



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Варенцов Михаил Иванович

**Анализ и моделирование
мезоклиматических особенностей
Московской агломерации**

25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук**

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре метеорологии и климатологии географического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Научный руководитель:

Кислов Александр Викторович – профессор, доктор географических наук, заведующий кафедрой метеорологии и климатологии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Официальные оппоненты:

Калинин Николай Александрович – профессор, доктор географических наук, заведующий кафедрой метеорологии и охраны атмосферы ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Кузнецова Ирина Николаевна – доктор географических наук, заведующая лабораторией метеорологических условий загрязнения ФГБУ «Гидрометцентр России»

Нерушев Александр Федорович – доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе института экспериментальной метеорологии ФГБУ «НПО «Тайфун»

Защита диссертации состоится **17 мая 2018 г. в 15 ч. 00 мин.** на заседании диссертационного совета МГУ.11.02 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, ГЗ МГУ, географический факультет, 18 этаж, ауд. 1801.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/102223970/>

Отзывы на автореферат просим присылать в 2-х экземплярах, заверенных печатью учреждения, по адресу: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, ГЗ МГУ, географический факультет, ученому секретарю диссертационного совета МГУ.11.02, e-mail: Diss1102MSU@yandex.ru, факс +7 (495) 9328836.

Автореферат разослан 9 апреля 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук

А.В. Ольчев

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АМС	– автоматическая МС	МС	– метеорологическая станция
АСКЗА	– автоматическая станция контроля качества загрязнения атмосферы	ОТ	– (городской) остров тепла
МА	– Московская агломерация	ОВ	– (городской) остров влажности
		ОС	– (городской) остров сухости

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Урбанизированные территории характеризуются значительной антропогенной нагрузкой на окружающую среду и отличаются от естественных ландшафтов термодинамическими свойствами подстилающей поверхности. Эти факторы определяют формирование характерных **урбанистических (городских) аномалий метеорологического режима**. Яркий пример такой аномалии – эффект **городского острова тепла** (далее – ОТ), заключающийся в превышении температуры воздуха в городе относительно его окрестностей, в отдельных случаях – на 10 °С и более. ОТ и аномалии других метеорологических величин (ветра, влажности и т.д.) сказываются на условиях проживания городского населения и хозяйственной деятельности. Соответственно, актуальным направлением современной метеорологии и климатологии является изучение подобных аномалий и их учет в различных практических задачах, начиная с прогноза погоды и заканчивая планированием долгосрочного развития городов и их адаптации к изменениям климата.

Подобные исследования ведутся в рамках городской климатологии, возникшей как наука в XIX в. и активно развивающейся с 1950-х гг. Однако многие ее классические результаты получены по точечным данным редких городских метеостанций (далее – МС), что затрудняет понимание пространственной структуры городских аномалий метеорологического режима. Так, дискуссионным остается вопрос об их пространственном масштабе. Часто такие аномалии рассматриваются как локальные (микроклиматические) особенности местности, для которых подразумевается горизонтальный масштаб менее 1 км и локализация в пределах приземного слоя атмосферы.

Поскольку современные мегаполисы простираются на десятки км, можно говорить и о соизмеримых **мезомасштабных** аномалиях, обусловленных интегральным влиянием города. Их свойства неизбежно должны отличаться

от микроклиматических особенностей отдельных дворов, улиц и парков. Это обстоятельство подтверждается установленными фактами влияния крупных городов на атмосферные процессы далеко за пределами приземного слоя, в том числе на местные циркуляции и режим осадков. Однако подобные факты немногочисленны и получены по данным разрозненных и преимущественно непродолжительных измерений, что затрудняет понимание общей картины влияния большого города на мезоклимат. Новые возможности для исследования данного вопроса открывают технологии мезомасштабного моделирования.

Московская агломерация (далее – МА) в силу размера, особенностей планировки и географического положения является удобным объектом для изучения урбанистических мезо-аномалий метеорологического режима. Дополнительную значимость подобным исследованиям для Москвы придает их важность для понимания отклика климата города на его рост и развитие и, в итоге, для долгосрочного градостроительного планирования. В частности, важной задачей представляется оценка изменений мезоклимата МА вследствие реализации масштабных проектов развития территории «Новой Москвы» и реновации старых пятиэтажных зданий, реализуемых Правительством Москвы.

Ключевым инструментом данного исследования является региональная модель атмосферы COSMO, на базе которой разработана технологическая система COSMO-Ru, используемая для оперативного прогноза погоды в Гидрометцентре России. Это определяет высокую практическую значимость развития и апробации методов воспроизведения особенностей городского климата в рамках данной модели.

Таким образом, комплексный анализ мезоклиматических особенностей МА по данным наблюдений и моделирования, а также оценка чувствительности мезоклимата города к возможным сценариям его развития представляют собой актуальную научную задачу.

Объект исследования: метеорологический режим Московского региона.

Предмет исследования: урбанистические мезо-аномалии метеорологического режима МА и их пространственно-временная изменчивость.

