 29 » мая 2025 г.

Санкт-Петербург  
2025

## Содержание

Введение.....	3
1 Методы и данные .....	6
1.1 Исходные данные.....	6
1.2 Конфигурация модели WRF-ARW.....	6
1.3 Методы анализа.....	8
2 Теоретические основы исследования влияния города на атмосферу.....	10
2.1 Урбанизация как климатообразующий фактор .....	10
2.2 Атмосферные модели и численное моделирование городской среды... ..	11
2.3 Параметризации городской среды в модели WRF-ARW .....	13
3 Численные эксперименты с моделью WRF-ARW для Ленинградской области и г. Санкт-Петербурга.....	15
3.1 Выбор сетки.....	15
3.2 Численные эксперименты с учётом влияния города. Параметризация урбанизации ВЕР.....	22
3.3 Верификация результатов моделирования.....	46
3.4 Анализ причин ухудшения прогноза температуры в отдельные дни ....	61
3.5 Сравнение результатов ВЕР и ВЕР-ВЕМ .....	70
Заключение .....	78
Список использованных источников .....	81

## Введение

Урбанизация – один из ключевых факторов, влияющих на локальный климат. Рост плотности застройки и изменение характеристик подстилающей поверхности в городах нарушают естественные процессы тепло- и влагообмена в приземном слое атмосферы. Эти процессы влияют на формирование городского микроклимата и, в частности, на такие явления, как городской остров тепла, изменение ветрового режима и распределения осадков. Учет этих эффектов особенно важен при численном моделировании погоды в мегаполисах.

Цель исследования – оценить влияние городской среды на характеристики атмосферы. Для достижения поставленной цели использована мезомасштабная гидродинамическая модель атмосферы WRF-ARW, конфигурированная для прогноза температуры, скорости и направления ветра, а также осадков для Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

Для достижения цели сформулированы следующие задачи:

- Провести численные эксперименты с моделью WRF-ARW с разным пространственным разрешением.
- Провести численные эксперименты с различным учётом влияния города на атмосферу.
- Провести верификацию модели по радиозондовым и наземным измерениям.
- Проанализировать энергетические потоки и параметры турбулентного обмена.
- Провести сравнительную оценку эффективности различных схем параметризации урбанизации ВЕР и ВЕР-ВЕМ.
- Оценить чувствительность результатов к изменению схем параметризаций основных метеорологических процессов.

Объект исследования. Атмосфера над урбанизированной территорией Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

Предмет исследования. Влияние схем параметризации городской среды (BEP и BEP-BEM) в модели WRF-ARW на прогноз метеорологических величин: температуры, ветра, осадков.

Научная новизна. Впервые выполнена комплексная оценка воздействия разных схем параметризации городской среды на результат моделирования WRF-ARW для условий Санкт-Петербурга на трех разных январских периодах. Проведена детальная верификация с использованием радиозондов, метеостанций и метеорадарных данных. Также предложен механизм физической интерпретации изменения качества прогноза температуры с учетом энергетических потоков.

Практическая значимость. Результаты работы позволяют повысить точность численного прогноза погоды в городских условиях и оптимизировать выбор параметризаций при локальном моделировании. Выводы могут быть использованы при адаптации модели WRF к условиям других крупных городов России. Результаты выявленных закономерностей влияния урбанизации могут быть использованы в дальнейших исследованиях.

Выпускная квалификационная работа (магистерская диссертация) состоит из введения, трёх глав и заключения.

В первой главе представлены методы и данные, использованные в исследовании. Описана конфигурация модели WRF-ARW, включая характеристики расчетной области, выбор физической параметризации, исходные и верификационные данные. Также изложены применяемые метрики и подходы к анализу результатов моделирования, включая методы верификации, оценки энергетических потоков и статистические тесты.

Во второй главе рассмотрены теоретические основы влияния урбанизации на атмосферу. Приведен обзор физических механизмов, через которые городская среда влияет на метеорологические величины, такие как температура, ветер и осадки. Описаны основные схемы параметризации

городской среды, реализованные в модели WRF-ARW: SLUCM, BEP и BEP-BEM, а также обоснована необходимость их применения при моделировании в условиях мегаполисов.

В третьей главе представлены численные эксперименты, выполненные с моделью WRF-ARW для территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Проведен сравнительный анализ прогнозов с учетом и без учета урбанизации, оценено влияние различных схем параметризации города (BEP и BEP-BEM) на воспроизведение температуры, ветра и осадков. Представлены результаты верификации с радиозондовыми, наземными и метеорадарными наблюдениями. Проведен анализ причин ошибок и чувствительности модели к выбору физических схем. По итогам экспериментов даны рекомендации по оптимальной конфигурации модели для городских условий.

Список использованных источников содержит 23 наименования.

## 1 Методы и данные

### 1.1 Исходные данные

Для инициализации модели WRF-ARW использовались данные анализа модели GFS (Global Forecast System) с пространственным разрешением  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  и временным шагом 6 часов. Данные загружены с официального сервиса NOAA NCEP.

Для верификации результатов моделирования использовались следующие наблюдательные данные:

радиозондовые профили станции Воейково ( $59.95^\circ\text{N}$ ,  $30.70^\circ\text{E}$ ), доступные через сайт University of Wyoming [22];

метеорологические наблюдения на станции Санкт-Петербург ( $59.9691^\circ\text{N}$ ,  $30.2839^\circ\text{E}$ ) – температура, скорость и направление ветра (полученные с сайта Погода и климат) [23];

данные метеорадара (МРЛ) – суточные суммы осадков за январь 2020 года, предоставленные ГГО им. А. И. Воейкова.

### 1.2 Конфигурация модели WRF-ARW

Моделирование выполнялось с использованием WRF-ARW версии 4.0, поддерживающей вложенные сетки и высокое вертикальное разрешение.

Для достижения цели была выбрана расчетная область, включающая две сетки:

Материнская сетка: 100 x 200 узлов по горизонтали с шагом 6 км.

Вложенная сетка: 94 x 163 узла с шагом 2 км.

По вертикали область моделирования простиралась до изобарической поверхности 50 гПа и включала 35 уровней. Шаг по времени составил 30 секунд для материнской сетки и 10 секунд для вложенной. Область моделирования представлена на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Область моделирования

Были заданы следующие параметризации физических процессов:

- длинноволновое излучение – RRTM Longwave Scheme,
- коротковолновое излучение – Dudhia Shortwave Scheme,
- микрофизика – WRF Single-moment 3-class and 5-class Schemes,
- приземный слой – Revised MM5 Surface Layer Scheme,
- подстилающая поверхность – Unified Noah Land Surface Model,
- пограничный слой – Yonsei University Scheme (YSU),
- конвекция – Kain-Fritsch Scheme.

Период моделирования – январь.

Начальные и граничные условия формировались из анализа модели GFS (Global Forecasting System), с обновлением каждые 6 часов.

Проведены следующие численные эксперименты:

- без учета урбанизации – за 2010, 2015, 2020 и 2021 годы;
- с учетом урбанизации (параметризации ВЕР) – за 2015, 2020 и 2021 годы;
- с учетом урбанизации (параметризации ВЕР-ВЕМ) – за 2015 год.

Проведены дополнительные эксперименты с разным разрешением данных начальных полей (за 2010 и 2015 годы). Заблаговременность прогноза составляла 24 и 96 часов в зависимости от включения параметризации.

### 1.3 Методы анализа

Для количественной оценки качества прогноза применялись метрики:

- Bias – средняя ошибка;
- MAE – средняя абсолютная ошибка;
- RMSE – среднеквадратическое отклонение.

Анализ температурных профилей проводился с использованием данных радиозондирования. Поскольку точки, в которых проводилось зондирование, не совпадают с узлами сетки, то проводилась интерполяция методом ближайшего соседа по следующему алгоритму.

На расчётной сетке модели WRF-ARW вычислялась матрица расстояний от узлов до координат станции зондирования (59.95°N, 30.70°E) и выбиралась ближайшая ячейка. Данные этой ячейки и использовались при сравнении с измеренными профилями метеорологических величин. Метод ближайшего соседа использовался для оценки качества любых численных экспериментов, когда требовалось сравнить результаты моделирования с данными в точке наблюдений.

Дополнительно анализировались следующие энергетические потоки:

GRDFLX – поверхностный поток тепла,

HFX – явный поток тепла в атмосферу,

LN – скрытый поток тепла.

Анализ проводился как для полей, полученными при экспериментах с разной конфигурацией модели, так и для значений в точке. Анализировались средние значения разности, стандартные отклонения ( $\sigma$ ), характеризующие пространственную изменчивость разного масштаба (например, синоптического), оценивалась значимость различий.

Оценка статистической значимости различий между моделями производилась с использованием непараметрического критерия Манна–Уитни.

## 2 Теоретические основы исследования влияния города на атмосферу

### 2.1 Урбанизация как климатообразующий фактор

Современные города представляют собой сложные антропогенно модифицированные системы, оказывающие значительное влияние на атмосферные процессы. Урбанизация охватывает все большие площади: согласно оценкам ООН, к 2050 году доля городского населения достигнет 68 % [13]. Большинство мегаполисов формируются в умеренных и субтропических широтах, где влияние города особенно заметно на фоне естественных условий.

Формирование городской среды приводит к существенным изменениям характеристик подстилающей поверхности. Естественные поверхности с относительно высокой отражающей способностью (альбедо), низкой теплоемкостью и развитым испарением замещаются материалами, обладающими высокой теплопроводностью, низким альбедо, большой теплоемкостью и незначительным испарением. Вместе с увеличением шероховатости за счет плотной вертикальной застройки это приводит к перераспределению потоков энергии, влаги и импульса в приземном слое атмосферы [9].

Одним из наиболее изученных эффектов урбанизации является городской остров тепла, проявляющийся в повышении температуры воздуха в черте города по сравнению с пригородом или сельской местностью. Причины появления городского острова тепла включают аккумуляцию тепла в строительных материалах, уменьшение охлаждения за счет испарения, выбросы тепла от транспорта и зданий, а также изменение радиационного баланса вследствие отражения и поглощения солнечной энергии между зданиями. Последствия включают усиление ночного нагрева, изменение суточного хода температуры, ухудшение качества воздуха и увеличение энергопотребления [10].

Урбанизация также влияет на ветровой режим: в городах наблюдается как ослабление ветра из-за экранирующего эффекта зданий, так и его локальное усиление – в результате канального эффекта между улицами. Помимо этого, изменяются поля влажности (как правило, уменьшается относительная влажность), структура осадков (в городах может наблюдаться усиление осадков), а также радиационный баланс, включая перераспределение коротковолновой и длинноволновой радиации [15].

Исследования, выполненные для крупных городов, подтверждают значительное влияние урбанизированной среды на атмосферу. Так, по данным наблюдений и моделирования, в Москве величина ГОТ может достигать 4–5 °С в зимнее время, особенно в безветренные ночи [20]. В Санкт-Петербурге среднегодовая температура увеличилась на 1,7 °С за период с 1986 по 2015 годы, что также свидетельствует о влиянии урбанизации [18]. Пространственная структура температурных и ветровых полей над городами определяется не только размером агломерации, но и ее планировкой, плотностью застройки, долей зеленых зон и близостью водоемов.

Урбанизация оказывает комплексное и устойчивое воздействие на приземные слои атмосферы, что требует ее обязательного учета при численном моделировании метеорологических процессов. Без параметризации города невозможно корректно воспроизводить поля температуры, ветра, влажности и других величин в пределах мегаполисов.

## 2.2 Атмосферные модели и численное моделирование городской среды

Для изучения воздействия урбанизированной среды на атмосферные характеристики все шире применяются численные модели атмосферы. Такие модели позволяют не только реконструировать пространственно-временное распределение метеорологических величин, но и оценивать вклад различных физических процессов в формирование локального климата. Особенно это актуально в условиях крупных городов, где традиционные методики

климатического анализа на основе наблюдений не позволяют охватить всю сложность микрометеорологических взаимодействий.

В условиях мегаполиса атмосфера испытывает сильное антропогенное воздействие, выражающееся в модификации подстилающей поверхности, изменении потоков тепла и влаги, увеличении шероховатости и тепловой эмиссии. Для адекватного воспроизведения этих процессов численные модели должны обладать рядом характеристик. В частности, необходимо использовать высокое горизонтальное разрешение (шаг сетки 1–3 км), позволяющее воспроизводить сложную морфологию городской застройки. Кроме того, требуется учет геометрии зданий, характеристик поверхностей, антропогенных источников тепла, а также наличие актуальных и детализированных данных о землепользовании и ландшафте (например, классификации MODIS, CORINE или локальные геоданные).

Для задач мезомасштабного моделирования, включая оценку влияния урбанизации, широко применяется региональная модель WRF (Weather Research and Forecasting model), разработанная Национальным центром атмосферных исследований США (NCAR). Модель WRF представляет собой гибкий, модульный инструмент, включающий в себя разнообразные параметризации турбулентного обмена, микрофизики, радиации, конвекции и взаимодействия с подстилающей поверхностью [12]. Она поддерживает вложенные сетки, что позволяет детализировать расчеты в пределах города, сохраняя согласованность с региональными условиями.

Однако использование моделей типа WRF в городской среде сталкивается с рядом ограничений. При отсутствии специальных городских параметризаций город рассматривается как однородная поверхность с типичными для зеленых районов характеристиками, что ведет к существенным искажениям в расчетах температуры, скорости и направления ветра, потоков энергии. Кроме того, даже при наличии схем учёта урбанизации адекватность результатов моделирования во многом зависит от качества

исходных данных о застройке, типе покрытия, плотности зданий и их теплофизических свойствах [2].

Адаптация моделей к городским условиям требует внедрения специальных модулей, которые позволяют учитывать уникальные физические свойства городской среды. В модели WRF реализован ряд таких схем (SLUCM, BEP, BEP-BEM и др.), каждая из которых по-своему описывает процессы в пределах города: от упрощенного однослойного подхода до многослойных моделей с расчетом теплообмена в зданиях и улицах [8].

### 2.3 Параметризации городской среды в модели WRF-ARW

Модель WRF предоставляет несколько встроенных параметризаций урбанизации, каждая из которых учитывает влияние городской застройки на приземный слой атмосферы с разной степенью физической детализации.

#### Параметризация SLUCM – Single-Layer Urban Canopy Model

Схема SLUCM представляет собой однослойную параметризацию, в которой город моделируется как совокупность прямоугольных уличных каньонов, окруженных зданиями. В параметризации учитывается горизонтальное и вертикальное затенение, лучистый и конвективный теплообмен между стенами, крышей, улицей и атмосферой, а также выбросы антропогенного тепла (например, от транспорта). В параметризации SLUCM вычисляется температура поверхностей и поток тепла от них, но не учитывается вертикальное распределение характеристик воздуха и тепла внутри зданий и между этажами.

Эта схема низкой вычислительной сложности, широко используемая в региональном моделировании. Она подходит для исследований, где важно включить урбанизацию без необходимости в высокой детализации [4].

#### Параметризация BEP – Building Effect Parameterization

Схема BEP представляет собой многослойную параметризацию городской среды. В отличие от SLUCM, в ней учитывается вертикальное

распределение зданий, моделируя их как набор слоев, каждый из которых взаимодействует с атмосферой отдельно. В ВЕР описываются:

- вертикальный профиль температуры и турбулентности внутри и вокруг уличных каньонов,
- влияние зданий на коэффициенты турбулентного переноса,
- перераспределение потоков тепла и импульса в городской структуре.

Параметризация ВЕР особенно полезна в условиях высокой плотности застройки, например, для центра мегаполисов. Она позволяет детализировать влияние города на вертикальный профиль атмосферы, но требует больше вычислительных ресурсов и более точных входных данных о зданиях [5].

#### Параметризация ВЕР-ВЕМ – Building Energy Model

Схема ВЕР-ВЕМ расширяет возможности ВЕР за счет включения модели энергетического баланса зданий. В рамках параметризации ВЕМ рассчитывается:

- тепловой обмен между внутренними и наружными поверхностями зданий;
- теплопередача сквозь ограждающие конструкции (стены, крыши, окна);
- влияние систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха;
- внутренняя температура помещений и взаимодействие с наружной атмосферой.

Параметризация ВЕР-ВЕМ позволяет моделировать не только пассивное, но и активное тепловое воздействие городской застройки на атмосферу, что особенно важно в зимний период, когда антропогенные источники тепла вносят значительный вклад в формирование городского острова тепла.

Эта схема параметризации наиболее реалистична с физической точки зрения, но при этом и самая ресурсоемкая. Она активно используется в исследованиях, направленных на точное воспроизведение городского микроклимата – например, в Париже [7], Пекине [14] и ряде российских мегаполисов.

### 3 Численные эксперименты с моделью WRF-ARW для Ленинградской области и г. Санкт-Петербурга

#### 3.1 Выбор сетки

Так как разные размеры сеток могут давать различную точность результатов моделирования, на первом этапе проводилось сравнение двух выбранных сеток для нахождения оптимального разрешения модели. Далее будут представлены результаты сравнительного анализа результатов моделирования на двух сетках – материнской с шагом 6 км и вложенной с шагом 2 км (рисунок 3.1).

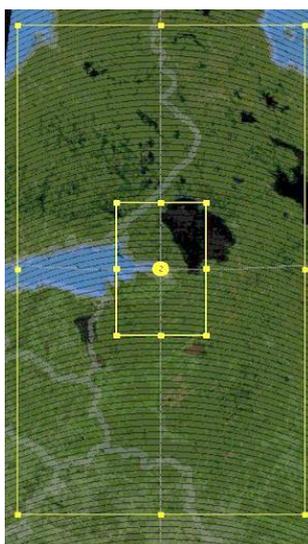


Рисунок 3.1 – Модельные сетки, на которых проводились исследования

Разница температуры воздуха на уровне 2 метра в начальных полях варьируется от -0,4 до 0,5 градусов, причем отрицательные и положительные значения чередуются. Особенно значительные различия в температуре преобладают на границах воды и суши. Можно предположить, что эти ошибки возникают за счёт интерполяции полей начальных условий (анализ и прогноз модели GFS с шагом сетки 0.25 градусов) на сетки и ошибки интерполяции

различаются на сетках разного разрешения или есть попытка при интерполяции учесть мелкомасштабные процессы, которые оказывают влияние на поле температуры (рисунок 3.2).

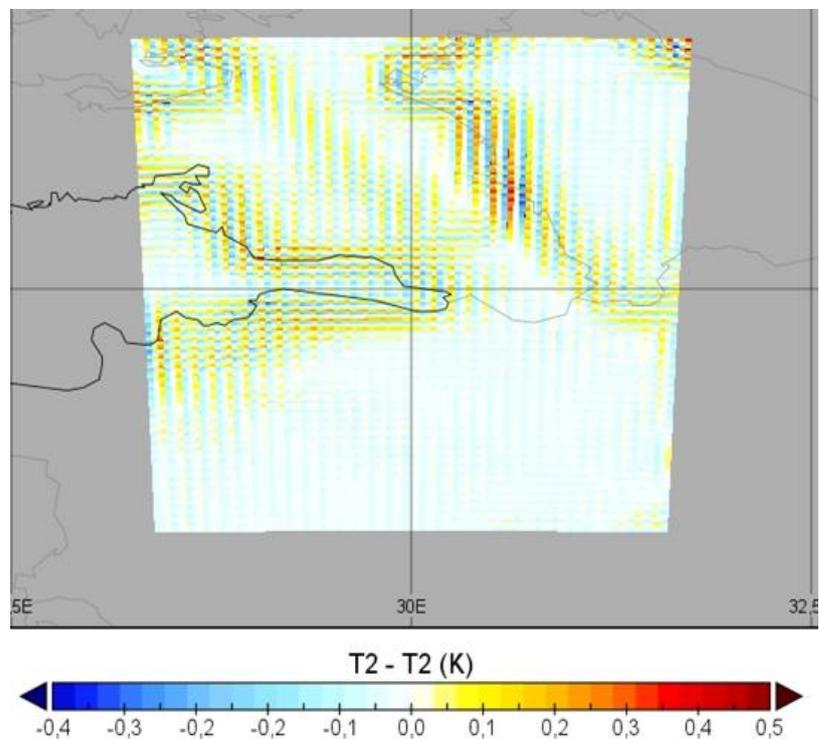


Рисунок 3.2 – Поле разницы температуры на 2 метрах в начальных полях 01.01.2020 00 ч

В прогностических полях разница температуры увеличилась, она варьируется уже в диапазоне от -2,4 до 2 °С. Большие значения разницы наблюдаются, по-прежнему, над сушей и на границе воды и суши, поскольку мелкая сетка лучше учитывает географические особенности местности (рисунок 3.3).

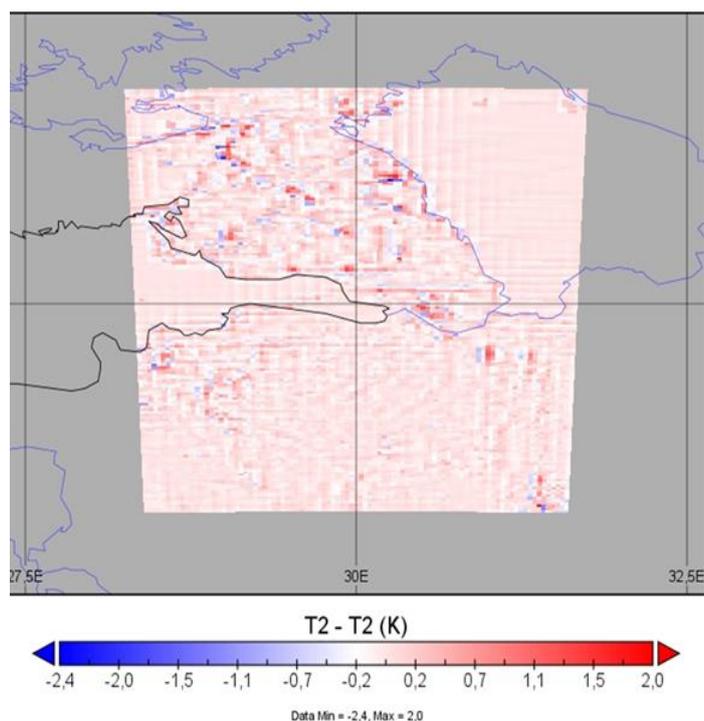


Рисунок 3.3 – Поле разницы температуры воздуха на высоте 2 м, прогноз на 24 часа

Сравнивая прогностические поля, можно заметить, что прогноз поля ветра над водной поверхностью для крупной и мелкой сетки практически одинаков. Но что касается суши, моделирование на мелкой сетке детальнее воспроизводит скорости ветра. Это связано с тем, что суша обладает более сложной и разнообразной поверхностью, включая в себя наличие городов, лесов, полей и других элементов, которые могут оказывать влияние на скорость ветра и формирование местных ветровых систем и описываются в статических полях модели WRF-ARW. Моделирование на мелкой сетке позволяет более детально учитывать географические особенности суши (рисунок 3.4).

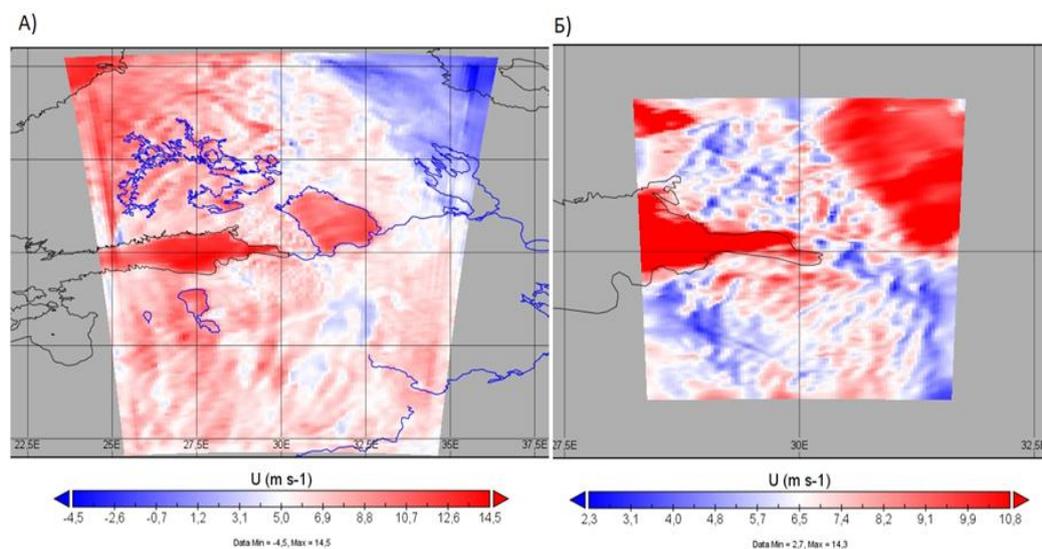


Рисунок 3.4 – Прогноз поля ветра 02.01.2020 00 ч,  
 А) материнская сетка, Б) вложенная сетка

Индекс землепользования (LU index) позволяет модели учитывать различия в типах земельного покрова для точного моделирования атмосферных процессов и климата. Моделирование на вложенной сетке детальнее описывает типы земного покрова, особенно для городской местности. Это подтверждает ранние предположения о возможных причинах разниц полей атмосферных процессов (рисунок 3.5).