Цель работы: комплексный анализ урбанистических мезоклиматических аномалий МА, их пространственно-временной изменчивости и чувствительности к реализации возможных сценариев развития города.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Уточнение количественных характеристик урбанистических аномалий температуры и влажности МА (величин, аномалии которых могут быть надежно диагностированы по стационарным данным), тенденций их многолетней динамики и взаимосвязи последней с изменениями климата.
2. Определение пространственной структуры этих аномалий по данным новых сетей метеорологического мониторинга, развёрнутых в Московском регионе в последние годы.
3. Адаптация мезомасштабной модели атмосферы COSMO-CLM для условий Московского региона, включающая выбор и настройку необходимых параметризаций, подготовку требующихся входных параметров и определение оптимальной конфигурации модели.
4. Анализ четырехмерной (пространственно-временной) структуры урбанистических мезо-аномалий метеорологического режима по результатам моделирования.
5. Оценка чувствительности климата МА к реализации набора гипотетических сценариев ее развития по результатам моделирования.

Научная новизна работы:

1. Для анализа пространственно-временной изменчивости урбанистических аномалий температуры и влажности МА в дополнение к данным стандартных метеорологических наблюдений **впервые** использованы данные новых сетей мониторинга: автоматических метеостанций (далее – АМС) ФГБУ «Центральное УГМС» и автоматических станций контроля загрязнения атмосферы (далее – АСКЗА) ГПБУ «Мосэкомониторинг».
2. Предложена, апробирована и успешно верифицирована методика детализированного моделирования метеорологического режима МА, синтезирующая **самые передовые программные и технические решения**: современную мезомасштабную модель COSMO, адаптированную соискателем под условия Московского региона и дополненную специализированной параметризацией городской поверхности;

принципиально новую технологию получения параметров городской среды на основе ГИС-анализа картографических данных OpenStreetMap, разработанную на кафедре картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова Самсоновым Т.Е. с участием соискателя; высокопроизводительные суперкомпьютерные вычисления.

3. Моделирование атмосферных процессов в Московском регионе **впервые** выполнено в рамках мезомасштабной модели атмосферы с явным учетом влияния урбанизированной поверхности, с высоким пространственным разрешением (шаг сетки 1 км), на многолетнем временном масштабе.
4. **Впервые** проведен комплексный анализ пространственной структуры ОТ и других урбанистических мезоклиматических аномалий в четырехмерном пространстве (изучена временная динамика их трехмерной структуры).
5. **Впервые** получена оценка отклика климата МА на реализацию гипотетических сценариев ее экстенсивного и интенсивного развития.

Основные защищаемые положения:

1. Урбанистические аномалии метеорологического режима МА выражены как мезомасштабные явления, соизмеримые с ней по характерному горизонтальному размеру, вытянутые по вертикали на сотни метров и влияющие на динамические процессы в тропосфере.
2. Предлагаемая методика мезомасштабного моделирования способна адекватно воспроизводить метеорологический режим МА, в том числе его урбанистические аномалии, и может быть использована для их анализа.
3. В МА выражено урбанистическое усиление современного потепления климата, обусловленное ростом и развитием города, а также крупномасштабными изменениями фонового метеорологического режима, способствующими усилению ОТ в летний период.
4. Локальные урбанистические изменения (застройка новых территорий в пределах МА или на ее периферии) ведут к усилению городских мезомасштабных аномалий метеорологического режима и формированию его нелокальных откликов, что объясняет механизм наблюдаемой интенсификации ОТ.

Практическая значимость. Полученные результаты демонстрируют важность учета урбанистических мезо-аномалий метеорологического режима в широком спектре научных и прикладных задач, включая прогноз погоды и качества воздуха для урбанизированных территорий, детализацию ожидаемых климатических изменений и разработку оптимальных сценариев развития города. Также показана перспективность применения современных технологий мезомасштабного моделирования для решения подобных задач. В частности, результаты работы могут быть использованы для улучшения качества численных прогнозов погоды для Московской агломерации и других урбанизированных территорий в рамках системы краткосрочного прогноза погоды COSMO-Ru, развиваемой в ФГБУ «Гидрометцентр России».

Апробация работы. Основные результаты работы доложены соискателем лично на 14 конференциях и семинарах, в т.ч. на генеральной ассамблее Европейского геофизического союза EGU (Вена, Австрия, 2014; 2016; 2017), международной конференции по городскому климату ICUC (Тулуза, Франция, 2015); конференции Европейского метеорологического общества EMS (Триест, Италия, 2016; Дублин, Ирландия, 2017), семинарах пользователей моделей COSMO/CLM/ICON/ART (Оффенбах, Германия, 2017; 2018), научно-техническом семинаре ФГБУ «Центральное УГМС» (Москва, 2016) и других. Результаты диссертации использованы при выполнении работ по 7 НИР, финансируемых фондами РФФИ, РГО, РНФ и Советом по грантам Президента РФ, и по приоритетному проекту AEVUS консорциума COSMO.