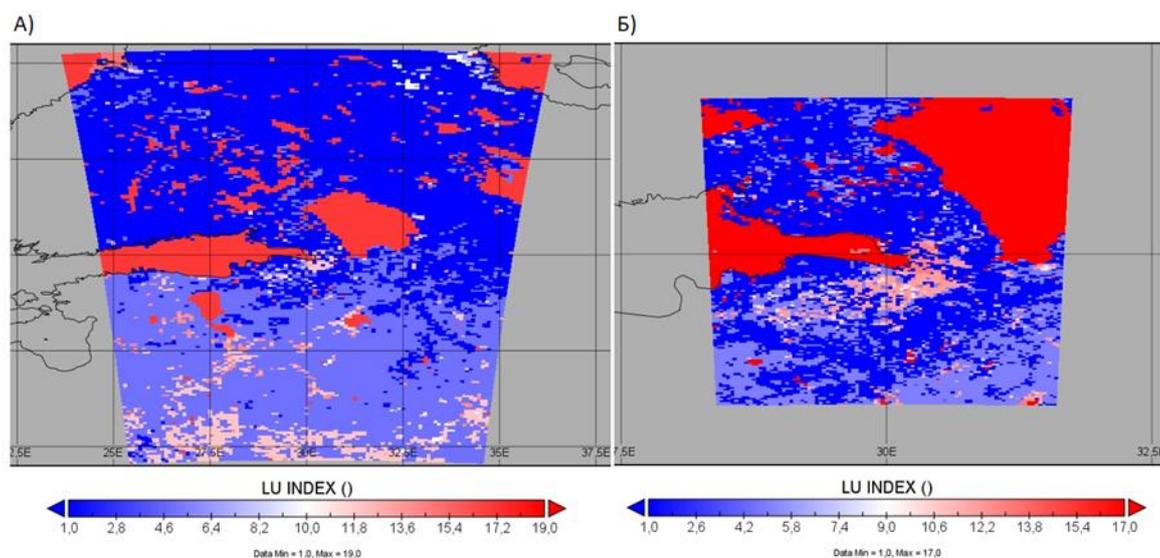


Рисунок 3.5 – Поля индекса землепользования 02.01.2020 00 ч,  
 А) материнская сетка, Б) вложенная сетка

Результаты сравнительного анализа двух сеток указывают на то, что вложенная сетка демонстрирует более детальное воспроизведение атмосферных процессов по сравнению с материнской сеткой. Это наблюдение подтверждает значимость использования вложенных сеток в моделировании атмосферы. Поэтому далее будут рассматриваться результаты на вложенной сетке.

На следующем этапе была произведена верификация прогнозов WRF-ARW с помощью анализа модели GFS (Global Forecasting System).

Разница между прогнозом и анализом находится в диапазоне от 0,5 до 5 °С. Наибольшие значения разницы наблюдаются около границ области. В Санкт-Петербурге значения разницы от 2,5 до 3°С. Данная разница одновременно показывает возможную ошибку прогноза и разницу в разрешении анализа и прогноза (рисунок 3.6).

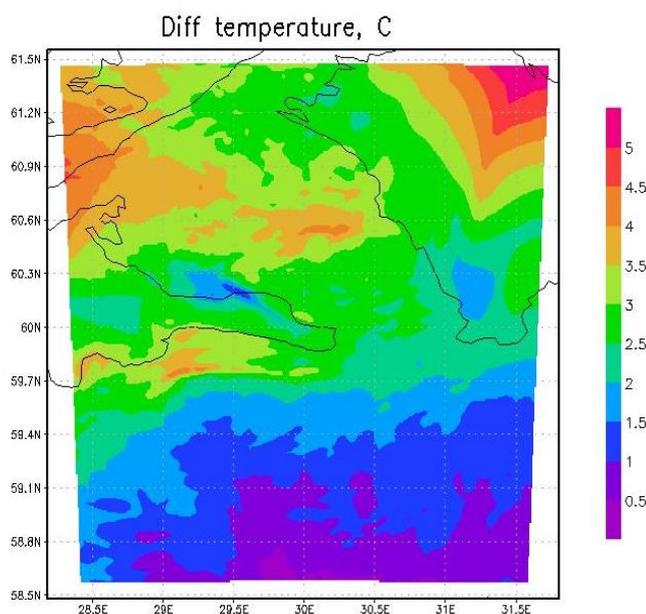


Рисунок 3.6 – Разница между прогнозом и анализом за 02.01.2010 12 ч (поле температуры)

Для объяснения причины разницы на рисунке 3.7 представлены поля температуры, построенные по результатам прогноза модели WRF-ARW и анализа модели GFS.

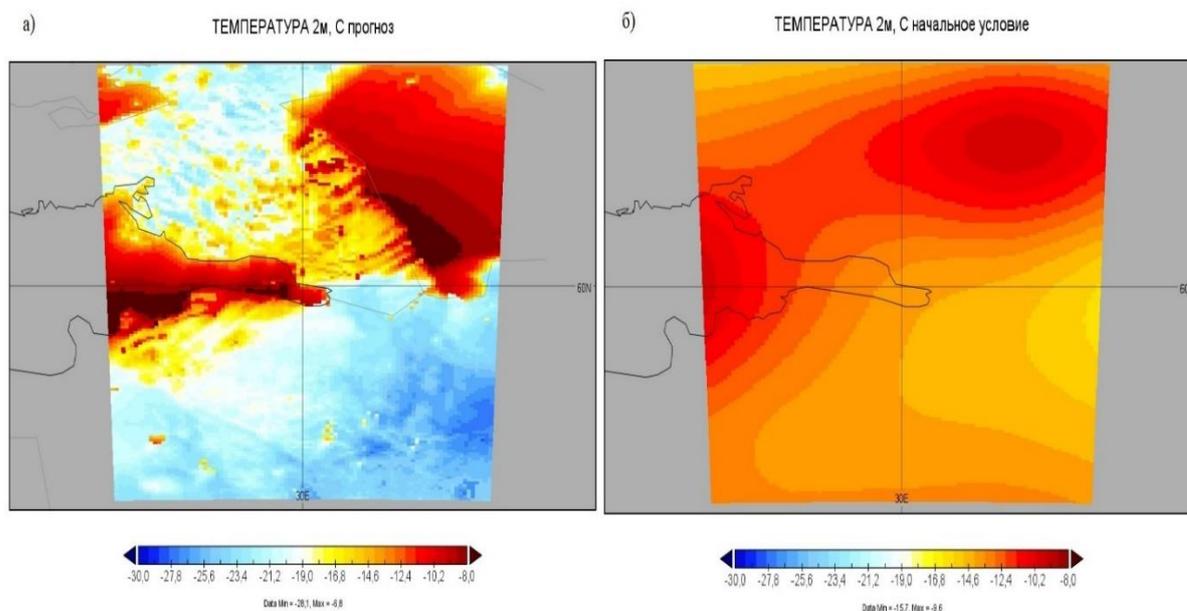


Рисунок 3.7 – Поле температуры за 02.01.2010 12 ч. а) Прогноз, б) Анализ

Прогностическое поле (рисунок 3.7а) учитывает особенности территории, поле же анализа, представленное на рисунке 3.7б, является сглаженным из-за того, что у модели GFS, которая имеет шаг по горизонтали 0,25 градуса, в данном случае недостаточно данных. Поэтому разница между прогнозом и анализом говорит не сколько об ошибке моделирования, сколько о том, что модель WRF-ARW лучше описывает локальные условия.

Затем были проанализированы ошибки прогнозов для каждого года и отобраны для анализа прогнозы с наибольшими и наименьшими значениями.

На рисунках 3.8 и 3.9 представлены поля ошибок прогноза температуры воздуха для трёх синоптических ситуаций. Слева представлен случай с наименьшей ошибкой прогноза температуры для 2010 года – ошибки варьируются от -2 до 4 °С. Посередине представлен случай 2015 года – ошибки варьируются от -2 до 2 °С. За 2020 год ошибки находятся в диапазоне от 0 до 2 °С (рисунок 3.8 правая панель).

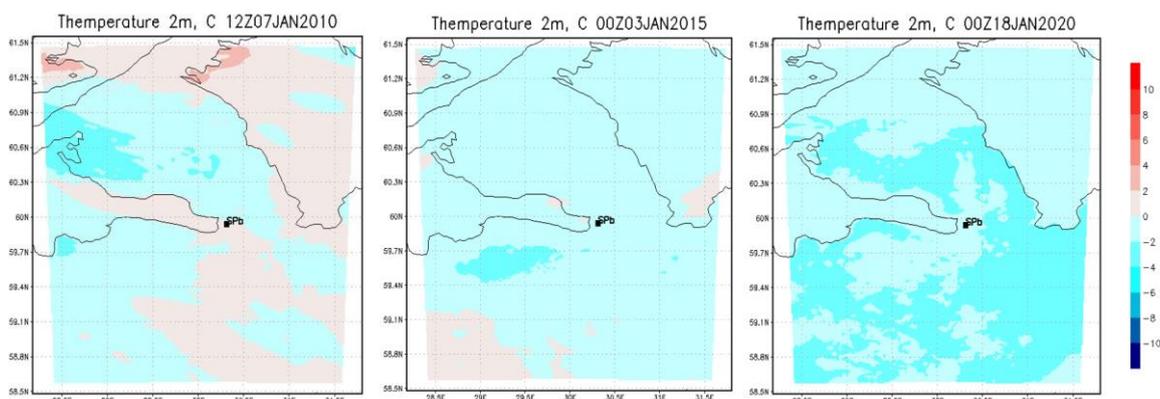


Рисунок 3.8 – Прогностические поля температуры воздуха с наименьшими ошибками (7 января 2010 г., 3 января 2015 г., 18 января 2020г.)

Для 2010 года наибольшие ошибки варьируются от -8 до 10 °С. Для 2015 года от -8 до 2 °С. А для 2020 года ошибки находятся в диапазоне от 2 до -6 °С (рисунок 3.9).

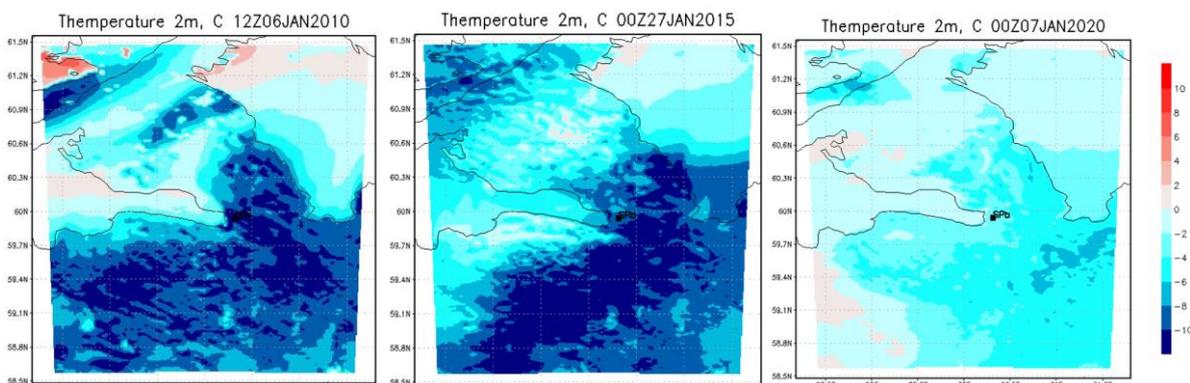


Рисунок 3.9 – Прогностические поля температуры воздуха с наибольшими ошибками (6 января 2010 г., 27 января 2015 г., 7 января 2020 г.)

Чтобы найти причину больших ошибок был проведён анализ полей давления, которые представлены на рисунках 3.10 и 3.11.

С 6 января по 7 января 2010 года наблюдается резкая смена циркуляции с юго-западной на северо-западную, такая смена условий и повлекла за собой ошибки в прогнозе поля температуры (рисунок 3.10).

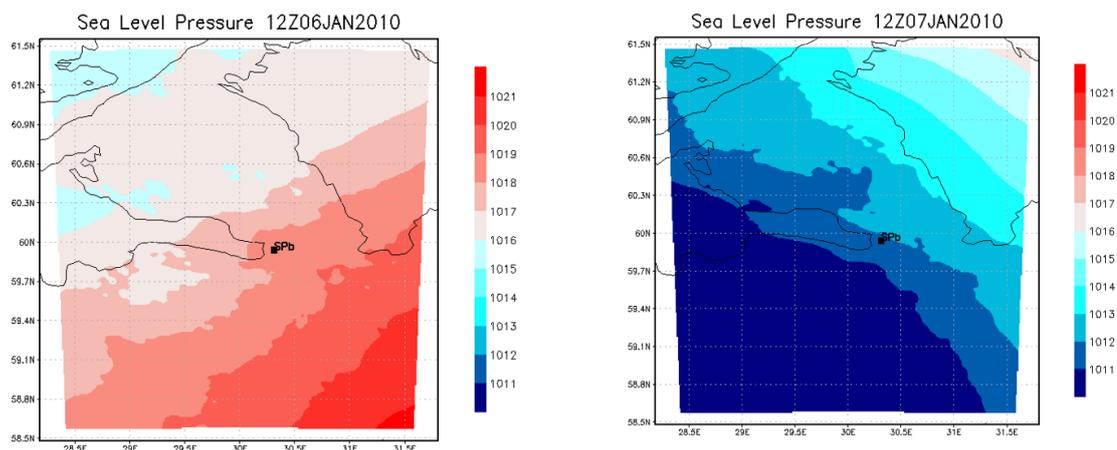


Рисунок 3.10 – Анализ причин ошибок прогноза температуры  
(6-7 января 2010 года)

26 января 2015 года исследуемая область находилась в малоградиентном поле антициклона, затем 27 января антициклон переместился, а уже 28 января над данной территорией находился циклон (рисунок 3.11).

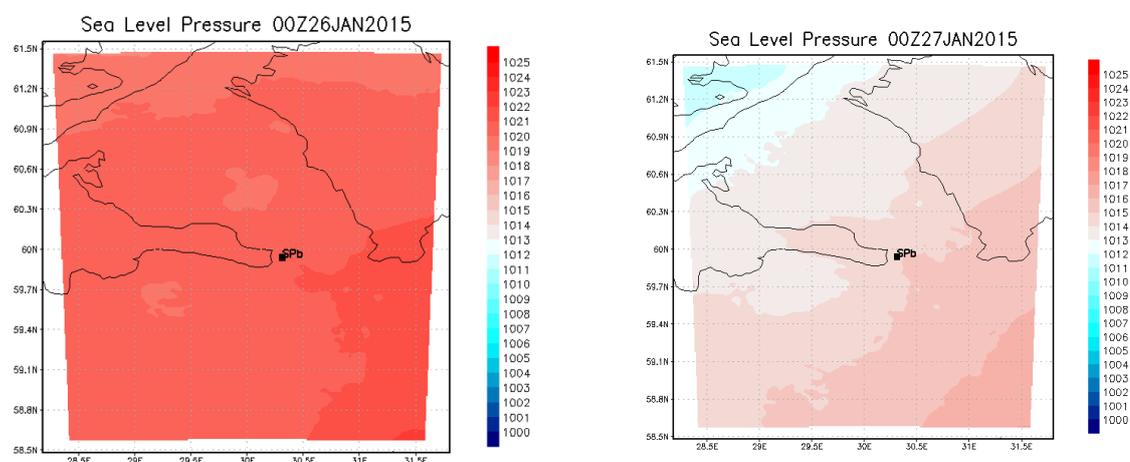


Рисунок 3.11 – Анализ причин ошибок прогноза температуры  
(26-27 января 2015 года)

### 3.2 Численные эксперименты с учётом влияния города. Параметризация урбанизации ВЕР

На первом этапе прогноз погоды для Санкт-Петербурга осуществлялся без учета урбанизации. Прогноз строился на 24 часа. На втором этапе была

введена параметризация урбанизации, и прогноз строился на 96 часов. Увеличение времени прогноза до 4 суток было необходимо для того, чтобы отразить и изучить эффект «острова тепла», который характерен для городских территорий.

Эффект «остров тепла» представляет собой локальное повышение температуры в городской зоне по сравнению с окружающими сельскими или природными территориями. Этот эффект обусловлен рядом факторов, включая тепловые свойства материалов, из которых построены здания и дороги, а также антропогенные источники тепла. Для того чтобы этот эффект проявился в полной мере и был очевиден в прогнозе, необходимо более длительное время моделирования, позволяющее оценить накопление тепла и его распределение. Таким образом, выбор 4 суток для прогноза оправдан необходимостью точного воспроизведения и анализа данного феномена.

Для системного анализа влияния городской застройки (на основе параметризации ВЕР) на ночные метеорологические поля была подготовлена серия ежемесячных карт:

- поля средней разности  $\Delta X = X(\text{урб}) - X(\text{без урб})$ , показывающие городской остров тепла;
- поля стандартного отклонения  $\sigma(\Delta X)$ , иллюстрирующие стабильность или синоптическую изменчивость эффекта.

Эти карты созданы для каждого января 2015, 2020, 2021 гг. в 00 ч.

На рисунке 3.12 представлено поле средней разности  $\Delta T = T2(\text{урб}) - T2(\text{без урб})$  за январь 2020 года.

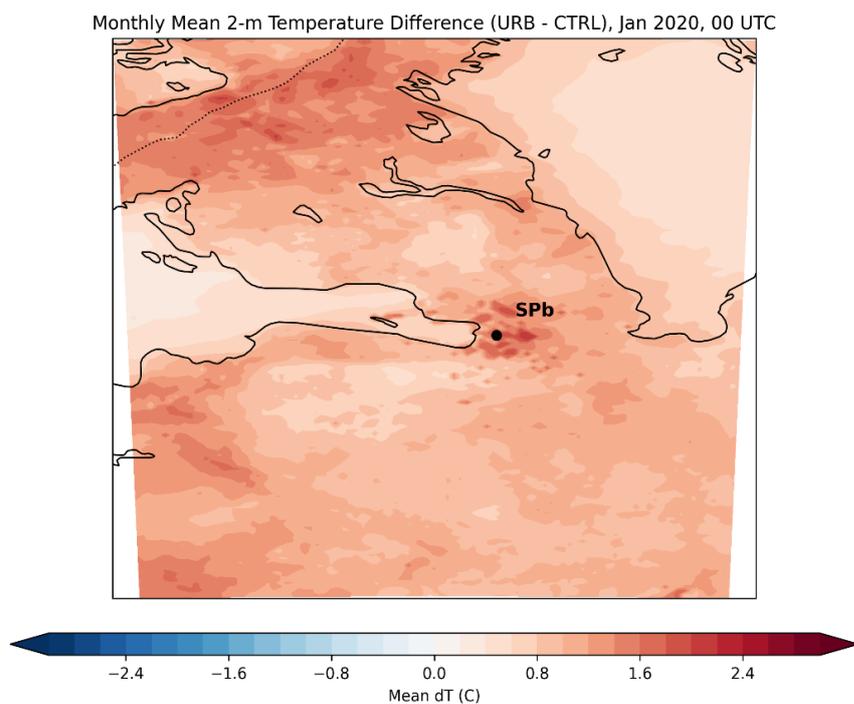


Рисунок 3.12 – Поле средней разности  $\Delta T = T_2(\text{урб}) - T_2(\text{без урб})$  за январь 2020 года

Максимальная разница прогноза, которая может быть интерпретирована, как обоснованная эффектом города,  $\Delta T$  около  $2,4\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 2,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  сосредоточена в Санкт-Петербурге, где плотность застройки и антропогенные тепловые потоки самые высокие. Сильнее всего остров тепла выражен в центре и на востоке модельной области. На западе и северо-западе, ближе к берегам Финского залива, разница температур  $\Delta T$  заметно меньше (до  $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), так как ветровой поток с водных объектов уменьшает городское тепло (рисунок 3.12).

На всей рассматриваемой территории наблюдаются либо положительные разницы, либо  $\Delta T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (над зелеными зонами и над водными объектами). Также высокие значения разницы температур воздуха находятся вблизи городов Карелии. Но нужно рассмотреть  $\sigma$  разницы для того, чтобы определить ее устойчивость и значимость (рисунок 3.12).

На рисунке 3.13 представлено поле стандартного отклонения разницы температуры воздуха за январь 2020 года.

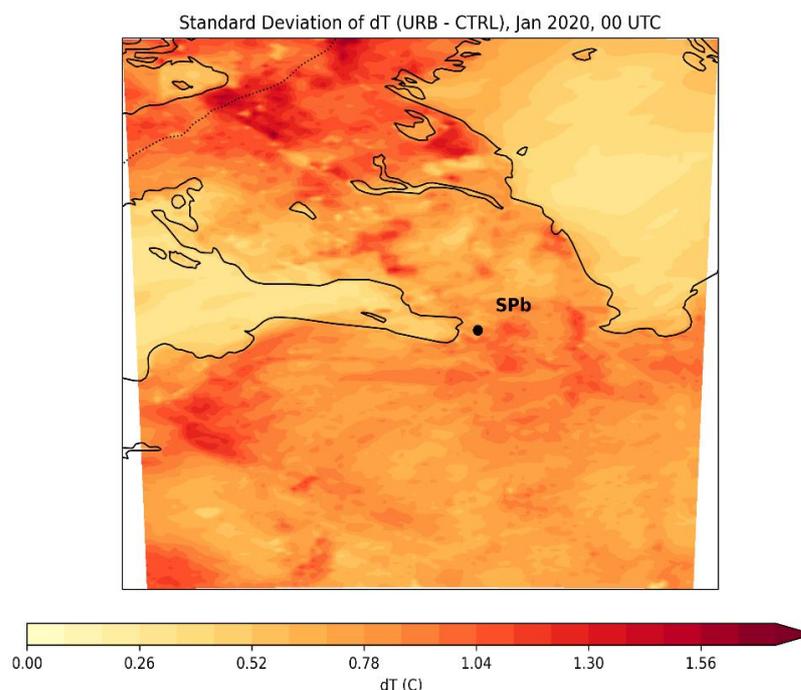


Рисунок 3.13 – Поле стандартного отклонения  $\Delta T$  за январь 2020 года

Анализируя результаты, можно сделать вывод о том, что наименьший разброс наблюдается над водными объектами, где влияние городской застройки практически отсутствует. В центре города также значение отклонения небольшое (до  $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) – это означает, что почти каждую ночь город дает примерно одинаковый прирост температуры. Восточней от центра разброс растет, следовательно, прирост температуры здесь зависит от синоптических условий. Участки, где наблюдалась высокая разница температуры (вне территории Санкт-Петербурга) имеют высокие значения отклонения, значит, велико влияние синоптических процессов (рисунки 3.12, 3.13).

Дополнительно для более детального анализа временной изменчивости температуры воздуха были построены графики «ящик с усами» по часам суток в конкретной точке, соответствующей Санкт-Петербургу (рисунок 3.14). Они позволяют оценить распределение температуры в каждый час суток на протяжении рассматриваемого периода (январь 2020 года).

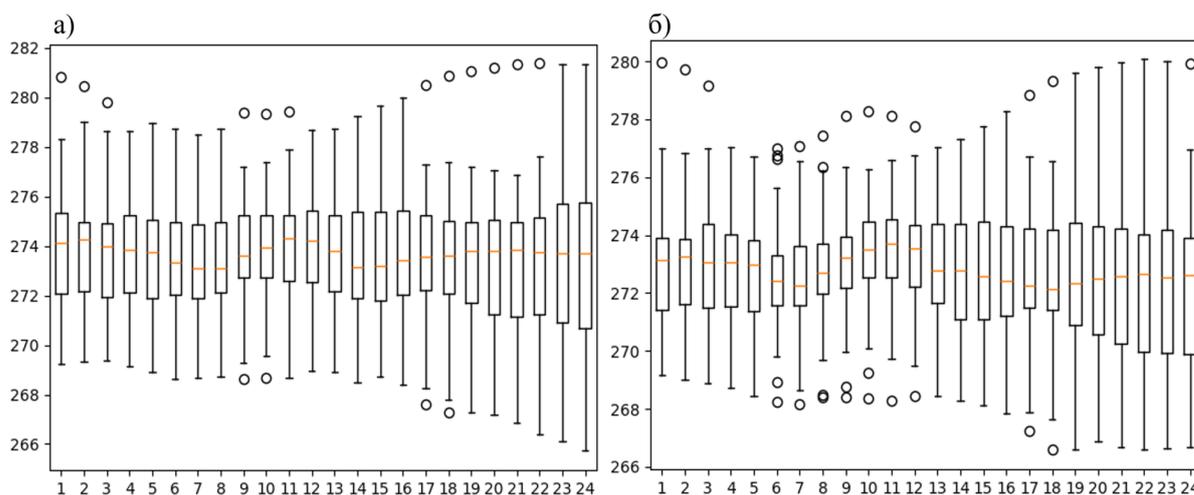


Рисунок 3.14 – Диаграмма «ящик с усами» для температуры воздуха на высоте 2 метра (январь 2020 года) а) с учетом урбанизации, б) без учета урбанизации

С учётом урбанизации медиана температуры (оранжевая линия на графиках рисунка 3.14) выше практически во всех временных интервалах. Это указывает на влияние урбанизации, которая повышает температуру (эффект «остров тепла»). Верхние «усы» достигают значений выше 280 К, но выбросы встречаются реже (рисунок 3.14а).

Учет урбанизации увеличивает изменчивость температуры, что выражается в более широких «усах». Это связано с локальным воздействием городской инфраструктуры на нагрев или охлаждение температуры за разные дни и сроки. Без урбанизации более однородные условия без дополнительных факторов нагрева и охлаждения (рисунок 3.14).

Тест Манна-Уитни подтвердил, что различия между двумя рядами температур являются статистически значимыми (статистика теста: 249210, р-значение:  $5.63 \times 10^{-9}$ ).

Далее рассмотрим поле различий температур  $\Delta T$  для января 2021 года (рисунок 3.15)

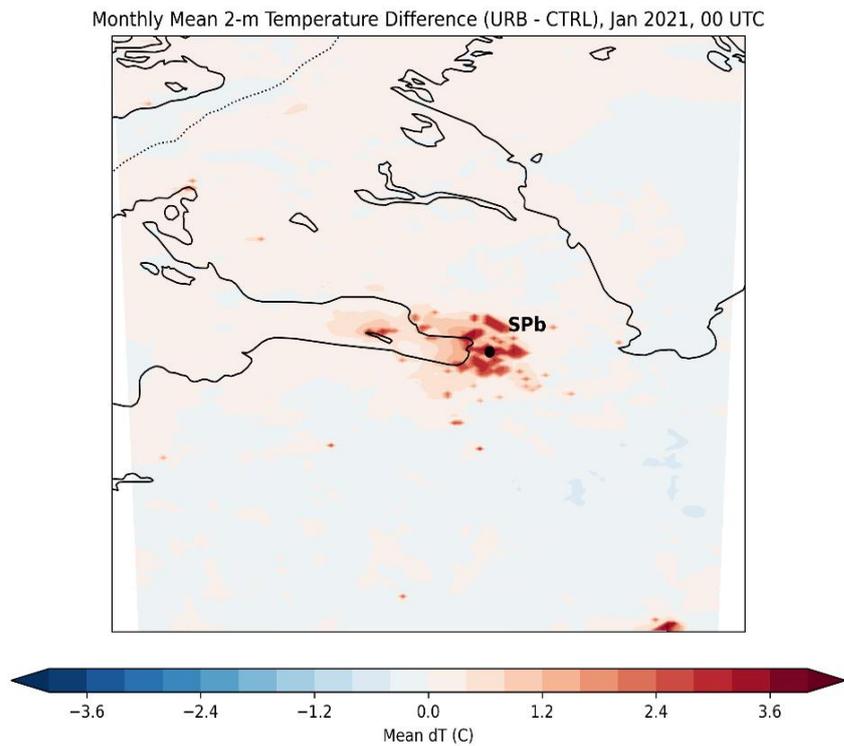


Рисунок 3.15 – Поле средней разности  $\Delta T = T_2(\text{урб}) - T_2(\text{без урб})$  за январь 2021 года

В 2021 году остров тепла более выражен. Разница температур составляет около 4 °С. В то время как разница над прилегающей территорией остается небольшой. Присутствуют участки, где включение схемы урбанизации понизило температуру (рисунок 3.15).

На рисунке 3.16 представлено поле стандартного отклонения разницы температуры за январь 2021 года.

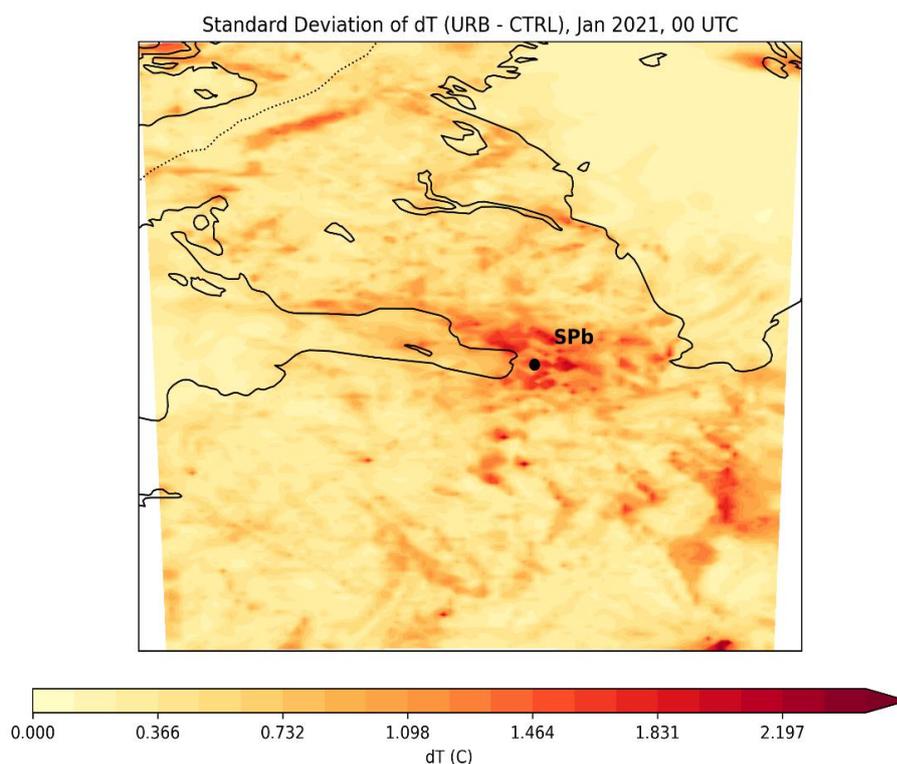


Рисунок 3.16 – Поле стандартного отклонения температуры  $\Delta T$  за январь 2021 года

Анализ разницы температуры позволяет сделать вывод о том, что в центре города и в прилегающих промзонах  $\sigma(\Delta T_2)$  достигает 1,6...2,2 °С. Это значит, что в одни ночи схема города увеличивала температуру, а в другие нет. В то же время в прилегающих территориях отмечается малая изменчивость, то есть эффект острова тепла зависел от синоптических условий (рисунок 3.16).

Моделирование для января 2015 проводилось только для периода 15-31 января, поскольку только с 15 января доступны данные модели GFS (начальные условия для WRF) с шагом 0.25 градусов. На рисунках 3.17, 3.18 представлены поле средней разности температуры и поле стандартного отклонения разности.

Monthly Mean 2-m Temperature Difference (URB - CTRL), Jan 2015, 00 UTC

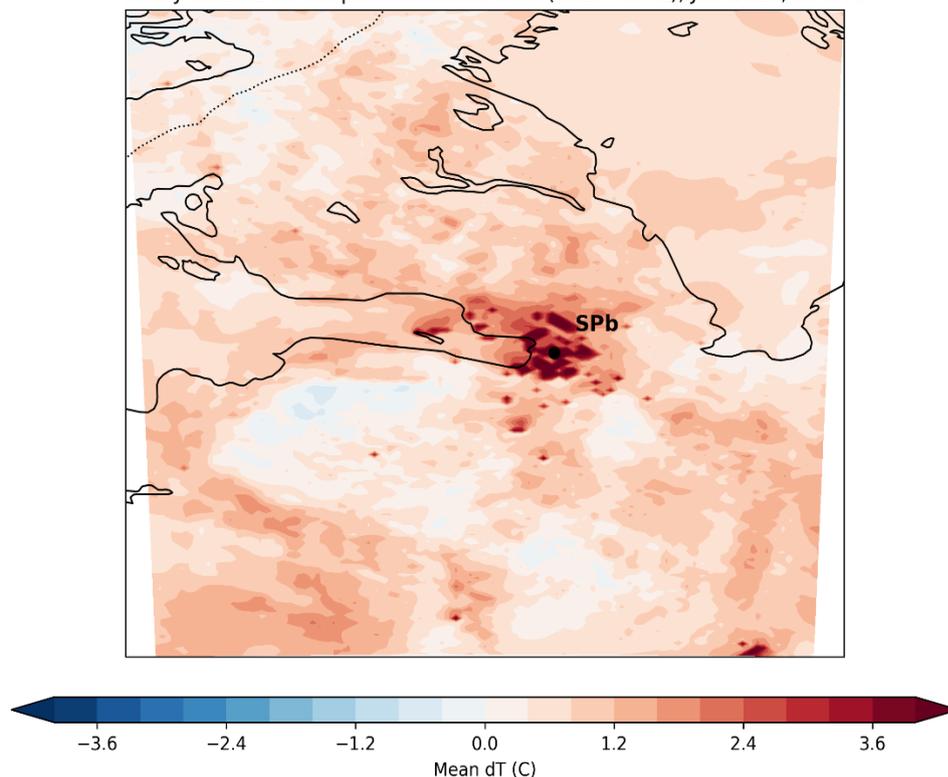


Рисунок 3.17 - Поле средней разности  $\Delta T = T_2(\text{урб}) - T_2(\text{без урб})$  за январь 2015 года

Практически по всей области параметризация урбанизации повысила температуру воздуха. Максимум разницы находится над Санкт-Петербургом (3,5...3,7 °C). Над водными объектами и пригородными районами  $\Delta T_2$  спадает до 0,2...0,6 °C. Для 2015 года самый выраженный эффект острова тепла (рисунок 3.17).

На рисунке 3.18 представлено поле стандартного отклонения разницы температуры за январь 2015 года.

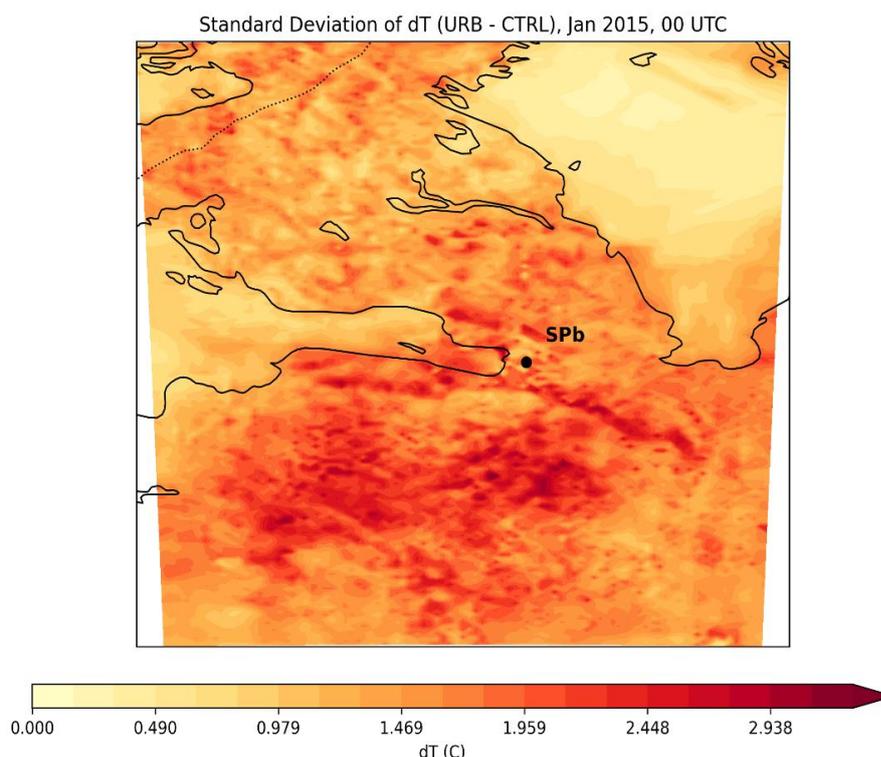


Рисунок 3.18 – Поле стандартного отклонения  $\Delta T$  за январь 2015 года

Низкая изменчивость наблюдается над водными объектами и в центре Санкт-Петербурга (примерно до  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Наибольшие значения  $\sigma$  находятся над прилегающими территориями, особенно на юге. (рисунок 3.18).

Последние 15 дней января 2015 года дают самый ярко выраженный остров тепла, но при этом также наблюдается зависимость от погодных условий (рисунки 3.17, 3.18).

На рисунке 3.19 представлено поле средней разности скорости ветра на высоте 10 м  $\Delta|V_{10}| = |V_{10}|(\text{урб}) - |V_{10}|(\text{без урб})$  за январь 2020 года.

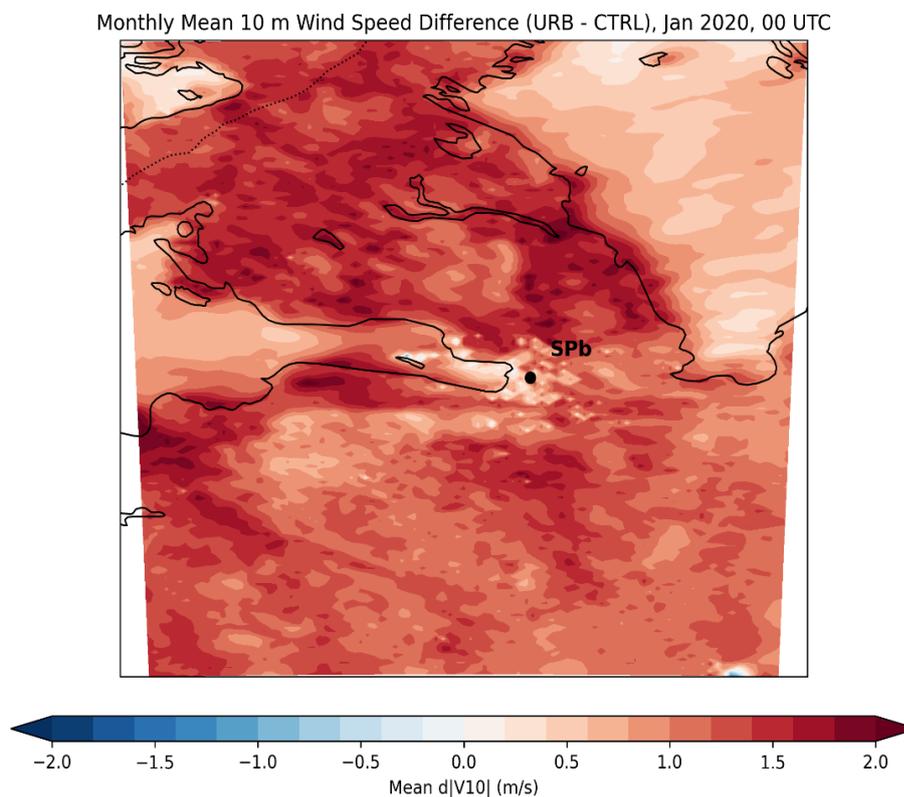


Рисунок 3.19 – Поле средней разности  $\Delta|V_{10}| = |V_{10}|(\text{урб}) - |V_{10}|(\text{без урб})$  за январь 2020 года

Диапазон значений разницы – от 0 до 2 м/с. Наибольшие расхождения наблюдаются над пригородными территориями. Меньшие значения разницы находятся над водными объектами и в центре Санкт-Петербурга. Также есть небольшой участок с отрицательными значениями (Кронштадт).

Параметризация города повысила скорость ветра у поверхности, за счет изменения турбулентного обмена и канального эффекта, причем большее усиление ветра наблюдается за пределами городской застройки (рисунок 3.19).

На рисунке 3.20 представлено поле стандартного отклонения разницы скорости ветра за январь 2020 года.

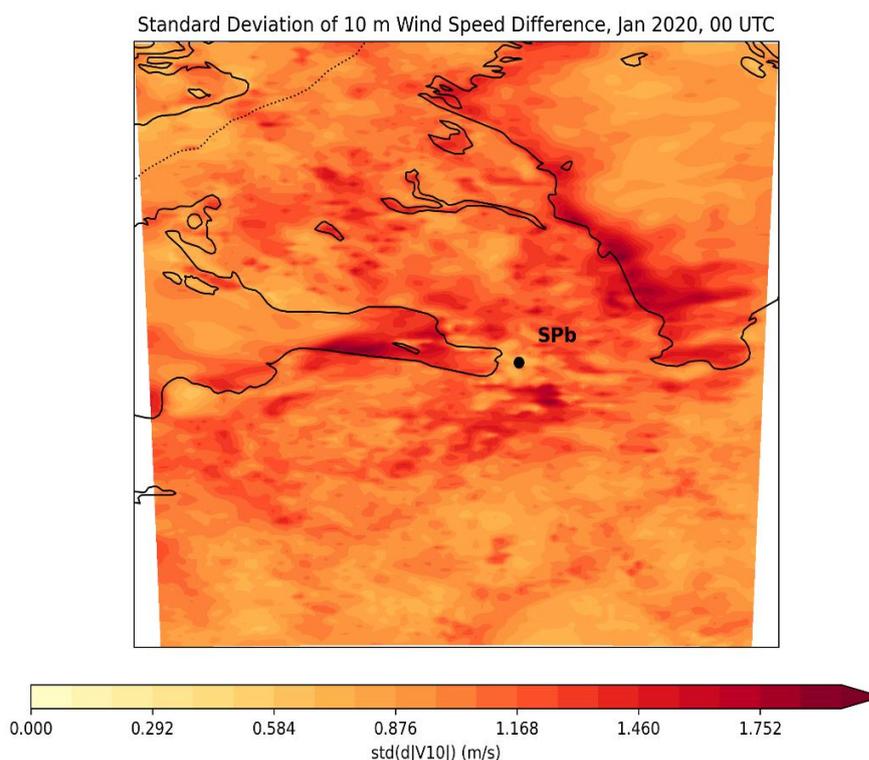


Рисунок 3.20 – Поле стандартного отклонения  $\Delta|V_{10}|$  за январь 2020 года

Максимальная изменчивость ( $\sigma \approx 1,6-1,8$  м/с) сосредоточена над пригородными районами, прибрежными районами и над водными объектами. Над центром города изменчивость не превышает 0,876 м/с, также, как и над водными объектами (дальше от границы с сушей).

Влияние города на ветер весьма нестабильно, это говорит о том, что синоптические условия диктуют, насколько параметризация изменит ветер (рисунок 3.20).

Для численного эксперимента за 2020 год была рассчитана локальная оценка метеорологических условий в точке, соответствующей Санкт-Петербургу. В частности, были построены графики розы ветров, агрегированные за все дни января одного и того же срока. Далее представлен сравнительный анализ распределения направления и скорости ветра при учёте параметризации урбанизации и без неё.

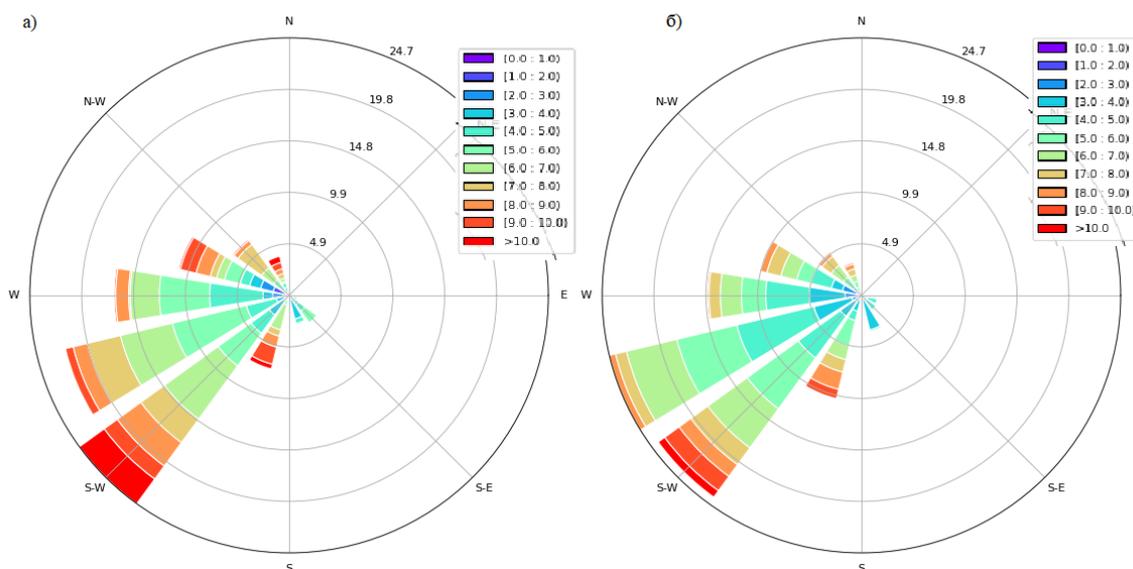


Рисунок 3.21 – Роза ветров для г. Санкт-Петербурга (январь 2020 года).  
 а) с учетом урбанизации, б) без учета урбанизации

В обеих розах ветров основными направлениями являются юго-западное (S-W) и западное (W), что соответствует климатическим особенностям региона в зимний период.

С учетом урбанизации наблюдается увеличение частоты ветров со скоростью свыше 10 м/с (красная зона). Это говорит о том, что юго-западные ветра усиливаются под влиянием урбанизации. Ветра со скоростью от 4 до 10 м/с также распространены, особенно в западных направлениях. Это может быть связано с влиянием городских объектов, которые усиливают ветровые потоки (рисунок 3.21 а).

Без учёта урбанизации интенсивность ветров снижается, преобладают умеренные скорости, а распределение становится более сглаженным. Это может быть связано с уменьшением локальной турбулентности и отсутствием дополнительных препятствий, таких как здания (рисунок 3.21 б).

Таким образом, учет урбанизации вносит изменения в розу ветров. Происходит усиление ветра западных направлений, благодаря турбулентным эффектам.

Дополнительно были построены графики «ящик с усами» для оценки распределения скорости ветра в каждый час суток за январь 2020 года в той же точке. Также по результатам, учитывающим урбанизацию и не учитывающим.

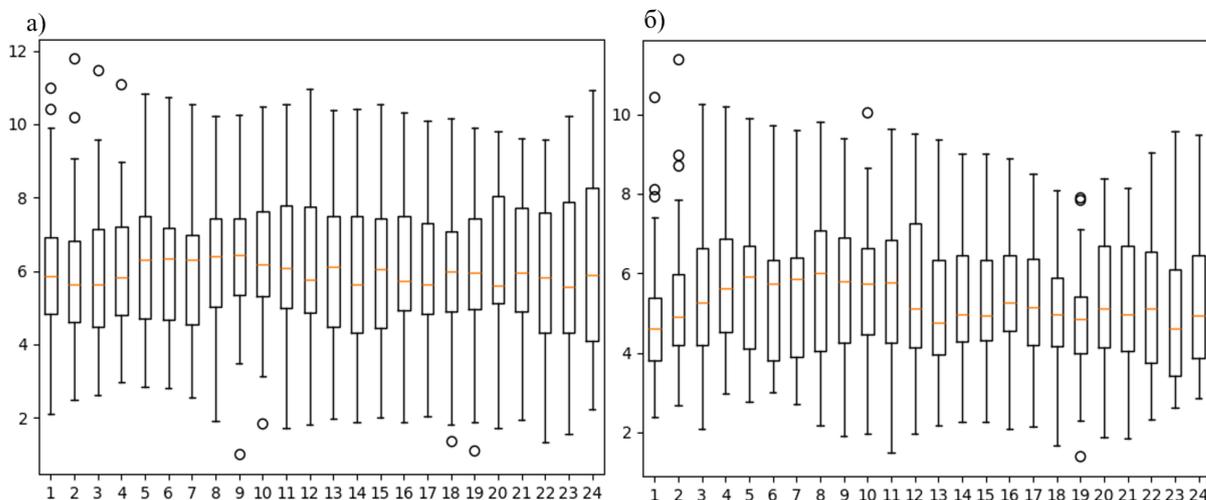


Рисунок 3.22 – «Ящик с усами» для скорости ветра (январь 2020 года).

а) с учетом урбанизации, б) без учета урбанизации

При учете урбанизации медиана скорости ветра (оранжевая линия на графиках рисунка 3.22) стабильно выше в большинстве интервалов по сравнению с графиком без урбанизации. Это указывает на общее повышение средней скорости ветра из-за влияния урбанизации. Разброс данных (размеры «усов» и «ящичков») значительный, что указывает на большую изменчивость скорости ветра. Это может быть связано с турбулентными потоками, вызванными городской застройкой. Несмотря на равное количество выбросов, при наличии урбанизации они чаще наблюдаются в нижней части распределения (рисунок 3.22).

Проведённый тест Манна-Уитни подтвердил статистическую значимость различий между двумя сценариями (статистика теста: 250340, р-значение:  $2.03 \times 10^{-9}$ ).

Также были проанализированы данные для территории заказника «Мшинское болото». Мшинское болото выбрано в качестве репрезентативной

природной территории, где влияние антропогенных факторов минимально, что позволяет оценить отличия в метеорологических условиях между урбанизированной и природной средой.

Анализ розы ветров, выявил различия в распределении скоростей и направлений ветра в зависимости от наличия или отсутствия параметризации урбанизации.

При учёте урбанизации наблюдается преобладание ветров юго-западного сектора, при этом частота сильных ветров, скорость которых превышает 6 м/с, значительно увеличивается именно в этом направлении. Характерной особенностью является наличие ветров с высокими скоростями, достигающими 9 м/с и выше, которые формируют ярко выраженные пики в юго-западном секторе. Максимальная скорость ветра достигает 10 м/с, что связано с влиянием урбанизированных территорий, создающих эффект «канализации» воздушных потоков.

В условиях отсутствия урбанизации также сохраняется доминирование ветров юго-западного сектора, однако скорости ветра в этом направлении оказываются ниже. Частота слабых ветров с диапазоном скоростей от 0 до 3 м/с увеличивается, что приводит к более сглаженному распределению. Максимальная скорость ветра при этом также достигает 9 м/с, однако пики менее выражены по сравнению с урбанизированной моделью.

Рассмотрим поле средней разности скорости ветра за январь 2021 года (рисунок 3.23).

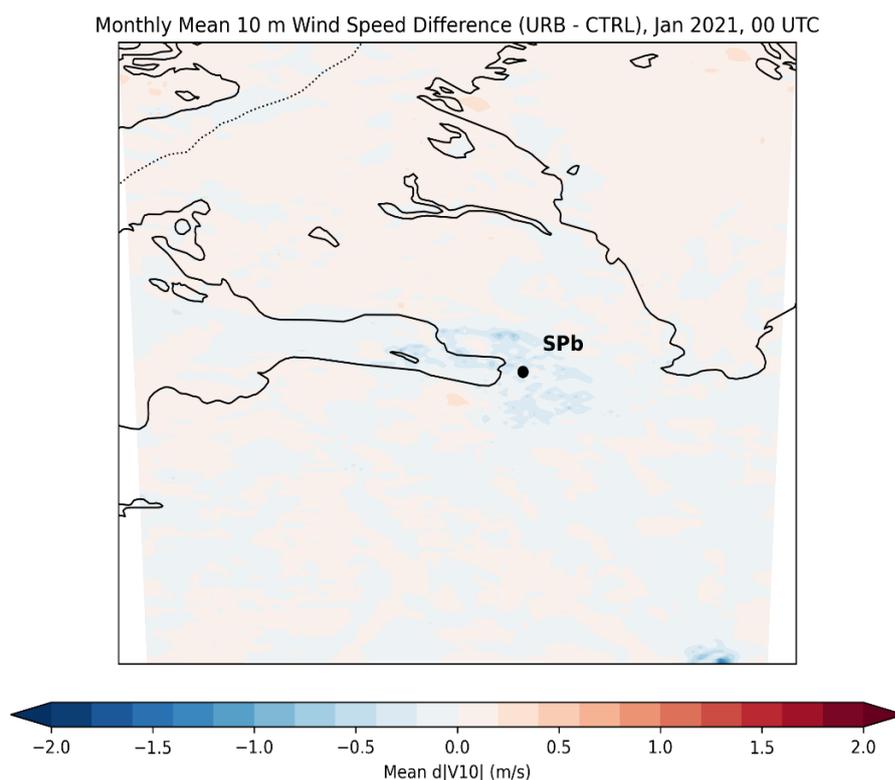


Рисунок 3.23 – Поле средней разности  $\Delta|V_{10}| = |V_{10}|(\text{урб}) - |V_{10}|(\text{без урб})$  за январь 2021 года.

В большей части области моделирования разница в модуле скорости ветра находится в диапазоне  $\pm 0,2$  м/с. Уменьшение скорости ветра отмечается над Санкт-Петербургом (примерно на  $0,25$  м/с). Небольшое усиление скорости ветра (на  $0,2$  м/с) наблюдается над пригородными территориями и водными объектами (рисунок 3.23).

Схема параметризации практически не изменила скорость ветра на 10 метрах, но немного уменьшила скорость ветра в городе, вероятно из-за торможения зданиями (рисунок 3.23).

Проанализируем стандартное отклонение разницы модуля скорости ветра, представленное на рисунке 3.24.

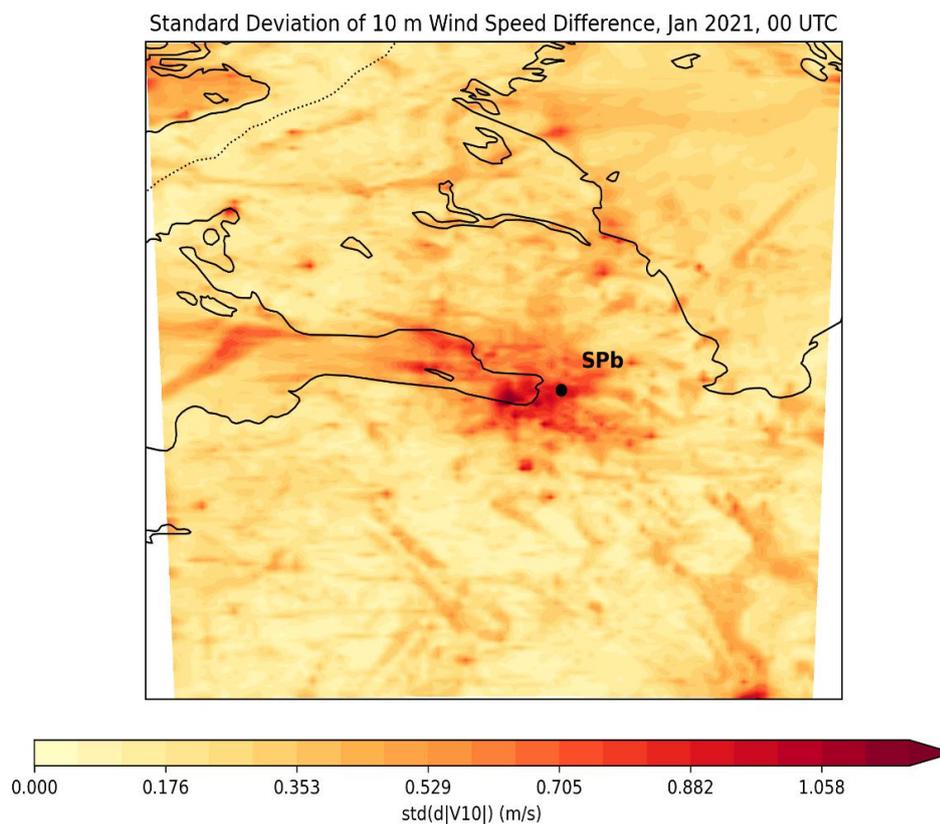


Рисунок 3.24 – Поле стандартного отклонения  $\Delta|V_{10}|$  за январь 2021 года

Минимальная изменчивость в поле стандартного отклонения модуля различий скорости ветра сконцентрирована над большей частью пригородных территорий и водных объектов (до 0,4 м/с). Высокая изменчивость наблюдается над городом (до 1,1 м/с). Влияние схемы урбанизации в городе сильно зависит от погодных условий (рисунок 3.24).

На рисунке 3.25 представлено поле средней разницы скорости ветра за 15 дней января 2015 года.

Monthly Mean 10 m Wind Speed Difference (URB - CTRL), Jan 2015, 00 UTC

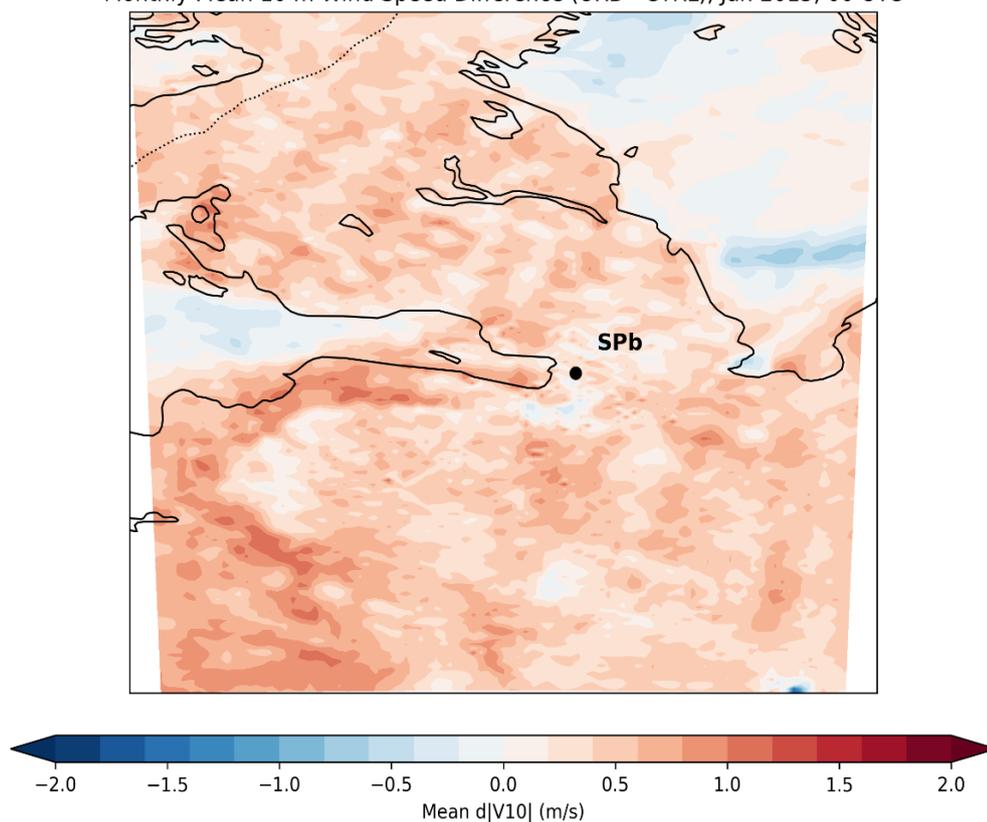


Рисунок 3.25 – Поле средней разности  $\Delta|V10| = |V10|(\text{урб}) - |V10|(\text{без урб})$  за январь 2015 года

Практически во всей модельной области положительные значения. Максимальные различия достигают 1 м/с над прибрежной территорией Финского залива. Над Санкт-Петербургом и водными объектами встречаются отрицательные значения разницы (рисунок 3.25).

На рисунке 3.26 представлено поле  $\sigma |\Delta V10|$  для января 2015 года.

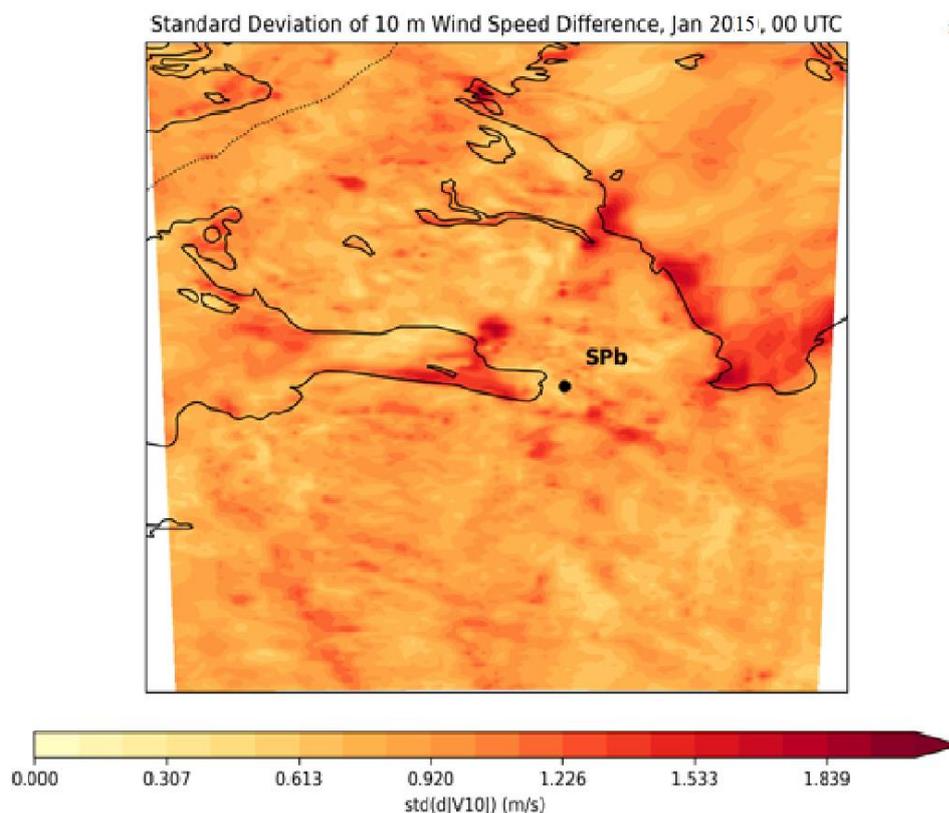


Рисунок 3.26 – Поле стандартного отклонения  $\Delta|V10|$  за январь 2015 года

Наибольшая изменчивость наблюдается вблизи прибрежных территорий Финского залива и Ладожского озера (до 2 м/с). Над центром города изменчивость не превышает 0,613 м/с (рисунок 3.26).

В среднем параметризация усилила ветер на 10 метрах за пределами плотной застройки, при этом эффект нестабилен на окраинах ( $\sigma$  до 2 м/с), но сравнительно постоянен в центре города (рисунок 3.26).

Теперь оценим разницу в количестве осадков. На рисунке 3.27 поле средней разности накопленных осадков за январь 2020 года.

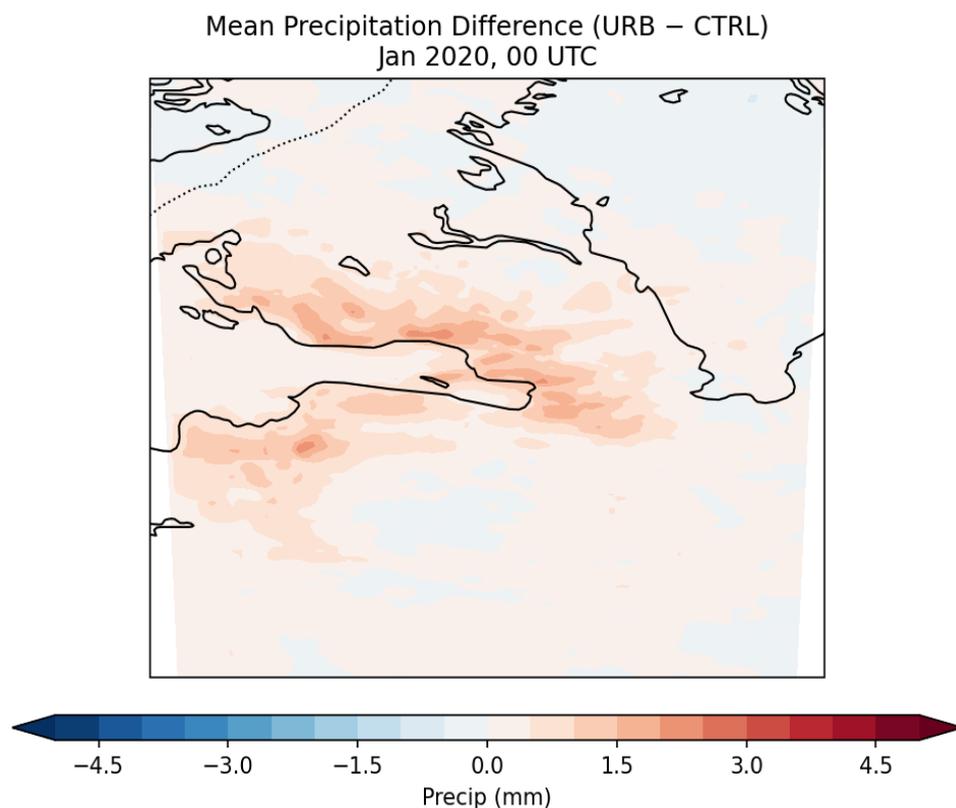


Рисунок 3.27 – Поле средней разности  $\Delta\text{Precip} = \text{Precip}(\text{урб}) - \text{Precip}(\text{без урб})$   
за январь 2020 года

Большая часть поля имеет положительный знак разницы (до 0,5 мм/сутки). Также присутствуют отрицательные значения над природными зонами (до -0,5 мм/сутки). Наибольшая разница наблюдается над Санкт-Петербургом и на западе от города вдоль прибрежной территории Финского залива (до 2 мм/сутки).

Рассмотрим  $\sigma(\Delta\text{Precip})$  на рисунке 3.28.

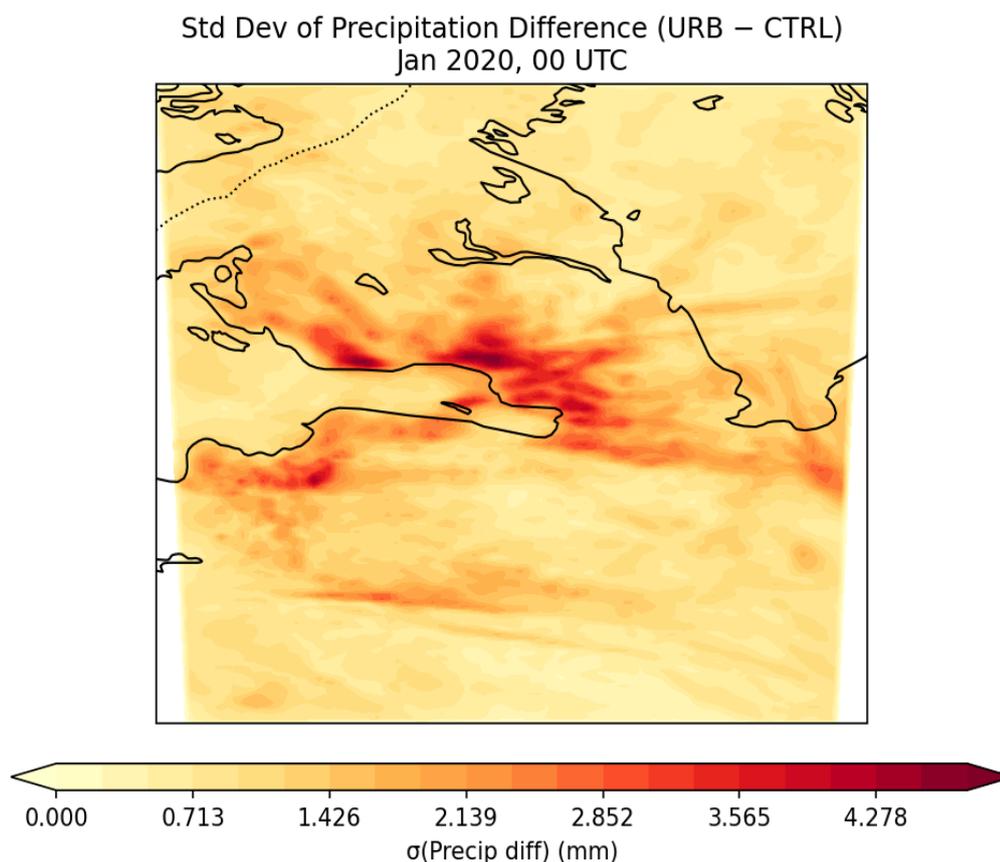


Рисунок 3.28 – Поле стандартного отклонения  $\Delta\text{Precip}$  за январь 2020 года

Повышенная изменчивость ( $\sigma \approx 2,5 - 4,5$  мм/сутки) локализована над городом и в прибрежных районах Финского залива, что отражает сильную синоптическую зависимость эффекта: в одни ночи схема добавляет несколько миллиметров осадков, в другие – практически не меняет количество осадков (рисунок 3.28).

Урбанизация дает большее количество осадков над городской территорией (до 2 мм/сутки), но это усиление неустойчиво ( $\sigma$  до 4,5 мм/сутки). Тогда как над водой и природными зонами городской вклад минимален (рисунок 3.28).

На рисунке 3.29 представлено поле средней разности количества осадков за январь 2021 года.

Mean Precipitation Difference (URB – CTRL)  
Jan 2021, 00 UTC

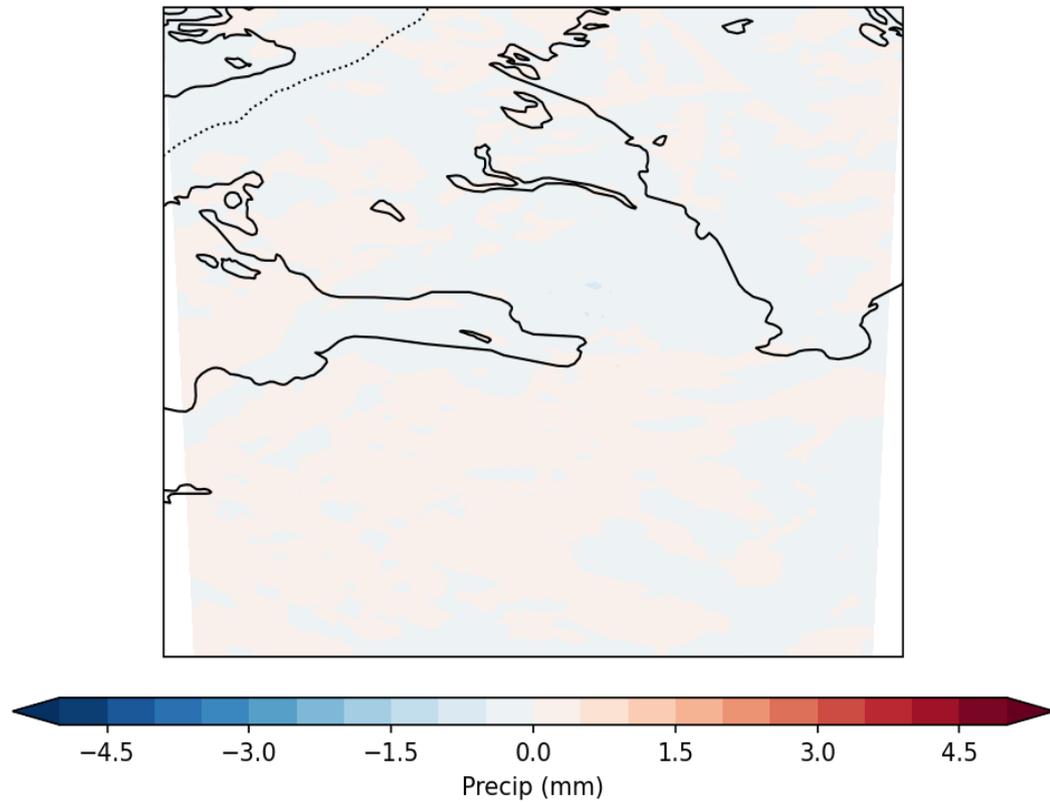


Рисунок 3.29 – Поле средней разности  $\Delta\text{Precip} = \text{Precip}(\text{урб}) - \text{Precip}(\text{без урб})$   
за январь 2021 года

Практически нулевая разница в количестве осадков над всей территорией (от -0,5 до 0,5 мм/сутки). Выраженного эффекта от городской застройки нет (рисунок 3.29).

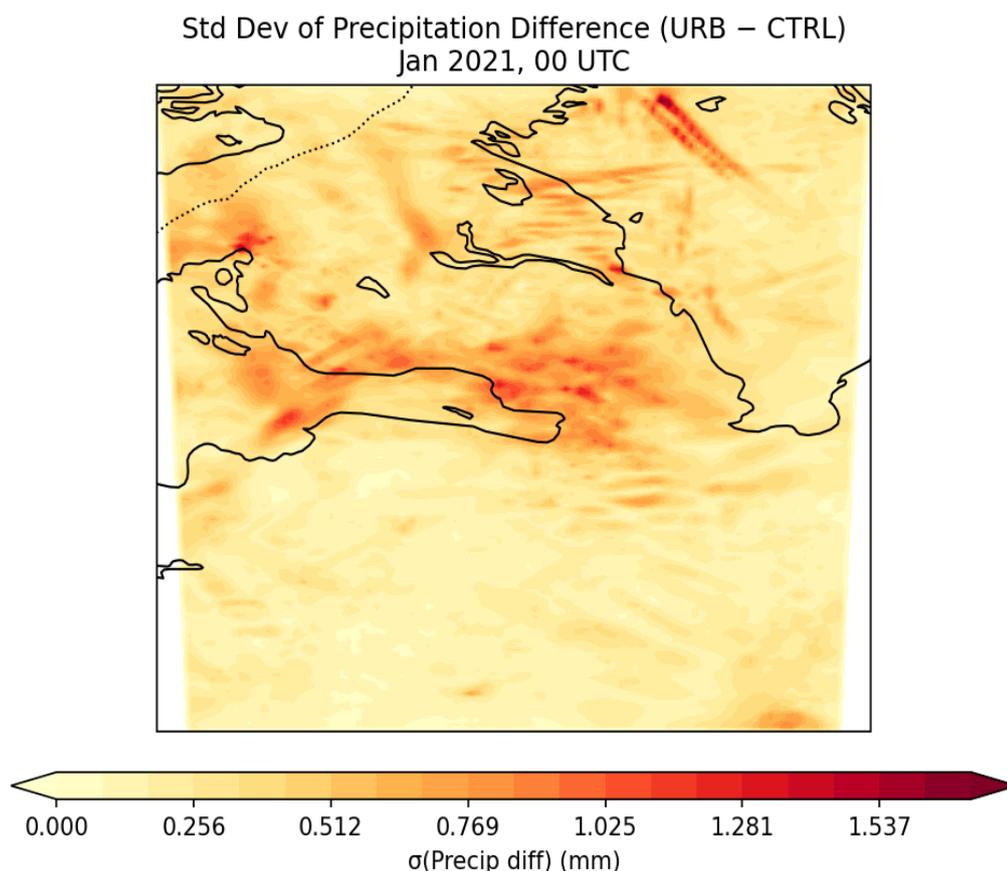


Рисунок 3.30 - Поле стандартного отклонения  $\Delta\text{Precip}$  за январь 2021 года

Низкая изменчивость в количестве осадков наблюдается над большей частью территорий (до 0,256 мм/сутки). Средняя изменчивость (0,5...1,0 мм/сутки) над городом и на северо-западе от города. Локальные всплески до 2,0 мм/сутки зафиксированы на северо-востоке и северо-западе от города (рисунок 3.30).

Хотя средняя разность почти нулевая, её ночные колебания могут достигать 2 мм/сутки на окраинах в зависимости от погодных условий (рисунки 3.29, 3.30).

На рисунке 3.31 представлено поле средней разности количества осадков за 15 дней января 2015 года.

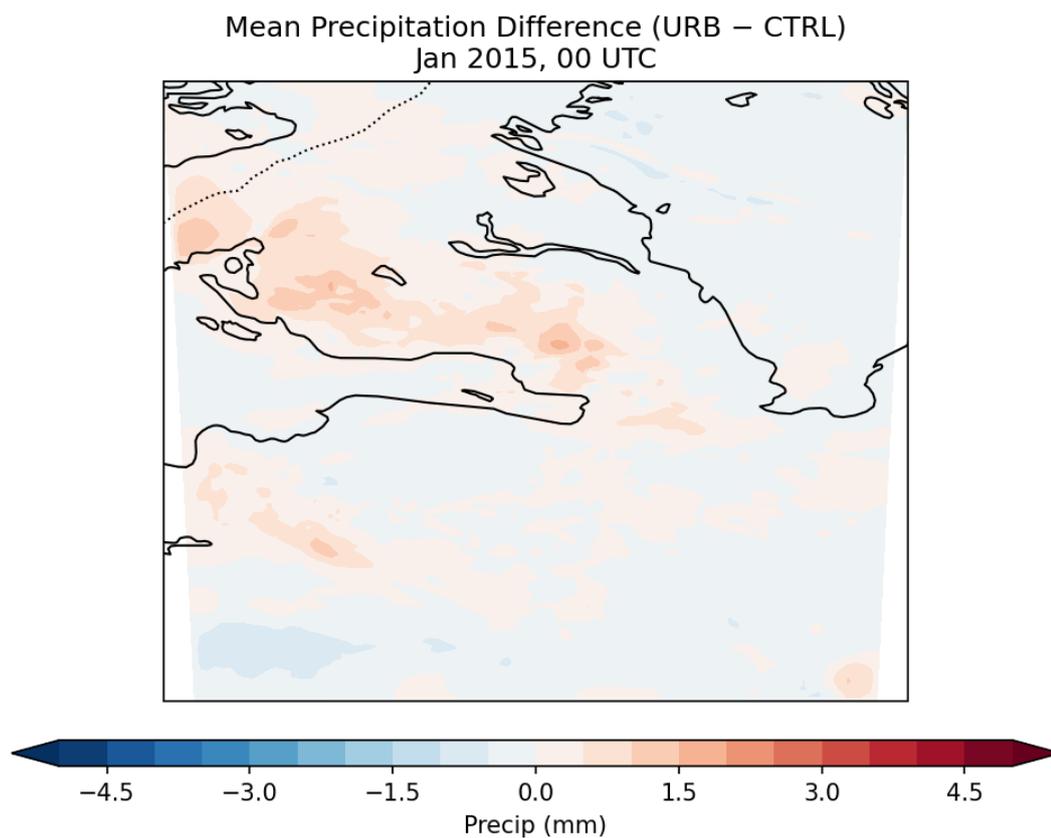


Рисунок 3.31 – Поле средней разности  $\Delta\text{Precip} = \text{Precip}(\text{урб}) - \text{Precip}(\text{без урб})$   
за январь 2015 года

Над большей частью области наблюдаются слабые отрицательные значения (не превышающие  $-0,5$  мм/сутки). На севере от Финского залива наибольшие значения разницы (до 2 мм/сутки).

Рассмотрим теперь  $\sigma(\Delta\text{Precip})$  за этот же год, представленные на рисунке 3.32.

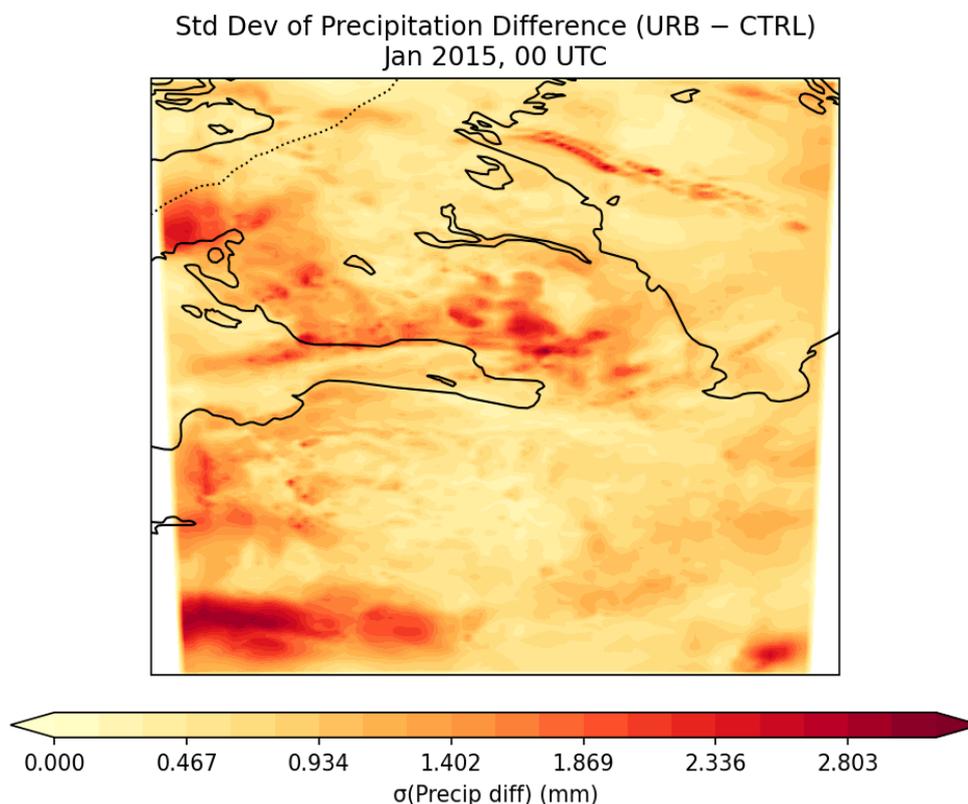


Рисунок 3.32 – Поле стандартного отклонения  $\Delta\text{Precip}$  за январь 2015 года

Над большей частью территории значения стандартного отклонения не превышают 0,934 мм/сутки. Высокая изменчивость сосредоточена на севере от Финского залива и на юго-западе области моделирования (рисунок 3.32).

Подводя итог анализа проведённых экспериментов можно сделать следующие выводы:

Параметризация ВЕР за исследуемые январь 2015, 2020, 2021 гг показала:

- Городской остров тепла в полях температуры на высоте 2 м ( $T_2$ ), наиболее выраженный в 2015 и 2021 (до 4 °C), в самом центре города наблюдалась небольшая изменчивость, но отдаляясь от центра изменчивость росла (большая зависимость от погодных условий);
- Усиление скорости ветра за 2015, 2020 годы, причем большее вне города. Наименьшее влияние на ветер в 2021 году (уменьшение скорости ветра в городе). Оба эффекта сильно зависят от синоптической ситуации;

- Увеличение количества осадков в городе и на севере от Финского залива в 2015 и 2020 годы (похожее пространственное распределение). И слабое уменьшение в городе за 2021 год. Изменчивость высокая.

Полученные результаты подчеркивают важность учета городской застройки и ее турбулентных эффектов при локальном прогнозе температуры, скорости ветра и количества осадков.

### 3.3 Верификация результатов моделирования

В настоящем исследовании важную роль играет прямое сопоставление двух вариантов прогноза, выполненных при использовании одной и той же модели WRF-ARW: без учета урбанизации и варианта с активированной параметризацией урбанизации. Сравнение необходимо по нескольким причинам.

Гипотеза о том, что ВЕР уменьшает ошибки в приземном слое, должна быть подтверждена измерениями, так как городская схема увеличивает вычислительную стоимость расчета. Кроме того, влияние урбанизации потенциально зависит от погодных условий. Анализ трех январских периодов (2015, 2020, 2021 гг.) дает возможность проверить устойчивость проявления эффекта города при различных синоптических ситуациях.

В данном исследовании сначала были произведена верификация результатов моделирования по сравнению с радиозондовыми профилями температуры и ветра, позволяющие оценить точность модели по всему вертикальному столбу атмосферы для точки, соответствующей Воейково.

При выборе расчетной точки, соответствующей радиозондовой станции Воейково использовался метод ближайшего соседа: по массиву координат ячеек модельной области вычислялась матрица  $(lat_{grid} - 59,95)^2 + (lon_{grid} - 30,70)^2$ , затем выбирался индекс (координата ячейки) с минимальным значением этой матрицы с помощью функции «argmin», и он преобразовывался в двумерные индексы сетки через «np.unravel\_index».

Таким образом, анализировался модельный профиль из узла, ближайшего к указанным географическим координатам станции.

На рисунке 3.33 представлены профили средней абсолютной ошибки (MAE) и среднеквадратического отклонения (RMSE) для каждого уровня модели, осредненные по дням.

Ошибки распределяются по высоте схожим образом.

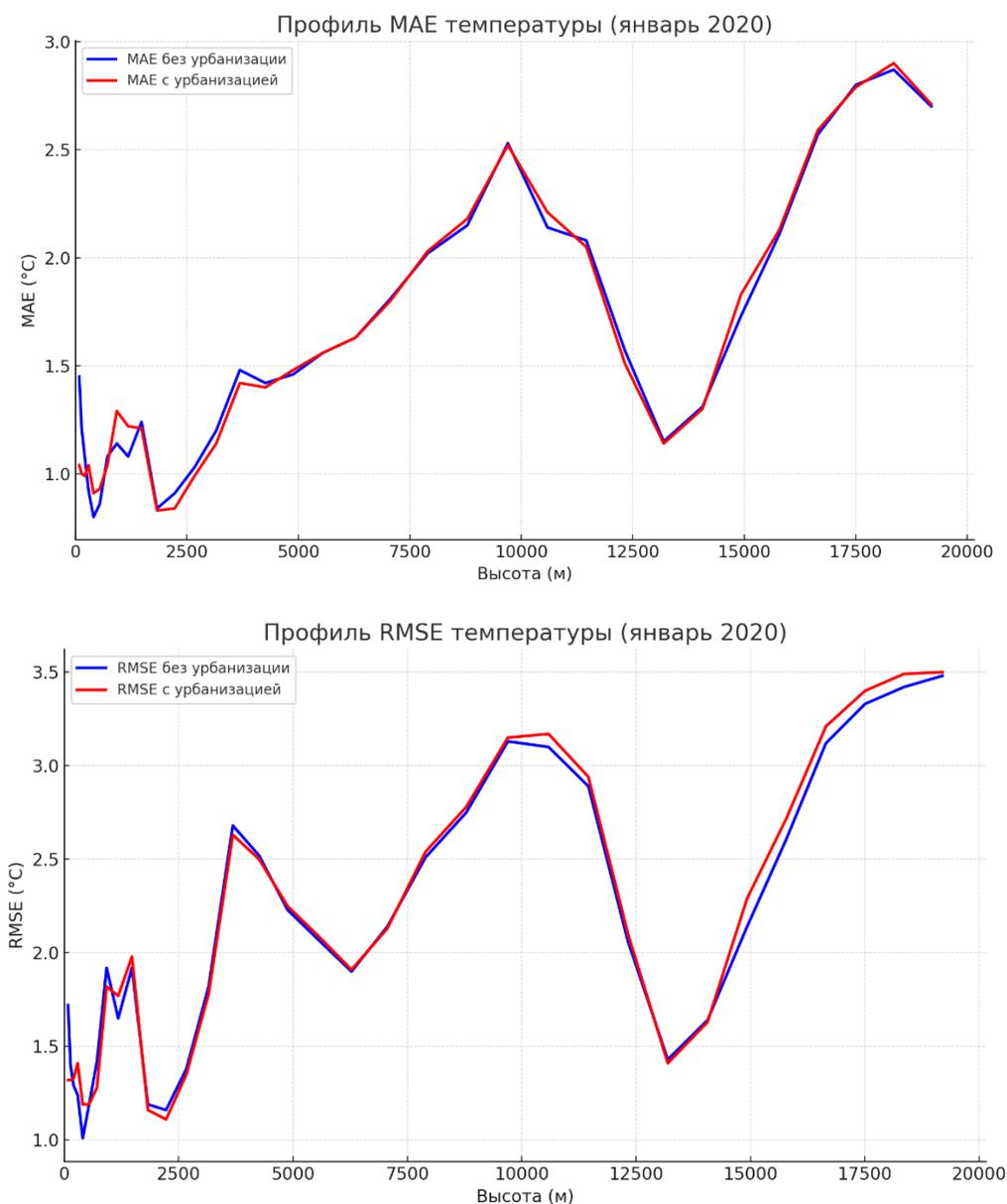


Рисунок 3.33 – Профили средней абсолютной ошибки и среднеквадратического отклонения (январь 2020 года)

До высоты около 300 метров модель лучше всего описывает температуру воздуха: MAE и RMSE не превышают 1 °C (рисунок 3.33).

На высотах 0,5–1 км на рисунке 3.33 наблюдается рост ошибок (до 1,5–1,8 °C). Причина этого роста – устойчивые зимние инверсии. Для иллюстрации были отобраны два характерных дня. На рисунке 3.34а показан случай за 11 января 00 ч, когда урбанизация сглаживает инверсию, а модель без урбанизации не воспроизводит инверсию вовсе. На рисунке 3.34б представлены профили за 18 января 00 ч, где урбанизация уже лучше описывает нижнюю инверсию, а базовая схема снова не показывает ее.

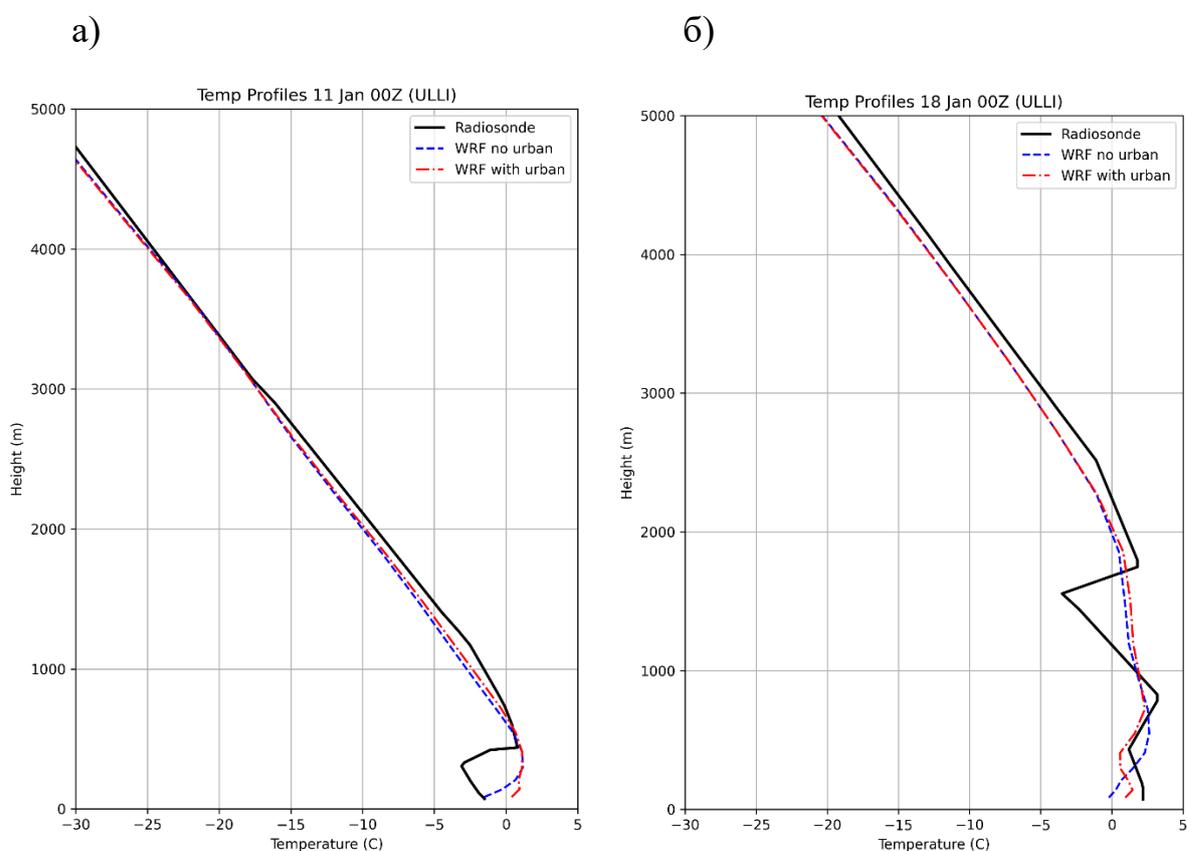


Рисунок 3.34 – Профили температуры. а) 11.01.2020 (00 ч), б) 18.01.2020 (00ч)

В нижней тропосфере (1–3 км) ошибки снижаются до 1,3–1,6 °C. На этих высотах температуру воздуха определяет крупномасштабная динамика, а локальные процессы влияют меньше, поэтому обе конфигурации модели хорошо воспроизводят температуру (рисунок 3.33)

Выше 5 км снова наблюдается рост ошибок, а ближе к тропопаузе (10–12 км) наблюдается их максимум: RMSE достигает более 3 °C. На этой высоте происходит резкий переход от тропосферного к стратосферному градиенту и любая неточность в определении положения тропопаузы резко увеличивает разницу между температурными профилями (рисунок 3.33).

Снижение ошибок на высоте ~13–14 км обусловлено устойчивой динамикой нижней стратосферы, выше рост ошибок, вероятно, связан с влиянием стратосферного полярного вихря (рисунок 3.33).

Итак, наилучшие результаты модель демонстрируют у поверхности, в слое 1–3 км и в нижней стратосфере; наихудшие – на верхней границе пограничного слоя, в средней тропосфере, в районе тропопаузы и выше (рисунок 3.33).

На рисунке 3.35 представлены модельные профили температуры и результаты радиозондирования за 2 января 2020 года (по всей доступной высоте).

Как отмечалось ранее, обе конфигурации модели хуже всего воспроизводят температуру в условиях изотермии и инверсии. Также при сравнительном анализе ошибок, осредненных по дням для каждого уровня модели, было выявлено, что наибольшие расхождения между моделями наблюдаются в приземном слое до 2 км, поэтому далее для расчета ошибок будут отобраны разные диапазоны высоты (рисунок 3.35).

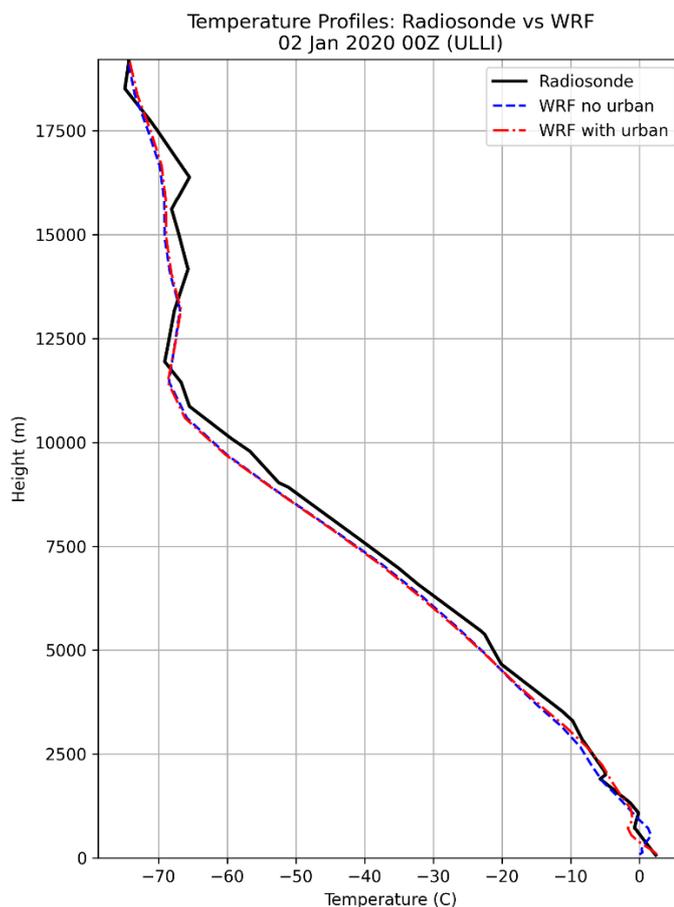


Рисунок 3.35 – Профили температуры за 02.01.2020 (00 ч)

Для каждого дня (всего 26 дней) были рассчитаны ошибки (Bias, MAE, RMSE), осредненные по четырем характерным диапазонам высоты:

Первый диапазон – это конкретный уровень модели, соответствующий высоте ~84,6 м.

Второй диапазон – слой до 200 м.

Третий диапазон – до 2 км.

Четвертый диапазон – вся толщина атмосферы (до ~20 км).

Такой агрегированный подход позволяет выявить слой, в котором параметризация урбанизации улучшает прогноз; оценить, как точность меняется от погодных условий; проверить, уменьшает ли городская схема ошибку по всей колонке или перераспределяет ее по высоте.

После сравнения полученных ошибок составлена сводная таблица 3.1, состоящая из условных кодов. «1» означает, что обе метрики (MAE и RMSE)

меньше у модели с учетом урбанизации. «0» – обе метрики меньше у модели без учета урбанизации. «С» – у модели одна из ошибок меньше, а другая больше. Такое представление позволяет быстро увидеть дни с выигрышем, проигрышем или смешанным результатом модели с учетом урбанизации.

Таблица 3.1 – Классификация качества прогноза Т по средней абсолютной ошибке и СКО

День	84,6 м	до 200 м	до 2 км	до 20 км
2	1	1	1	1
4	1	1	0	с
5	1	1	1	1
6	0	0	0	0
7	1	1	1	1
8	1	1	0	0
9	1	0	0	0
10	1	1	1	с
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	1	1	0	1
14	1	1	1	1
15	0	0	0	0
16	1	1	1	1
17	1	1	0	0
18	1	1	1	с
19	1	1	1	с
20	1	1	1	1
21	0	0	с	0
22	1	1	1	0
23	1	1	1	с
24	1	0	0	0
25	1	1	1	1
26	0	0	0	0
27	1	1	1	1
28	1	1	1	1

На уровне модели ~84,6 м схема урбанизации улучшила прогноз температуры в 20 случаях из 26 ( $\approx 77\%$ ), отрицательный эффект всего в 6 случаях. В слое до 200 м преимущество стало меньше, но все еще заметно: в 18 случаях ошибки меньше ( $\approx 69\%$ ), в 8 случаях ошибки больше. До 2 км у модели с учетом урбанизации метрики ошибок меньше в 14 случаях ( $\approx 54\%$ ), в 11 случаях – больше. И один «смешанный» случай, когда MAE больше, а RMSE меньше у модели с урбанизацией. При оценке ошибки прогноза по всей модельной атмосфере (до 20 км) преимущества у конфигурации с параметризацией города уже нет – 10 случаев с меньшими ошибками, 11 с большими и 5 «смешанных» случаев (таблица 3.1).

Таким образом, эффект городской параметризации ярко выражен у поверхности и в пределах городского пограничного слоя; по мере роста удаления от поверхности его вклад ослабевает и к масштабу всей атмосферы статистически не выделяется. Это подтверждает выводы, сделанные по профильным графикам: урбанизация в модели работает именно там, где должна – на уровнях до 300 метров, а дальше её влияние уменьшается.

При анализе ошибок профилей скорости ветра было установлено, что на 18 уровнях более точным оказался прогноз без урбанизации, на 11 уровнях – прогноз с урбанизацией, на 5 уровнях получились смешанные результаты.

Для скорости ветра ошибки у модели с урбанизацией уменьшаются при увеличении слоя атмосферы. На уровне 84,6 м схема улучшила прогноз только в 8 случаях ( $\approx 31\%$ ). В слое до 200 м схема города улучшила прогноз в 10 случаях ( $\approx 38\%$ ). До 2 км – в 17 случаях ( $\approx 65\%$ ). Для слоя до 20 км – в 15 случаях ( $\approx 58\%$ ). То есть, модель с учетом города эффективно воспроизводит скорость ветра в пределах нижней тропосферы, но в приземном слое ухудшает прогноз.

Тот же алгоритм был применен и для января 2021 года. На уровне  $\approx 84,6$  м в 14 из 28 дней (50%) ошибки оказались меньше у модели с урбанизацией, в оставшихся 14 днях – у модели без урбанизации. В слое до 200 м смешанные результаты: 13 дней ( $\approx 46\%$ ) с улучшением, столько же

с ухудшением и ещё 2 дня ( $\approx 7\%$ ) со «спорным» результатом. До 2 км урбанизация чаще ухудшала прогноз: в 17 днях из 28 ( $\approx 61\%$ ) ошибки оказались больше, чем в базовой конфигурации; лишь в 11 днях ( $\approx 39\%$ ) наблюдалось улучшение прогноза. По всей атмосфере (до 20 км) урбанизация ухудшила прогноз: 13 дней ( $\approx 46\%$ ) с большими ошибками, 11 дней ( $\approx 39\%$ ) с улучшением и 4 дня ( $\approx 14\%$ ) со смешанным результатом.

В январе 2021 года введение параметризации города оказала на прогноз ветра противоположное влияние по сравнению с 2020 годом. На самом нижнем модельном уровне ( $\sim 84,6$  м) она улучшила результат в 17 из 28 суток, то есть примерно в 61 % случаев; в остальные 39 % базовая конфигурация оказалась точнее. Преимущество стало больше в слое до 200 м: здесь урбанизация снизила обе ошибки (MAE и RMSE) в 20 случаях из 28, что соответствует  $\approx 71\%$  выборки, тогда как ухудшения зафиксированы лишь в 29 % дней. В слое до 2 км схема урбанизации давала преимущество и проигрыш поровну (по  $\approx 46\%$ ), а  $\approx 7\%$  остались смешанными. В слое до 20 км модель улучшила прогноз всего в 39% случаях, 14 % смешанных случаев.

Таким образом, в январе 2021 года введение схема параметризации города однозначно улучшало прогноз скорости ветра в слое от поверхности 200 метров, то есть в том слое, который критичен для городской аэродинамики. Выше 200 м её воздействие оказалось переменным.

Переходя к анализу результатов моделирования в январе 2015 года, важно ещё раз отметить, что расчеты с городской параметризацией проводились только с 15 января. До этого момента данные анализа модели GFS (начальные условия у WRF-ARW) имели более низкое пространственное разрешение, что могло исказить эффект урбанизации. Поэтому весь последующий обзор результатов за 2015 год будет опираться на период с 16 по 31 января, что обеспечивает сопоставимость конфигураций и позволяет сделать выводы о влиянии схемы параметризации города.

На уровне ~84,6 м модель с урбанизацией дала более точный прогноз температуры в 13 из 16 дней ( $\approx 81\%$ ) и лишь в 3 случаях ( $\approx 19\%$ ) ухудшила результат. В слое до 200 м улучшения оказались еще более устойчивыми: в 14 днях ( $\approx 88\%$ ) ошибки меньше у модели с параметризацией города и только в 2 случаях больше ( $\approx 12\%$ ). В слое до 2 км в 12 случаях модель с урбанизацией уточнила прогноз ( $\approx 75\%$ ), в 2 случаях ухудшила ( $\approx 13\%$ ) и еще в 2 случаях получился спорный результат. Для всего модельного столба атмосферы (до 20 км) модель с урбанизацией оказалась лучше в 12 случаях ( $\approx 75\%$ ), хуже в 3 ( $\approx 19\%$ ) и 1 раз ( $\approx 6\%$ ) спорный результат.

Для ветра на уровне ~84,6 м схема города улучшила прогноз в 8 случаях из 16 ( $\approx 50\%$ ) и столько же раз ухудшила ( $\approx 50\%$ ). В слое до 200 м улучшение наблюдалось в 8 днях ( $\approx 50\%$ ), ухудшение – в 7 днях ( $\approx 44\%$ ) и 1 раз ( $\approx 6\%$ ) смешанные результаты. В слое до 2 км модель с урбанизацией улучшила прогноз для 10 дней ( $\approx 63\%$ ), ухудшила для 5 дней ( $\approx 31\%$ ) и для 1 случая ( $\approx 6\%$ ) получился спорный результат. До 20 км в пользу урбанизации 9 случаев ( $\approx 56\%$ ), против – 7 случаев ( $\approx 44\%$ ).

В январе 2015 года схема ВЕР для прогноза температуры улучшила прогноз по всем диапазонам высот, а для ветра наибольшее преимущество наблюдалось до 2 км.

В целом введение схемы параметризации города за исследуемые периоды не показала устойчивого преимущества. Из чего можно сделать вывод о том, что на качество прогноза существенное влияние оказывают конкретные погодные условия, которые будут рассмотрены в данной работе. Также важно сравнить результаты моделирования с другими измерениями.

Для оценки того, как городская параметризация влияет на воспроизведение осадков, данные метеорологических радаров за январь 2020 года были сопоставлены с модельными суточными суммами осадков в точке, соответствующей г. Санкт-Петербургу. В конфигурации без учёта урбанизации модель систематически недооценивала количество осадков: средняя ошибка составила -1,55 мм/сутки. После включения схемы

города знак смещения поменялся, а его абсолютная величина сократилась более чем в пять раз – до +0,29 мм/сутки; что соответствует снижению модуля средней ошибки примерно на 81 %.

Средняя абсолютная ошибка уменьшилась с 3,38 до 3,13 мм/сутки, то есть на 7 %. Ещё более показательна динамика среднеквадратического отклонения, которое чувствительно к большим промахам: значение опустилось с 5,70 до 4,16 мм/сутки, что соответствует улучшению порядка 27 %. То есть параметризация не только убрала систематическое смещение, но и существенно сократила амплитуду самых больших отклонений.

Полученный результат подтверждает, что более реалистичное описание тепло- и влагообмена над городом помогает модели лучше инициировать зимние фронтальные и конвективные процессы, а значит – точнее передавать распределение осадков, наблюдаемое МРЛ.

В таблице 3.2 приведено сравнение суточных сумм осадков, полученных с помощью локатора и прогнозов без и с учетом городской параметризации за январь 2020 года.

В дни с небольшим количеством осадков (<1 мм/сутки) обе конфигурации демонстрируют примерно одинаковое смещение около  $\pm 0,5$  мм/сутки, и урбанизация не дает заметного преимущества. Зато в периоды сильных осадков, например, 12 января (МРЛ = 25,12 мм/сутки) и 16 января (24,68 мм/сутки) – ошибка без урбанизации достигала -15...-20 мм/сутки, а при включенной схеме сокращалась до -4...-9 мм/сутки. В итоге при осреднении всего периода средняя ошибка у модели с урбанизацией уменьшилась примерно на 81%, средняя абсолютная ошибка на 7%, а СКО на 27% (таблица 3.2).

Таблица 3.2 - Сравнение качества прогноза количества осадков за  
январь 2020 года

День	МРЛ	Без урб	С урб	Ошибка без урб	Ошибка с урб
1	1,81	6,87	8,93	5,06	7,12
2	6,77	2,01	2,47	-4,76	-4,31
3	0	0,07	0,4	0,07	0,4
4	1,53	1,01	3,3	-0,52	1,76
5	0,08	0	0,12	-0,08	0,04
6	1,03	4,63	5,97	3,6	4,94
7	0,19	2,01	4,32	1,81	4,13
8	9,24	1,36	3,06	-7,88	-6,17
9	3,92	0	0,18	-3,92	-3,74
10	0	0,01	0	0,01	0
11	0,5	0	0	-0,5	-0,5
12	25,12	10,22	20,86	-14,9	-4,26
13	1,54	0,11	0,63	-1,43	-0,92
14	1,21	0,22	0,13	-0,99	-1,08
15	11,84	4,11	7,05	-7,73	-4,79
16	24,68	4,8	15,67	-19,88	-9,01
17	1,04	0,23	0,68	-0,81	-0,36
18	0,08	0,19	0,84	0,11	0,75
19	0,94	0,69	4,14	-0,25	3,2
20	3,68	3,52	13,01	-0,16	9,32
21	5,35	0,27	0,83	-5,08	-4,52
22	0,08	0	0,03	-0,08	-0,05
23	3,96	8,72	4,73	4,75	0,76
24	0,11	0,91	2,85	0,8	2,74
25	0,2	1,41	2,14	1,21	1,94
26	4,19	9,75	11,73	5,56	7,54
27	0,9	2,71	3,32	1,81	2,42
28	0	0,81	0,8	0,81	0,8

Можно сделать вывод о том, что введение параметризации урбанизации устраняет недооценку при выпадении сильных осадков, тогда как при

умеренных или слабых осадках ее эффект остается незначительным (таблица 3.2). Это может быть связано с тем, что в условиях сильных осадков (например, при прохождении фронтов или циклонов), дополнительный нагрев от городской инфраструктуры может значительно усилить вертикальные восходящие потоки, приводя к более интенсивному и реалистичному выпадению осадков в моделях с параметризацией урбанизации. А в условиях умеренных осадков атмосфера более устойчива, и нагрев от города не оказывает такого влияния.

Для иллюстрации незначительного эффекта от урбанизации выбран день с умеренными осадками – 02.01.2020 года (МРЛ = 6,77 мм/сутки для Санкт-Петербурга). На рисунке 3.36 представлены поля разницы осадков «МРЛ – WRF» а) без урбанизации, б) с учетом урбанизации за 00 часов.

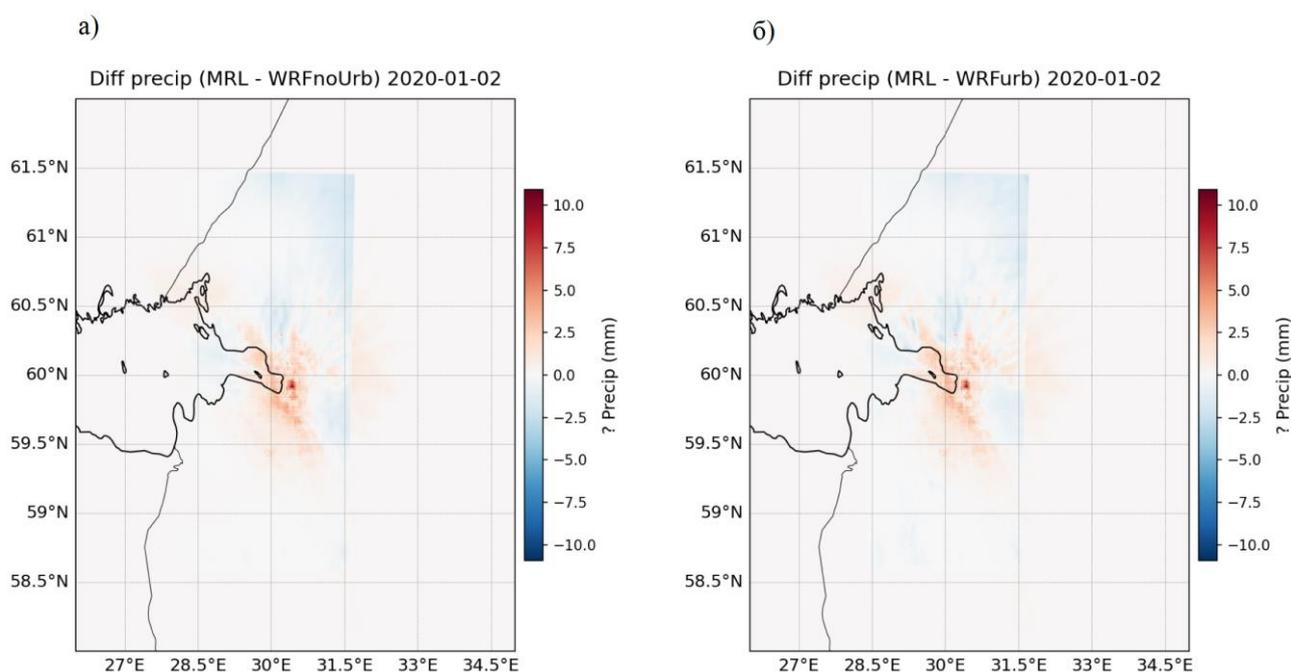


Рисунок 3.36 – Поля разницы сумм осадков за 02.01.2020 (00 ч) «МРЛ – WRF». а) без урбанизации, б) с учетом урбанизации

Распределение ошибки в обоих экспериментах практически совпадает: положительное смещение сосредоточено над центром Санкт-Петербурга и достигает 5-6 мм/сутки. Это согласуется с таблицей 3.2, где ошибка в точке за

этот день отличается всего на  $-0,45$  мм/сутки ( $-4,76$  против  $-4,31$  мм/сутки). Таким образом, при умеренных осадках влияние урбанизации незначительно по всей территории покрытия локатора (рисунок 3.36).

Следует отметить, что оба использованных набора наблюдений имеют собственные ограничения. Для радиозонда – это горизонтальный дрейф, приводящий к тому, что измерения на разных высотах относятся к разным модельным ячейкам. Для МРЛ – неоднозначность Z-R преобразования, определяющая погрешность количественной оценки осадков.

Чтобы исключить влияние этих факторов и получить проверку приземных метеовеличин, далее расчеты температуры воздуха на 2 метрах, направления и скорости ветра на 10 метрах были сопоставлены с данными метеостанции (59,9691 с.ш., 30,2839 в.д.).

В таблице 3.3 представлены температурные ошибки модели с урбанизацией и без за 28 дней января 2020 года для срока 00 часов (в точке, соответствующей метеостанции).

В 24 из 28 случаев ( $\approx 86$  %) модуль ошибки стал меньше при включении схемы города. Наибольшее улучшение наблюдалось 3 января (модуль ошибки снизился на  $2,8$  °C). Лишь в трех днях (9,11,12) урбанизация ухудшила прогноз. 12 января схема города увеличила ошибку на  $2,3$  °C (таблица 3.3). Также были рассчитаны ошибки, осредненные за весь период. После ввода городской схемы отрицательное смещение уменьшилось на  $\approx 57$  % (с  $-1,93$  до  $-0,83$  °C). СКО снизилось на  $\approx 26$  % (с  $2,4$  до  $1,8$  °C), а средняя абсолютная ошибка – на  $\approx 37$  % (с  $2,1$  до  $1,3$  °C). Уменьшение отрицательного смещения подтверждает, что учет тепловой емкости зданий и антропогенного теплового потока делает приземной слой в модели «теплее» и тем самым ближе к наблюдениям.

Таблица 3.3 – Ежедневные ошибки T2 (00 ч) за январь 2020 года

День	Ошибка без урб	Ошибка с урб
2	-2,2238	-0,3646
3	-3,5687	-0,8084
4	-1,5635	-0,616
5	-2,8618	-1,9893
6	-2,6143	-2,0397
7	-5,0146	-3,8634
8	-2,1135	-1,7413
9	-0,6215	1,4808
10	-2,0855	-0,6576
11	-0,3796	-0,6913
12	1,7427	4,021
13	-0,2488	-0,1356
14	-3,153	-2,2532
15	-0,7875	0,4965
16	-1,0935	-0,0641
17	-0,8994	-0,1145
18	-3,3744	-2,619
19	-1,9503	-0,6655
20	-2,1697	-0,8547
21	-0,8044	0,5766
22	-1,3388	-0,175
23	-1,5979	-0,3349
24	-1,1181	-1,1171
25	-1,5571	-0,0365
26	-1,6657	-1,0156
27	-3,0682	-1,8756
28	-1,8129	-1,1387
29	-6,0371	-4,737

После включения схемы параметризации города модель стала сильнее переоценивать приземную скорость ветра: средняя ошибка выросла на  $\approx 42\%$  (с 1,6 до 2,3 м/с). Ошибка уменьшилась лишь в 4 из 28 случаев (14%). СКО

выросло на  $\sim 0,7$  м/с ( $\approx 34\%$ ), средняя абсолютная ошибка – на  $\sim 0,6$  м/с ( $\approx 38\%$ ). Для направления ветра урбанизация улучшила прогноз лишь в 9 из 28 случаев (32%). Итого параметризация в январе 2020 года увеличила все метрики для характеристик ветра, в отличие от температуры и осадков, где наблюдалось улучшение прогнозов.

Для января 2021 года урбанизация улучшила прогноз температуры в 24 из 28 случаев (86%). Наибольшее улучшение наблюдалось 31 января (уменьшение ошибки на  $3,5$  °С). Средняя ошибка сократилась примерно на  $1,3$  °С ( $\approx 21\%$ ), СКО и средняя абсолютная ошибка снизились на  $\approx 1,3$  °С ( $\approx 19-20\%$ ). Учет урбанизации стабильно уменьшал отрицательное смещение и разброс ошибок. Но по сравнению с 2020 годом ошибки у двух моделей больше.

С учетом урбанизации систематическое завышение скорости ветра уменьшилось на  $0,53$  м/с ( $\approx 41\%$ ), СКО – на  $0,56$  м/с ( $\approx 34\%$ ), средняя абсолютная ошибка – на  $0,48$  м/с ( $\approx 34\%$ ). В 20 из 28 случаев урбанизация улучшила прогноз. Максимальное улучшение – 13 января: ошибка снизилась с  $4,21$  до  $2,47$  м/с ( $1,74$  м/с). Ухудшение – 16 января: ошибка выросла с  $0,46$  до  $1,19$  м/с ( $0,73$  м/с). Однако для направления ветра ошибки у модели с урбанизацией стали больше. Средняя ошибка выросла на  $7,6$  ° ( $\approx 49\%$ ), СКО и средняя абсолютная ошибка увеличились на  $2$  ° ( $\approx 5-6\%$ ). Улучшение прогноза отмечено лишь в 9 из 28 случаев. Городская схема для января 2021 года улучшила прогноз скорости ветра, но ухудшила прогноз направления ветра.

Для 16 дней января 2015 года включение урбанизации уменьшила ошибки в 100 % случаев. Максимальное улучшение – 27 января: ошибка сократилась с  $11,15$  до  $6,74$  °С (на  $4,41$  °С). Минимальное улучшение – 20 января: с  $2,62$  до  $1,65$  °С (на  $0,97$  °С). Городская параметризация снизила систематическое отрицательное смещение на  $\approx 46\%$ , СКО на  $\approx 41\%$  и среднюю абсолютную ошибку на  $\approx 46\%$  по сравнению с конфигурацией без учета урбанизации.

Прогноз скорости ветра урбанизация улучшила в 10 из 16 случаев ( $\approx 63\%$ ). Средняя ошибка увеличилась на 0,07 м/с, то есть на 6,7 %. СКО и средняя абсолютная ошибка практически не изменились (увеличение на 1,7 % и 3,9 %, соответственно). Для направления ветра городская схема практически устранила систематическое смещение с 20 до 0,4 ° ( $\approx 98\%$ ). СКО и средняя абсолютная ошибка изменились разнонаправленно. СКО выросло на 1,8 ° ( $\approx 3\%$ ), средняя абсолютная ошибка снизилась на 2,1 ° ( $\approx 5,4\%$ ). Таким образом, для января 2015 года параметризация города улучшила прогноз направления ветра, но дала незначительное ухудшение для скорости ветра.

В итоге учет урбанизации улучшил прогноз температуры; наибольший эффект в январе 2015 года, устойчивый положительный в 2020 и 2021 гг.

Для скорости ветра эффект неоднороден: сильное ухудшение в 2020 г., заметное улучшение в 2021 году, почти нейтральное влияние в 2015 году.

Направление ветра хорошо корректируется только в 2015 году, в другие годы урбанизация ухудшает прогноз.

Таким образом, параметризация урбанизации надежно исправляет отрицательное смещение температуры, но ее воздействие на ветер зависит от года и, вероятно, от конкретной синоптической ситуации.

### 3.4 Анализ причин ухудшения прогноза температуры в отдельные дни

При анализе ошибок были выделены дни, когда модель с урбанизацией ухудшила прогноз температуры на 2 метрах (9, 11, 12 января 2020 года и 20, 22, 25, 30 января 2021 года). Чтобы понять, какой именно физический процесс привел к увеличению ошибки, были рассчитаны разности ключевых потоков энергетического баланса поверхности в момент, когда сравнивались модели и наблюдения (в 00 ч). Дальнейший разбор графиков ( $\Delta HFX$ ,  $\Delta GRDFLX$ ,  $\Delta LH$ ) позволит связать каждое ухудшение температуры с конкретным сочетанием потоков.

На рисунке 3.37 показана разность (между результатами модели с учетом ВЕР и без учета урбанизации) поверхностного потока GRDFLX (Ground/Storage Heat Flux) в 00 часов каждого дня 2020 года в точке, соответствующей метеостанции.

Положительный знак потока означает, что тепло уходит вниз (аккумулируется в почве или строительных материалах). Отрицательный знак – что тепло уходит вверх, подогревая приземный слой.

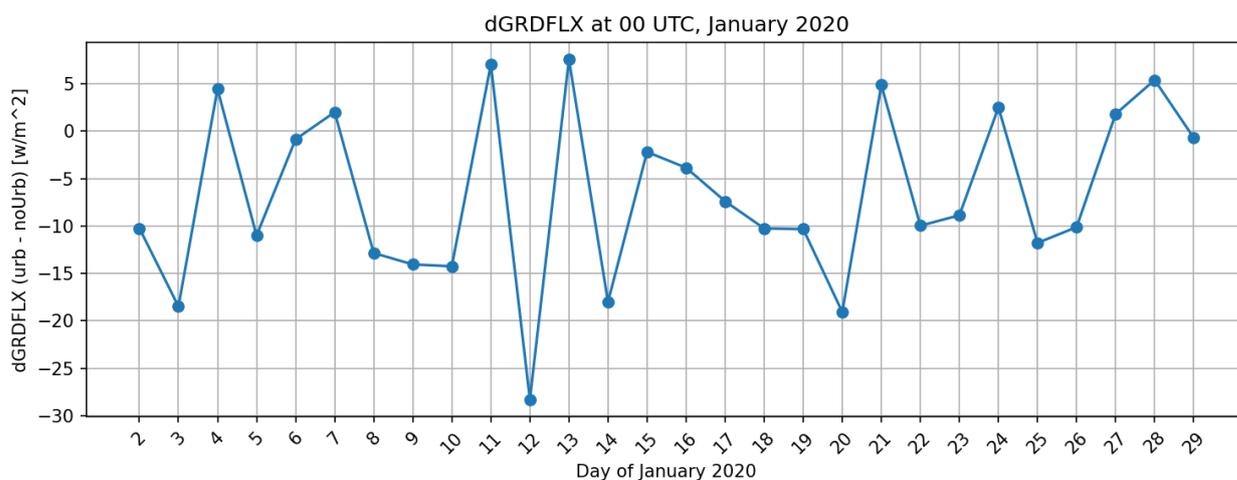


Рисунок 3.37 – Разность (урб – без урб) поверхностного потока GRDFLX за январь 2020 года

Диапазон колебаний составляет от -28,30 до 7,56 Вт/м<sup>2</sup>. Большую часть периода модель атмосферы с урбанизацией «отдавала» в атмосферу больше тепла, чем модель без учета города. Однако 4, 7, 11, 13, 21, 24, 27 и 28 января модель с городом способствовала дополнительному нагреву поверхности (рисунок 3.37).

9 января разность достигает -15 Вт/м<sup>2</sup>. Данный поток стал одним из факторов завышения температуры модели с урбанизацией на  $\approx 2$  °C по сравнению с моделью без урбанизации.

12 января – абсолютный минимум -29 Вт/м<sup>2</sup>, что совпадает с наибольшим перегревом модели (2,3 °C): строительные материалы города вернули атмосфере рекордную сумму накопленного днем тепла.

11 января, напротив, разница потоков имеет положительный знак (7 Вт/м<sup>2</sup>) – схема города забрала часть энергии в здания. В этот день модель занижала температуру на 0,3117 °С.

Чем больше отрицательный поток в безветренную облачную ночь, тем выше риск того, что модель зависит температуру воздуха. При умеренных отрицательных значениях (-5...-20 Вт/м<sup>2</sup>) поток компенсирует радиационное охлаждение и, напротив, может снижать отрицательное смещение температуры.

На рисунке 3.38 показана разность явного потока HFX (Surface Sensible Heat Flux).

Положительный знак потока означает, что схема параметризации города показывает большую отдачу тепла в атмосферу. Отрицательный знак – меньше тепла, либо же отдает больше тепла в здания.

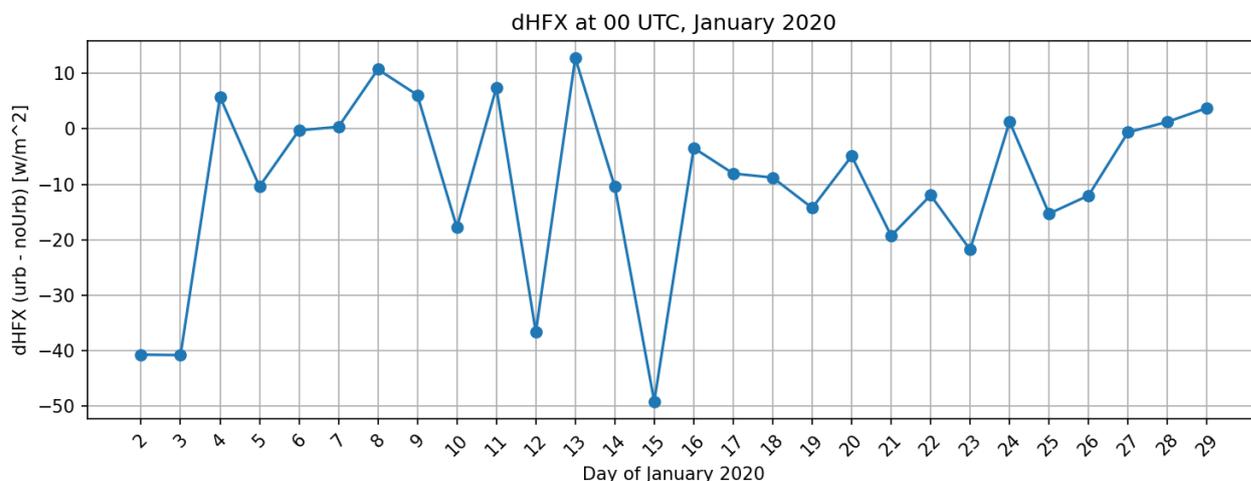


Рисунок 3.38 – Разность (урб – без урб) явного потока HFX за январь 2020 года

За весь период ΔHFX колеблется от -49,18 Вт/м<sup>2</sup> до 12,78 Вт/м<sup>2</sup>. Первая декада характеризуется резкими скачками знака: после двух больших отрицательных значений (2 и 3 января) разность потоков становится положительной (4 января). Во второй декаде снова появляются отрицательные

экстремумы (12 и 15 января). Затем разность потоков стабилизируется (рисунок 3.38).

9 января  $\Delta\text{HFH} = 6,11 \text{ Вт/м}^2$ . В этот день у модели с урбанизацией меньше тепла ушло в здания. При этом  $\Delta\text{GRDFLX} = -15 \text{ Вт/м}^2$ , что привело к дополнительному нагреву атмосферы и, как следствие, к завышению температуры.

11 января  $\Delta\text{HFH} = 7,42 \text{ Вт/м}^2$ , но  $\Delta\text{GRDFLX}$  оказалась положительной. Поэтому явный поток лишь частично компенсировал накопление тепла зданиями. Результатом стало отрицательное смещение температуры.

12 января  $\Delta\text{HFH}$  отрицательна ( $-36,66 \text{ Вт/м}^2$ ), то есть большее количество тепла уходит в здания. Но в этот день наблюдалась рекордная отрицательная разность  $\text{GRDFLX}$ , что обеспечило значительный приток тепла в атмосферу. Таким образом, итог определило соотношение всех потоков, а не только  $\Delta\text{HFH}$ .

На рисунке 3.39 представлена разность скрытого потока тепла LH (Latent Heat Flux).

Положительный знак – поток направлен вверх (от поверхности), это соответствует испарению или сублимации. Отрицательный знак – поток вниз (к поверхности).

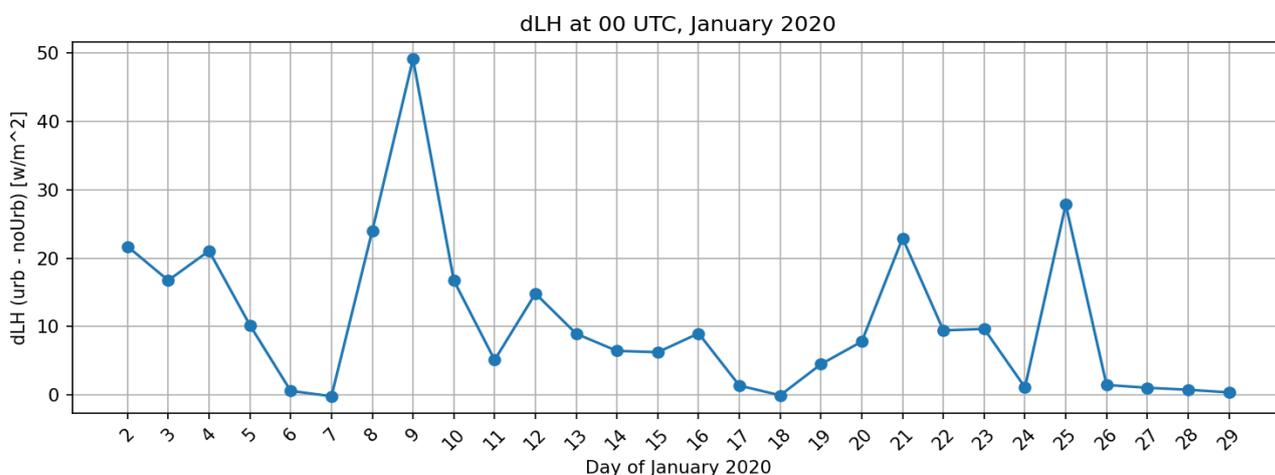


Рисунок 3.39 – Разность (урб – без урб) скрытого потока LH за январь 2020 года

Значения разницы весь январь положительны, значит модель с урбанизацией описывала больший обмен теплом между атмосферой и поверхностью. Это характерно для зимы, так как в условиях города есть дополнительная влага от реагентов, талого снега и коммуникаций. Но скрытый поток тепла зимой играет вспомогательную роль. Исключением стала ночь 9 января: рекордная  $\Delta LH = 49,14 \text{ Вт/м}^2$  дополнила положительную  $\Delta HFX$  и отрицательную  $\Delta GRDFLX$ , что и привело к переоценке температуры примерно на  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ . В остальные даты скачки  $\Delta LH$  либо совпали с отрицательной  $\Delta HFX$  (21 и 25 января) и частично ее компенсировали, либо были слишком малы, чтоб существенно изменить тепловой баланс (рисунок 3.39).

Таким образом, взаимодействие  $\Delta GRDFLX$  и  $\Delta HFX$ , а также  $\Delta LH$  определяет, улучшит или ухудшит урбанизация прогноз приземной температуры.

Рисунок 3.40 отражает, насколько схема урбанизации изменила ночной поток тепла по сравнению с базовой конфигурацией за январь 2021 года.

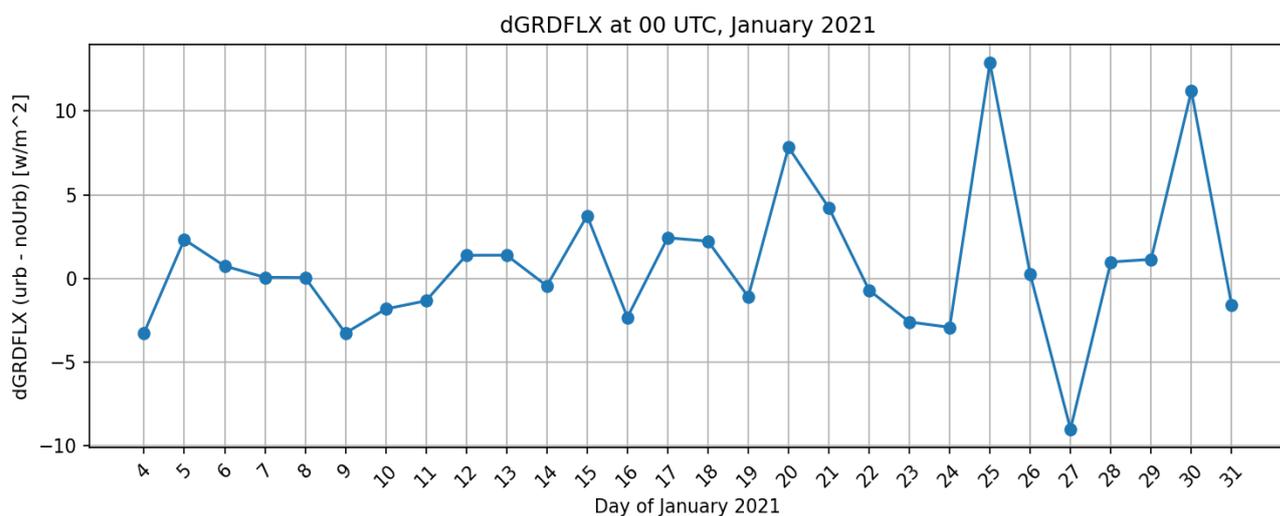


Рисунок 3.40 – Разность (урб – без урб) поверхностного потока GRDFLX за январь 2021 года

Диапазон колебаний от  $-8,98$  (27 января) до  $12,88$  Вт/м<sup>2</sup> (25 января). Значит, ни одной экстремальной разницы, подобной 12 января 2020 года, в этом году не наблюдалось. Урбанизация увеличивала поток то в атмосферу, то в здания. Но существенного влияния на прогноз температуры поток не оказывал (рисунок 3.40).

20 января наблюдался первый максимум ( $7,83$  Вт/м<sup>2</sup>). В этот день модель с урбанизацией увеличила поток в здания. Что повлекло за собой уменьшение температуры на  $0,0452$  °С.

22 января разница стала отрицательной ( $-0,70$  Вт/м<sup>2</sup>), при этом температура повысилась на  $0,5282$  °С.

Наибольшая разница наблюдалась 25 января ( $12,88$  Вт/м<sup>2</sup>). Температура уменьшилась уже на  $1,7746$  °С.

30 января  $\Delta\text{GRDFLX} = 11,19$  Вт/м<sup>2</sup>, температура была меньше на  $1,2$  °С.

В 2021 году  $\Delta\text{GRDFLX}$  не демонстрирует больших отрицательных значений – город почти не «подогревал» воздух. Напротив, именно положительные колебания, характерные для условий фронтов, как 20, 25 и 30 января, оказались связаны с ухудшением прогноза температуры: энергия уходила в здания, а приземный слой оставался холоднее.

Рассмотрим разность явного потока HFX (Surface Sensible Heat Flux) на рисунке 3.41.

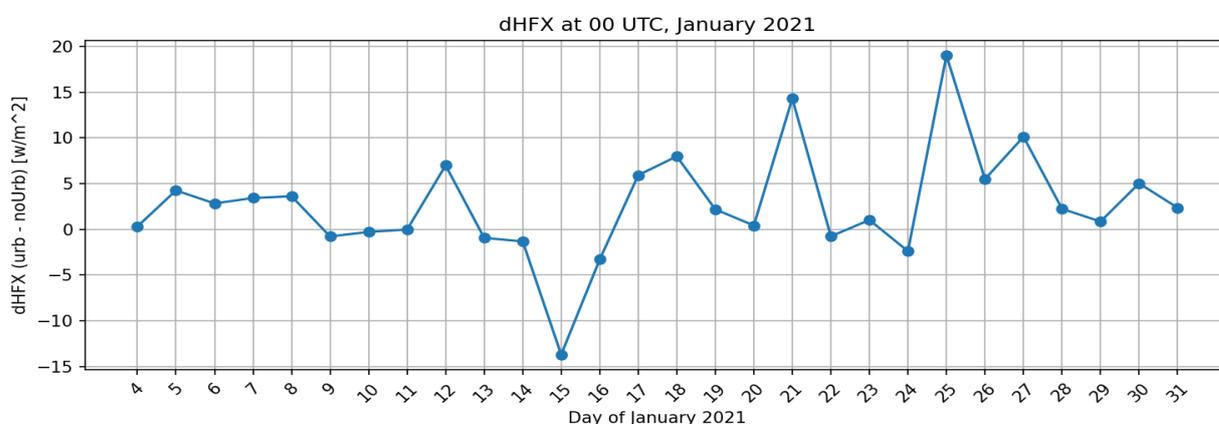


Рисунок 3.41 – Разность (урб – без урб) явного потока HFX за январь 2021 года

Диапазон значений от  $-13,70 \text{ Вт/м}^2$  (15 января) до  $19,02 \text{ Вт/м}^2$  (25 января). Диапазон меньше, чем в 2020 году (рисунок 3.41).

20 января  $\Delta\text{HFХ} = 0,43 \text{ Вт/м}^2$ , то есть явный поток лишь немного компенсировал  $\text{GRDFLХ}$  и модель немного уменьшила температуру. Большой вклад внесла  $\Delta\text{GRDFLХ}$ .

22 января  $\Delta\text{HFХ}$  составила  $-0,76 \text{ Вт/м}^2$ . Температура в этот день стала выше, значит больший вклад внесла разница  $\text{GRDFLХ}$  (отрицательное значение).

25 января наблюдался максимум  $\Delta\text{HFХ}$  ( $19,02 \text{ Вт/м}^2$ ). При этом  $\Delta\text{GRDFLХ}$  также имела положительный знак и внесла больший вклад в прогноз температуры.

30 января  $\Delta\text{HFХ} = 5,04 \text{ Вт/м}^2$ , при этом  $\Delta\text{GRDFLХ} = 11,19 \text{ Вт/м}^2$ . Снова грунтовые потоки внесли больший вклад, и температура понизилась на  $1,187^\circ\text{C}$ .

Получается, что в четырех случаях разницы потоков имели одинаковый знак, но влияние на прогноз температуры больше оказали грунтовые потоки тепла ( $\text{GRDFLХ}$ ).

На рисунке 3.42 представлена разность скрытого потока тепла  $\text{LH}$  (Latent Heat Flux).

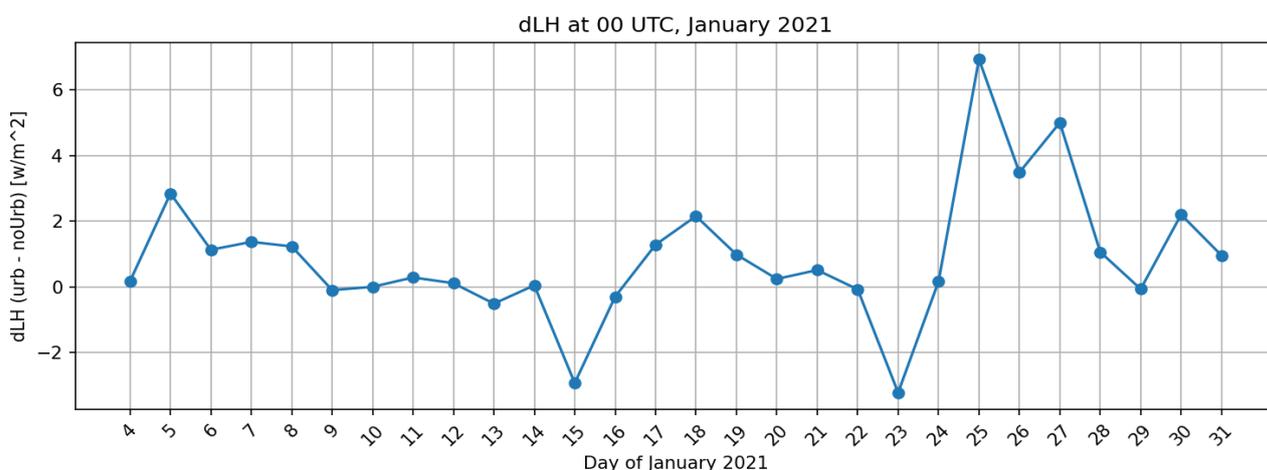


Рисунок 3.42 – Разность (урб – без урб) скрытого потока  $\text{LH}$  за январь 2021 года

Значения разницы мало колеблются – от -3,22 до 6,94 Вт/м<sup>2</sup>. Зимой скрытый поток тепла играет второстепенную роль в энергетическом балансе поверхности и только в редких случаях можно заметить его влияние (9 января 2020 года). В этом году не было скачков разницы, и конечный знак и величину смещения температуры определила  $\Delta\text{GRDFLX}$  (рисунок 3.42).

Таким образом, успешность прогноза модели с городской параметризацией зависит не от одного потока, а от баланса между хранимым теплом зданий, турбулентным обменом, антропогенным источником тепла. Четкое понимание этого механизма позволяет целенаправленно корректировать модель.

После анализа разниц энергетических потоков ( $\Delta\text{HFEX}$ ,  $\Delta\text{GRDFLX}$ ,  $\Delta\text{LH}$ ) и выявления случаев ухудшения прогноза температуры и скорости ветра при использовании модели с параметризацией ВЕР, было решено провести численный эксперимент для 20 января 2021 года с использованием альтернативного набора физических параметризаций, известных как CONUS.

При этом структура поверхности, включая использование городской параметризации ВЕР (`sf_urban_physics = 2`), была сохранена, а изменения коснулись следующих физических схем:

- схемы радиации (RRTMG Shortwave and Longwave Schemes),
- схемы пограничного слоя (Mellor–Yamada–Janjic Scheme (MYJ)),
- схемы параметризации конвекции (Tiedtke Scheme),
- схемы параметризации приземного подслоя (Eta Similarity Scheme),
- схемы параметризации суши (Unified Noah Land Surface Model),
- схемы параметризации микрофизики (Thompson Scheme).

Такая конфигурация, обозначаемая как «CONUS» в документации WRF, представляет собой типичный набор схем для оперативного моделирования погоды над континентальной частью США.

Цель эксперимента заключалась в том, чтобы выяснить, могут ли изменения атмосферных параметризаций, при сохранении структуры поверхности и городской схемы ВЕР, улучшить точность прогноза

температуры и ветра в проблемные дни. Далее приведено сравнение результатов моделирования с исходной конфигурацией и с CONUS-набором параметризаций за 20 января 2021 года. Ошибки представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Ошибки прогноза при разных конфигурациях модели

Модель	Ошибка T2 (°C)	Ошибка V10 (м/с)	Ошибка d10 (°)
Без урбанизации	-7,31	1,69	34,9
С урбанизацией (ВЕР)	-7,35	1,71	34,7
ВЕР + CONUS	-3,71	0,93	10,2

Моделирование без учета урбанизации показало существенную отрицательную ошибку по температуре (-7,31 °C). Включение схемы ВЕР не привело к улучшению – ошибка возросла до -7,35 °C. Однако при использовании ВЕР совместно с физическими схемами CONUS ошибка снизилась почти вдвое – до -3,71 °C. Это позволяет предположить, что особенности перераспределения потоков в CONUS обеспечили более точное воспроизведение температуры в условиях урбанизированной среды.

Аналогичная картина наблюдается и для скорости ветра: без урбанизации ошибка составила 1,69 м/с, при добавлении урбанизации 1,71 м/с, что также говорит об отсутствии положительного эффекта. Только при использовании CONUS-набора параметризаций ошибка уменьшилась до 0,93 м/с. Это может быть связано с более точной моделью турбулентного переноса и другим описанием пограничного слоя атмосферы.

Наиболее выраженное улучшение наблюдается при прогнозе направления ветра. Ошибка в моделях без урбанизации и с ВЕР превышала 34°, тогда как при использовании ВЕР+CONUS она составила лишь 10,2°, что указывает на значительно более точное воспроизведение циркуляции в приземном слое.

Комбинация ВЕР с набором физических схем (CONUS) позволило достичь снижения ошибок по всем рассматриваемым метеорологическим величинам. Это подчеркивает важность комплексного подхода к настройке

модели, при котором учитываются не только процессы в городской среде, но и выбор соответствующих схем атмосферной физики.

### 3.5 Сравнение результатов ВЕР и ВЕР-ВЕМ

После верификации результатов моделирования с наземными наблюдениями на метеостанциях выяснилось, что схема ВЕР ухудшает точность прогноза ветра на 10 метрах. Чтобы попробовать повысить точность, была проведена ещё одна серия запусков с параметризацией ВЕР-ВЕМ за январь 2015 года.

Рассмотрим на рисунке 3.43 как поменялось пространственное распределение метеовеличин, сравнив поля средней разности (ВЕР – CTRL) и поля средней разности (ВЕР-ВЕМ – CTRL).

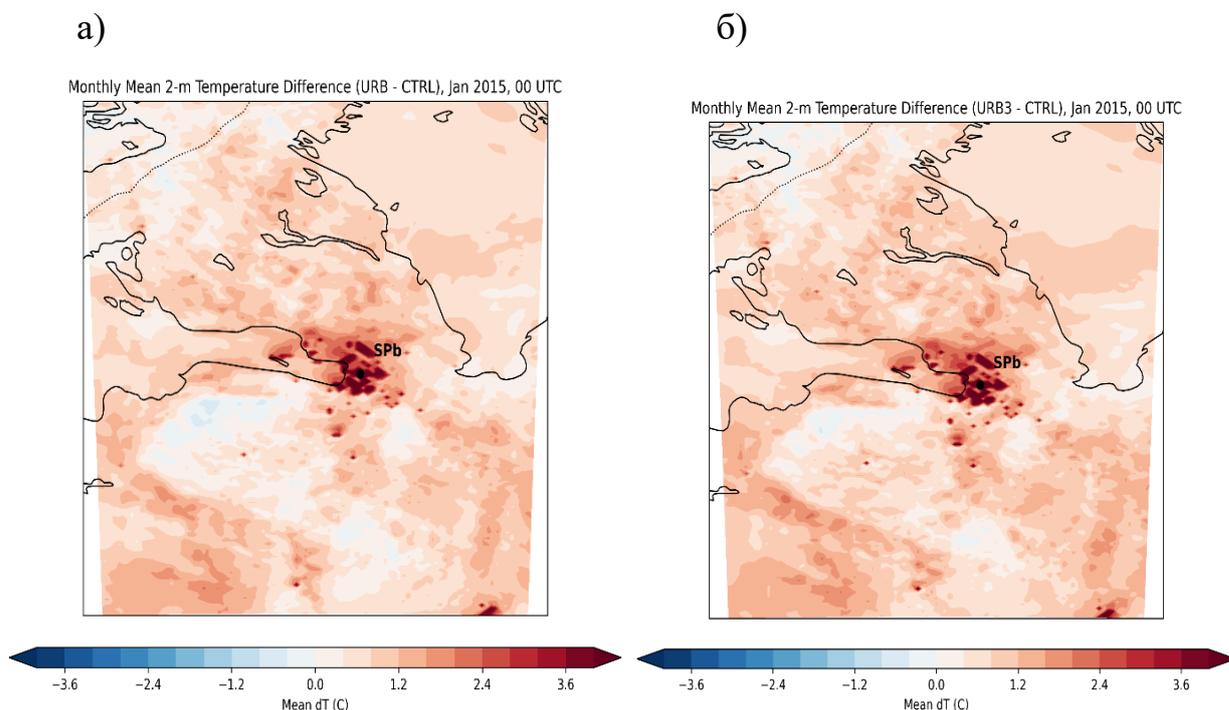


Рисунок 3.43 – Поля средней разности Т за январь 2015 года.

а) ВЕР – CTRL, б) ВЕР-ВЕМ – CTRL

Пространственное распределение разниц температуры очень похоже, но модель с ВЕР-ВЕМ не дает понижение температуры на юге от Финского залива, над Ладожским озером участки с повышением больше. В двух случаях остров тепла имеет практически идентичное распределение (рисунок 3.43).

На рисунке 3.44 представлено стандартное отклонение средней разности температуры

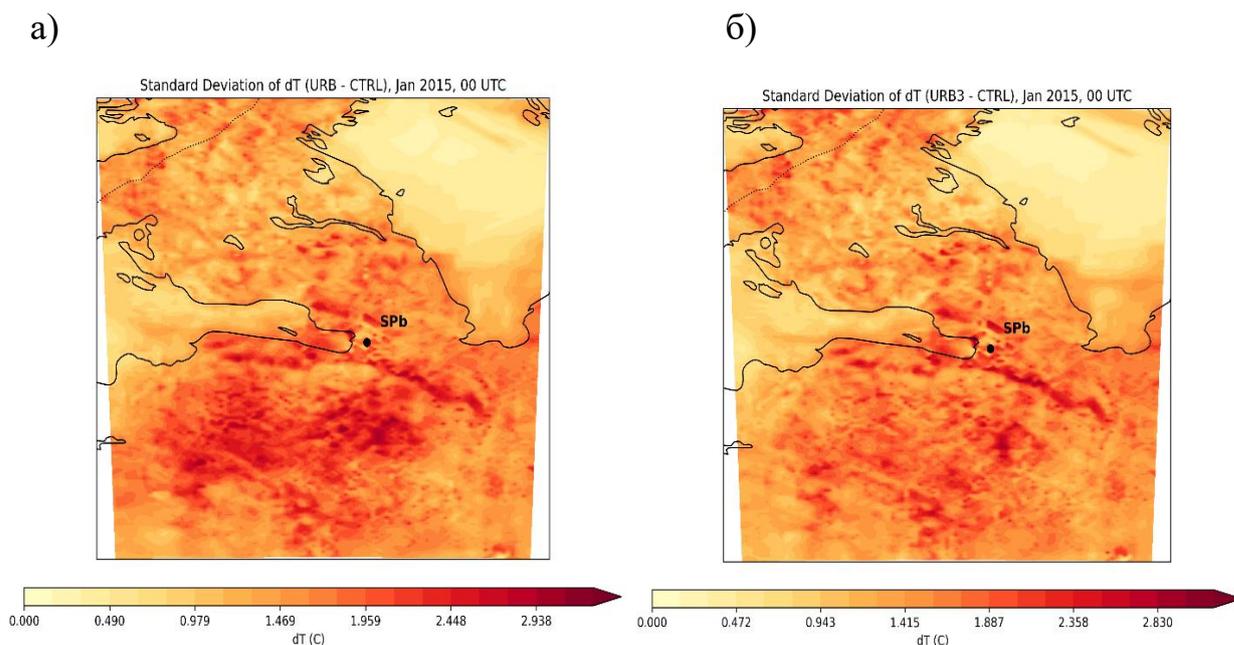


Рисунок 3.44 – Поля стандартного отклонения  $\Delta T$  за январь 2015 года.

а) ВЕР – CTRL, б) ВЕР-ВЕМ – CTRL

В схеме ВЕР значения стандартного отклонения разности температуры выше на юге от Санкт-Петербурга. Это означает, что эффект от городской застройки при ВЕР более нестационарен и сильнее зависит от синоптических условий.

В качестве следующего шага мы сравнили температуру на 2 м с реальными наблюдениями метеостанции ( $59,9691^\circ$  с. ш.,  $30,2839^\circ$  в. д.) и рассчитали метрики, чтобы определить, какая из схем урбанизации (ВЕР или ВЕР-ВЕМ) обеспечила лучшее соответствие фактическим данным. В таблице 3.5 представлены ошибки температуры осредненные за 16 дней (00 ч).

Таблица 3.5 – Статистики ошибок Т моделей за январь 2015 г

Модель	Ср. ошибка (°C)	СКО (°C)	Ср. абс. ошибка (°C)
Без урб	-5,5103	6,056	5,5103
ВЕР	-2,9668	3,594	2,9668
ВЕР-ВЕМ	-3,1915	3,925	3,2171

Обе схемы улучшают качество прогноза, существенно уменьшая как систематическую недооценку, так и разброс ошибок. При этом схема ВЕР оказывается чуть более эффективной в данной точке, чем ВЕР-ВЕМ (таблица 3.5). Также при рассмотрении ошибок для каждого дня (в срок 00ч) было выявлено, что обе схемы улучшили прогноз в 100% случаях.

На рисунке 3.45 показано различие скорости ветра на 10 метрах  $\Delta|V_{10}| = |V_{10}|(URB) - |V_{10}|(CTRL)$  за 15–31 января 2015 г. (00 UTC).

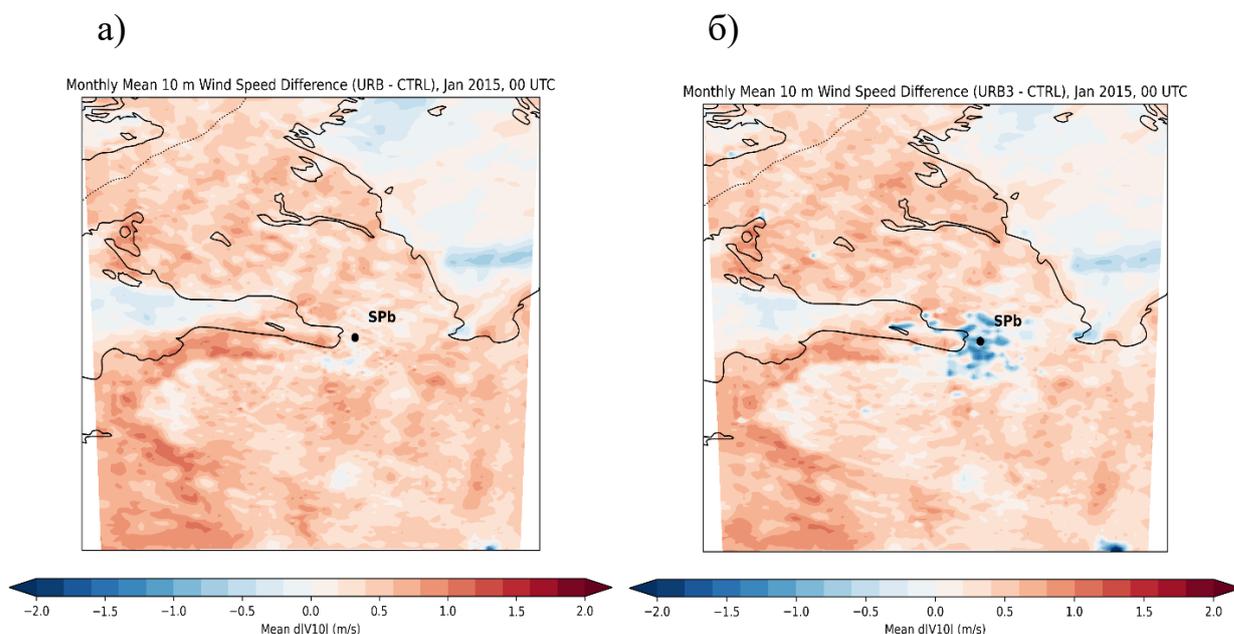


Рисунок 3.45 – Поля средней разности  $|V|$  за январь 2015 года.

а) ВЕР – CTRL, б) ВЕР-ВЕМ – CTRL.

Включение параметризации ВЕР усиливает скорость ветра практически по всей территории за счёт изменения турбулентного обмена и канального эффекта (рисунок 3.45).

Включение параметризации ВЕР-ВЕМ демонстрирует обратный результат в центральной части: ветровое поле притормаживается зданиями, а усиление ветра остаётся лишь на окраинах и над прибрежными районами (рисунок 3.45).

На рисунке 3.46 показаны поля стандартного отклонения разности скорости ветра  $\sigma(\Delta|V_{10}|)$  за 15–31 января 2015 г. (00 UTC).

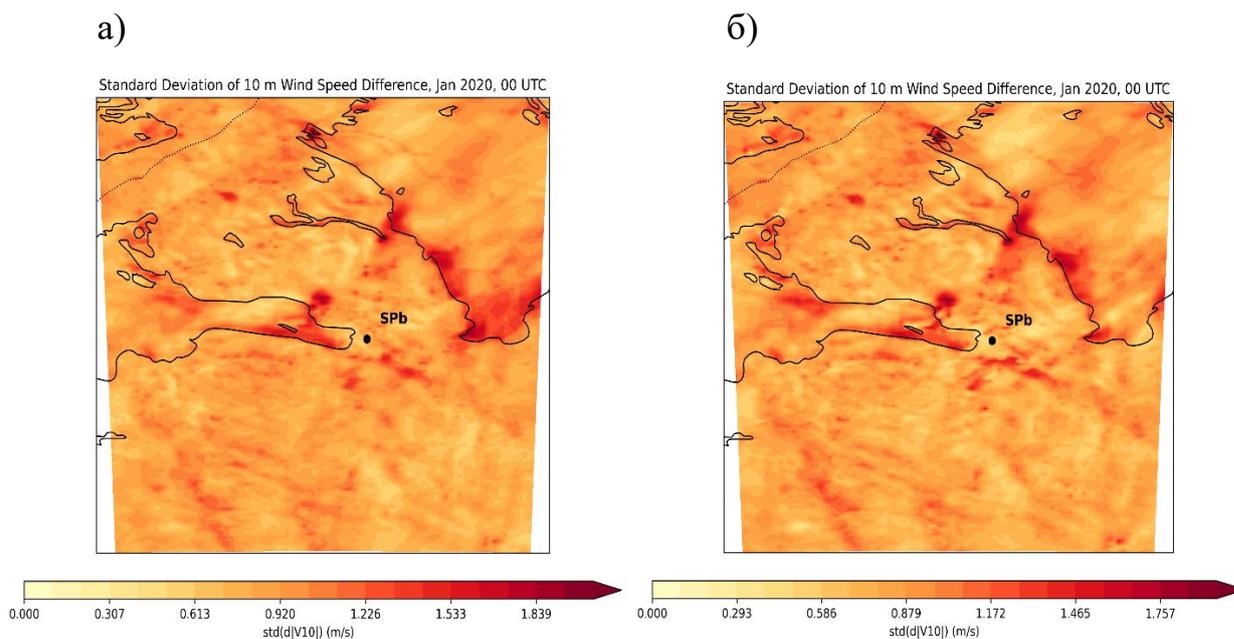


Рисунок 3.46 – Поля стандартного отклонения  $\Delta|V|$  за январь 2015 года.

а) ВЕР – CTRL, б) ВЕР-ВЕМ – CTRL

Пространственное распределение отклонения почти одинаково. Однако диапазон значений  $\sigma$  разности скорости ветра у модели с ВЕР больше, чем у модели с ВЕР-ВЕМ, значит в данном случае ВЕР имеет большую изменчивость (влияние синоптики больше).

Для оценки качества воспроизведения ветрового режима в модели WRF были проанализированы средние ошибки прогноза скорости ветра на высоте 10 метров ( $V_{10}$ ) и направления ветра ( $d_{10}$ ) при трёх конфигурациях: без учёта урбанизации, с параметризацией ВЕР и с параметризацией ВЕР-ВЕМ. Сравнение проводилось по следующим метрикам: средняя ошибка,

среднеквадратическое отклонение и средняя абсолютная ошибка (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Статистики ошибок V моделей за январь 2015 г

Модель	Ср.ошибка V10 (м/с)	СКО V10 (м/с)	Ср. абс. ошибка V10 (м/с)	Ср.ошибка d10 (°)	СКО d10 (°)	Ср. абс. ошибка d10 (°)
Без урб	0,994	1,568	1,342	20	59,4	39
ВЕР	1,061	1,594	1,395	-0,4	61,2	36,9
ВЕР-ВЕМ	0,471	1,284	0,919	5,7	53	33,5

Наилучшие результаты были получены при использовании схемы ВЕР-ВЕМ, в которой дополнительно моделируется теплообмен зданий с атмосферой через блок энергетического баланса. Эта схема позволила повысить точность прогноза скорости ветра: средняя ошибка снизилась до 0,471 м/с, СКО – до 1,284 м/с, а средняя абсолютная ошибка – до 0,919 м/с, что является минимальными значениями среди всех трёх вариантов. Также наблюдается улучшение в прогнозе направления ветра: средняя ошибка составила 5,7°, а средняя абсолютная ошибка – 33,5°, при наименьшем разбросе (СКО = 53,0°).

Сравнение с наблюдениями на метеостанциях продемонстрировало, что обе схемы урбанизации уменьшают систематическую ошибку температуры. При этом в точке наблюдений ВЕР обеспечила более точный прогноз.

Особенно заметные различия между схемами проявились в поле скорости ветра. Параметризация ВЕР вела к повсеместному усилению ветра, тогда как ВЕР-ВЕМ – к ослаблению ветра в центре города и сохранению усиления лишь на окраинах, что соответствует ожидаемому эффекту от зданий. Кроме того, метрики ошибок показали, что ВЕР-ВЕМ обеспечивает наименьшие значения как по скорости, так и по направлению ветра.

Чтобы понять, какие физические механизмы лежат в основе этих разнонаправленных эффектов, были проанализированы:

Энергетический баланс поверхности

- явный поток тепла (HFX),
- скрытый поток тепла (LH),
- поверхностный поток тепла (GRDFLX);

Параметры турбулентного переноса

- скорость трения  $U^*$
- высота планетарного граничного слоя (PBLH).

Были построены временные ряды этих величин и ошибки прогнозов для модели (без урбанизации, с ВЕР, с ВЕР-ВЕМ). Для того чтобы выяснить, почему оптимальный вариант для прогноза температуры – ВЕР, а для ветра – ВЕР-ВЕМ (рисунок 3.47 и 3.48)

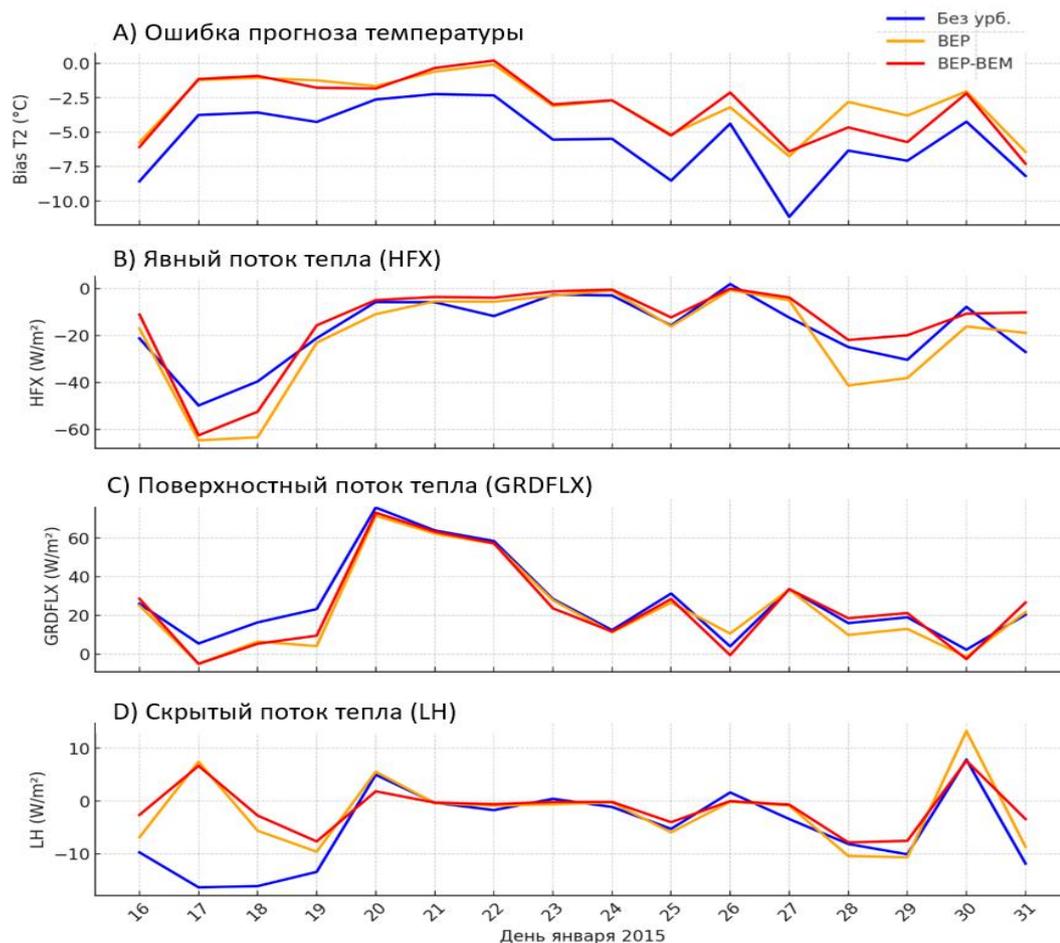


Рисунок 3.47 – Сравнение конфигураций (CTRL, ВЕР, ВЕР-ВЕМ).

- а) Ошибка прогноза Т, б) Явный поток тепла, с) Поверхностный поток тепла,  
д) Скрытый поток тепла

В среднем модель с параметризацией ВЕР демонстрирует наименьшую систематическую ошибку прогноза температуры. Однако при разборе по суткам оказывается, что ВЕР не обладает устойчивым преимуществом над ВЕР-ВЕМ. Наибольшие улучшения ВЕР демонстрировала 28 и 29 января, снизив ошибку на 1,9 °С (рисунок 3.47).

В сумме в эти дни ВЕР даёт лучший баланс потоков: она уменьшила явный поток тепла и поток тепла к поверхности (GRDFLX) и увеличила скрытый поток тепла (LH).

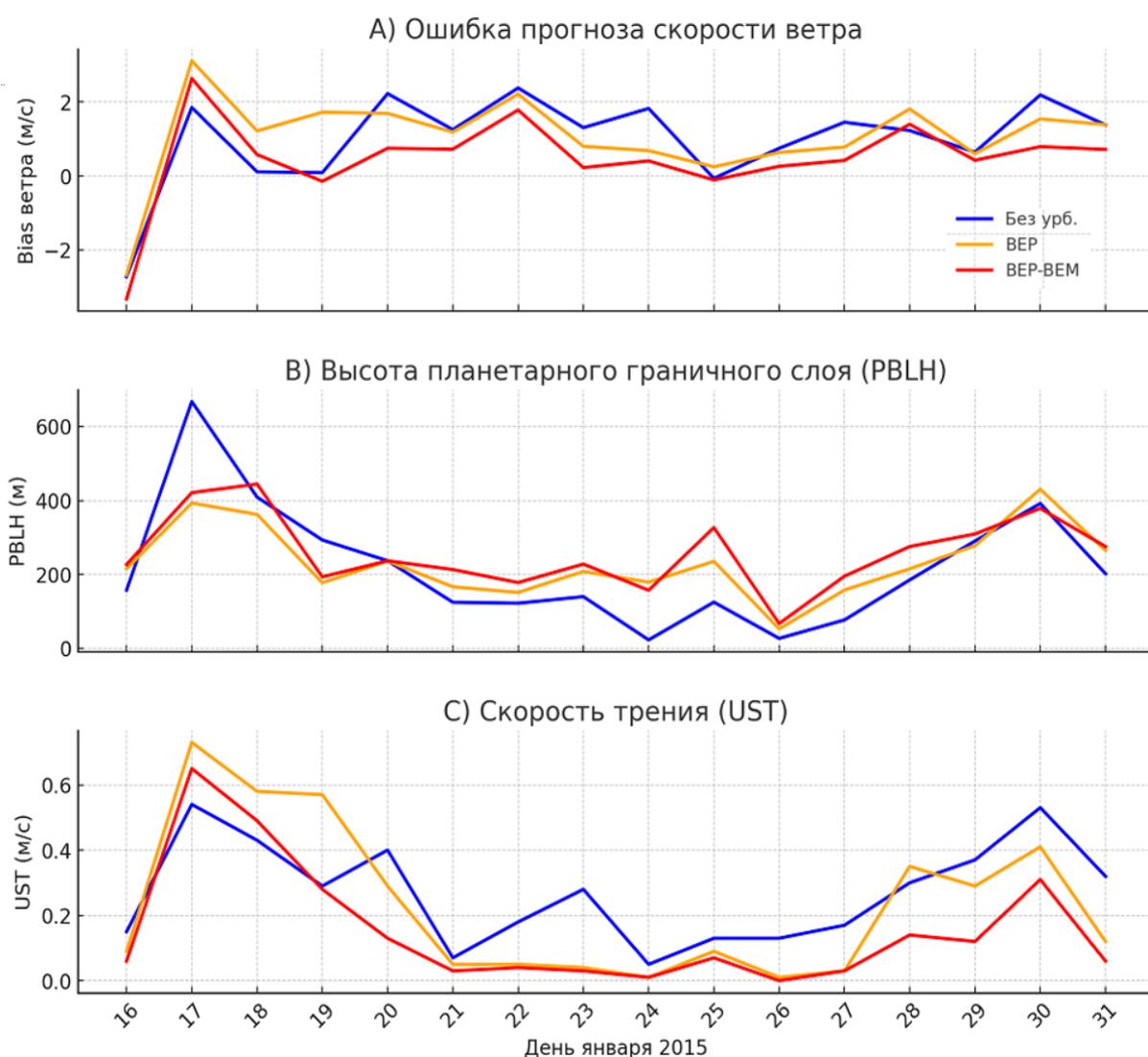


Рисунок 3.48 – Сравнение конфигураций (CTRL, ВЕР, ВЕР-ВЕМ).

а) Ошибка прогноза Т, б) Высота пограничного слоя, с) Скорость трения

А) Ошибка прогноза скорости ветра (м/с)

В любой из дней красная кривая (ВЕР-ВЕМ) расположена ниже желтой (ВЕР), демонстрируя систематическое уменьшение ошибки ветра при включении ВЕР-ВЕМ.

В) Высота планетарного граничного слоя (PBLH, м)

Желтая и красная кривые практически всегда расположены выше синей, что свидетельствует об увеличении граничного слоя моделями с урбанизацией, особенно – у ВЕР-ВЕМ.

С) Скорость трения (UST, м/с)

ВЕР (желтая кривая) даёт систематически наибольшие значения  $U^*$  по сравнению с ВЕР-ВЕМ (красная). Это подчёркивает, что добавление энергетического баланса зданий в ВЕМ уменьшает трение у поверхности, в то время как ВЕР усиливает его (рисунок 3.48).

ВЕР-ВЕМ уменьшает ошибку скорости ветра за счёт сочетания умеренной  $U^*$  и высокой PBLH. Модель без учета урбанизации демонстрирует самую низкую PBLH и промежуточные  $U^*$ . ВЕР усиливает  $U^*$  и приподнимает высоту планетарного граничного слоя, но даёт более высокие ошибки.

Выбор схемы урбанизации должен основываться на приоритетах прогноза:

– Для температуры предпочтительнее ВЕР или ВЕР-ВЕМ с коррекцией антропогенных потоков тепла.

– Для ветра – ВЕР-ВЕМ или ВЕР с коррекцией параметров шероховатости.

Таким образом, комплексный подход к параметризации города – сочетание ВЕР и ВЕМ с их калибровкой является ключом к улучшению прогноза как скорости ветра, так и температуры в городских условиях.

## Заключение

В рамках данной работы было выполнено комплексное исследование влияния параметризации городской среды (схемы ВЕР и ВЕР-ВЕМ) в модели WRF-ARW на точность прогноза температуры, скорости и направления ветра, а также количества осадков для территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Проведены численные эксперименты с различными пространственными разрешениями сеток и разными атмосферными параметризациями.

Результаты численных экспериментов показали, что использование вложенной сетки с высоким пространственным разрешением (2 км) позволяет существенно повысить детализацию атмосферных процессов, в частности, точнее воспроизводить мелкомасштабные явления и учитывать особенности подстилающей поверхности. Подтверждено, что при таком разрешении модель более точно воспроизводит местные ветровые системы и характеристики температуры, особенно в городских условиях.

При оценке схем урбанизации было выявлено, что параметризация городской среды (ВЕР и ВЕР-ВЕМ) оказывает существенное влияние на прогноз метеорологических величин:

Температура воздуха на высоте 2 метра:

Схемы урбанизации (ВЕР и ВЕР-ВЕМ) стабильно уменьшали отрицательное смещение температуры, приближая модельные расчеты к реальным наблюдениям. Наибольший положительный эффект был зафиксирован для схемы ВЕР в январе 2015 и 2020 годов, когда ошибки прогноза уменьшались на 30–50%.

Однако выявлена также чувствительность прогноза температуры к балансу энергетических потоков (GRDFLX, HFX и LH). В отдельные дни урбанизация могла ухудшать прогноз из-за дисбаланса этих потоков, особенно

заметного в условиях фронтальных процессов или при экстремальных значениях потоков.

Скорость и направление ветра на высоте 10 метров:

Схема ВЕР демонстрировала неоднозначное влияние на точность прогноза скорости ветра. В 2020 году отмечалось ухудшение прогноза (увеличение ошибки примерно на 34%), в то время как в 2021 году – улучшение прогноза (снижение ошибки примерно на 34%).

Схема ВЕР-ВЕМ, учитывающая энергетический баланс зданий, значительно улучшила точность прогноза ветра в январе 2015 года, особенно в пределах городской застройки, уменьшив среднюю ошибку скорости ветра на 53% по сравнению с ВЕР и базовой конфигурацией. Также улучшился прогноз направления ветра.

Количество осадков:

Использование городской параметризации устранило систематическое недооценивание сильных осадков (уменьшение ошибки примерно на 81%). Это объясняется усилением конвективных процессов за счет дополнительного нагрева городской инфраструктуры, способствующего более реалистичному осадкообразованию.

При умеренных и слабых осадках эффект урбанизации оказался менее выраженным, так как атмосфера в таких условиях более устойчива, и дополнительные потоки тепла и влаги от городской поверхности не оказывают значительного влияния на прогноз.

Дополнительные эксперименты с альтернативным набором физических параметризаций CONUS продемонстрировали, что комплексный подход позволяет существенно снизить ошибки прогноза как температуры, так и скорости и направления ветра.

Таким образом, проведенное исследование подтвердило необходимость учета урбанизации при численном моделировании погоды в мегаполисах. Параметризация городской среды позволяет существенно повысить качество прогнозов температуры и количества осадков. Однако влияние городской

застройки на характеристики ветра требует дальнейшей калибровки параметров моделей и тщательного подбора схем физической параметризации.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности улучшения численного прогноза погоды для городских территорий и оптимизации выбора городских параметризаций в модели WRF-ARW для различных условий. Выводы исследования могут быть применены при моделировании и прогнозировании погоды в других крупных городах России и за ее пределами.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Bhautmage U.P., Martilli A., Salamanca F. et al. Development and Evaluation of a New Urban Parameterization in the Weather Research and Forecasting (WRF) Model // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2022. Vol. 127(16). DOI: <https://doi.org/10.1029/2021JD036338>
2. Chen F., Kusaka H., Bornstein R. et al. The integrated WRF/urban modeling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems // *International Journal of Climatology*. 2011. Vol. 31. P. 273–288. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.2158>
3. Giannaros T.M., Melas D., Founda D., Zanis P. A comprehensive approach for the simulation of the Urban Heat Island effect with the WRF/SLUCM modeling system: The case of Athens (Greece) // *Atmospheric Research*. 2018. Vol. 201. P. 86–101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.10.021>
4. Kusaka H., Kondo H., Kikegawa Y., Kimura F. A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models // *Boundary-Layer Meteorology*. 2001. Vol. 101. P. 329–358. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1019207923078>
5. Martilli A., Clappier A., Rotach M.W. An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models // *Boundary-Layer Meteorology*. 2002. Vol. 104. P. 261–304. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1016099921195>
6. Martilli A., Brousse O., Ching J. Urbanized WRF modeling using WUDAPT. Web version: March 2016. URL: [https://www.wudapt.org/...](https://www.wudapt.org/)
7. Masson V., Gomes L., Pigeon G. et al. Urban climate modeling and evaluation: A WRF–BEP–BEM case study over Paris // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2014. Vol. 14. P. 4941–4960. DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-14-4941-2014>
8. NCAR Research Applications Laboratory. WRF Urban Modeling. URL: <https://ral.ucar.edu/projects/wrf-urban>

9. Oke T.R. Boundary Layer Climates. 2nd ed. London: Routledge, 1987. 435 p.
10. Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A. Urban Climates. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
11. Salamanca F., Martilli A. A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization // Theoretical and Applied Climatology. 2010. Vol. 99. P. 331–344. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0142-9>
12. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J. et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR. Boulder, CO, 2008. DOI: <https://doi.org/10.5065/D6MK6B4K>
13. United Nations. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. URL: <https://population.un.org/wup/> (дата обращения: 20.02.2025)
14. Wang W., Chen F., Zhang Y. et al. Impacts of urbanization on regional climate in Beijing using WRF–BEP–BEM // Climate Research. 2018. Vol. 76. P. 27–43. DOI: <https://doi.org/10.3354/cr01525>
15. Zilitinkevich S.S., Esau I.N., Baklanov A.A. et al. Turbulence in the lower atmosphere over cities: Effects of the urban surface // Theoretical and Applied Climatology. 2015. Vol. 122. P. 255–273. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1298-2>
16. Zonato A., Martilli A., Gutierrez E. WRF Urban Update README File. Version 4.3. URL: <https://ral.ucar.edu/>
17. Варенцов М.И., Самсонов Т.Е., Кислов А.В., Константинов П.И. Воспроизведение острова тепла московской агломерации в рамках региональной климатической модели COSMO-CLM // Вестник МГУ. Сер. 5: География. 2017. № 6. С. 25–37.
18. Грицевич М.И., Старченко А.В., Демченко П.Ф. и др. Влияние урбанизации на температурные тренды в Санкт-Петербурге // Метеорология и гидрология. 2021. Т. 46, № 2. С. 108–116.

19. Косопанов Н.Н., Константинов П.И. Урбанизация и климат города // Современные проблемы науки и образования. 2023. № 2. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=31345>

20. Локощенко М.А. Остров тепла над Москвой // Метеорология и гидрология. 2014. № 4. С. 247–253.

21. Набокова Е.В. Опыт применения модели WRF с учетом двух методов параметризации городского подслоя для прогноза температуры воздуха и скорости ветра

22. Университет Вайоминга. Архив радиозондовых наблюдений. URL: [https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding\\_legacy.html](https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding_legacy.html) (дата обращения: 23.03.2025).

23. Погода и климат. Метеонаблюдения и архивы. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (дата обращения: 23.03.2025).