Личный вклад автора. Все анализируемые результаты работы получены автором лично. В частности, автором самостоятельно выполнены обработка и анализ всех имеющихся данных наблюдений, проведены численные эксперименты с моделью COSMO-CLM, интерпретированы результаты моделирования. Автор участвовал в разработке используемой в работе методики геоинформационного анализа данных OpenStreetMap (совместно с Самсоновым Т.Е. и Константиновым П.И.) и параметризации городской подстилающей поверхности TERRA_URB (совместно с ее основным автором Вoutersом Х.).

Научные публикации. По теме диссертации опубликовано **26** работ, включая **7** статей в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях, определенных п. 2.3 Положения о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова, **5** статей и разделов в **2-х** коллективных монографиях, **17** тезисов в сборниках российских и международных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 256 наименований работ отечественных и зарубежных авторов, списка сокращений и обозначений. Она изложена на 212 страницах текста, включая 88 рисунков и 8 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, ее практическая значимость и научная новизна, сформулированы цели и задачи исследования, указан личный вклад автора, приведены сведения об апробации работы, структуре и объеме диссертации.

В первой главе приведены результаты обзора литературы и анализа особенностей метеорологического режима МА по данным многолетних наблюдений МС. В разделе 1.1 по литературным данным рассмотрены основные причины формирования ОТ и других особенностей городского климата, а именно: 1) различия теплофизических свойств искусственных и естественных поверхностей; 2) геометрические особенности городской застройки, влияющие на условия радиационного обмена поверхности с атмосферой и на условия турбулентности; 3) наличие непроницаемых для влаги и лишенных растительности поверхностей; 4) антропогенные эмиссии тепла; 5) особенности газового и аэрозольного состава городской атмосферы [Ландсберг, 1983; Оке, 1987; Мягков, 2005; 2007; Еланский и др., 2012]. Для умеренных широт считается, что летом основной вклад в формирование ОТ вносят факторы №1–3, а зимой – фактор №4 [Christen, Vogt, 2004; Oke, 1982; Ryu, Baik, 2012].

В разделе 1.2 приведен обзор литературы, посвященной климатическими особенностям МА. Они уже не раз подвергались всестороннему анализу [Климат..., 1969; Климат..., 1995]. Однако современные изменения

регионального климата, а также рост и развитие города обуславливают важность уточнения результатов и изучения многолетних трендов. В последующих работах, например, в [Стулов, 1993; Рубинштейн, Гинзбург, 2003; Мягков, 2005; 2006; Кузнецова и др., 2017; Lokoshchenko, 2014; 2017] различные аспекты влияния города на метеорологический режим рассматриваются независимо друг от друга, по различающимся данным и методикам, что осложняет понимание общей картины. Это определяет актуальность задачи комплексного анализа климатических аномалий МА для современного периода.

Раздел 1.3 посвящен описанию сети метеорологических наблюдений в Московского регионе, использованных баз данных и алгоритмов работы с ними, а также методики определения количественных характеристик городских аномалий температуры (**интенсивности ОТ**) и влажности по данным МС. Они определены как отклонения от фоновых значений (средних по 9 загородным МС, окружающих МА). Надёжное определение аномалий других метеорологических величин по станционным данным осложнено рядом трудностей, поэтому для их анализа использованы результаты моделирования (см. Главу 4).

В разделе 1.4 рассмотрены характеристики ОТ Москвы по данным МС. Средняя интенсивность ОТ за 2007–2016 гг. составляет 2 °С для центра города (МС Балчуг), 1 °С и 0.7 °С для городских парков (МС МГУ и ВДНХ). Значения для МС Балчуг выделяются на фоне крупнейших городов мира, превосходя интенсивность ОТ Лондона [Lee, 1992; Wilby et al., 2011], Шанхая [Longxun et al., 2003] и Пекина [Liu et al., 2007; 2009] или сопоставимы с последней [Yang et al., 2013]. Временная изменчивость интенсивности ОТ определяется суточным и сезонным ходом, а также зависимостью от синоптических условий: ОТ выражен ярче в ясную и безветренную погоду. Суточный ход характеризуется дневным минимумом и ночным максимумом и сильнее выражен летом.

В разделе 1.5 анализируются многолетние тренды температуры воздуха и интенсивности ОТ. Для фоновой температуры за 1977–2016 гг. диагностируется потепление со скоростью 0.55 и 0.60 °С/10 лет для среднегодовых и летних значений соответственно. Тренд зимних значений также положителен, однако на

фоне большей межгодовой изменчивости его значимость мала. В 1990–2010-х гг. рост летних температур замедлился, а зимних – прекратился в связи с «паузой глобального потепления» [Climate Change..., 2013]. Для интенсивности ОТ с конца 1980-х гг. также диагностируются положительные тренды. Рост ее среднегодовых значений за 1988–2016 гг. (0.19 и 0.12 °C/10 лет для МС Балчуг и МГУ) обусловлен, главным образом, летними трендами (0.38 и 0.15 °C/10 лет), в то время как зимние не являются значимыми. Положительные тренды фоновой температуры и интенсивности ОТ обуславливают летнее **урбанистическое усиление потепления климата**. Так, рост средней летней температуры за 1988–2016 гг. для МС Балчуг составляет 0.93 °C/10 лет, а фоновой температуры – только 0.55 °C/10 лет (*Рисунок 1а*).

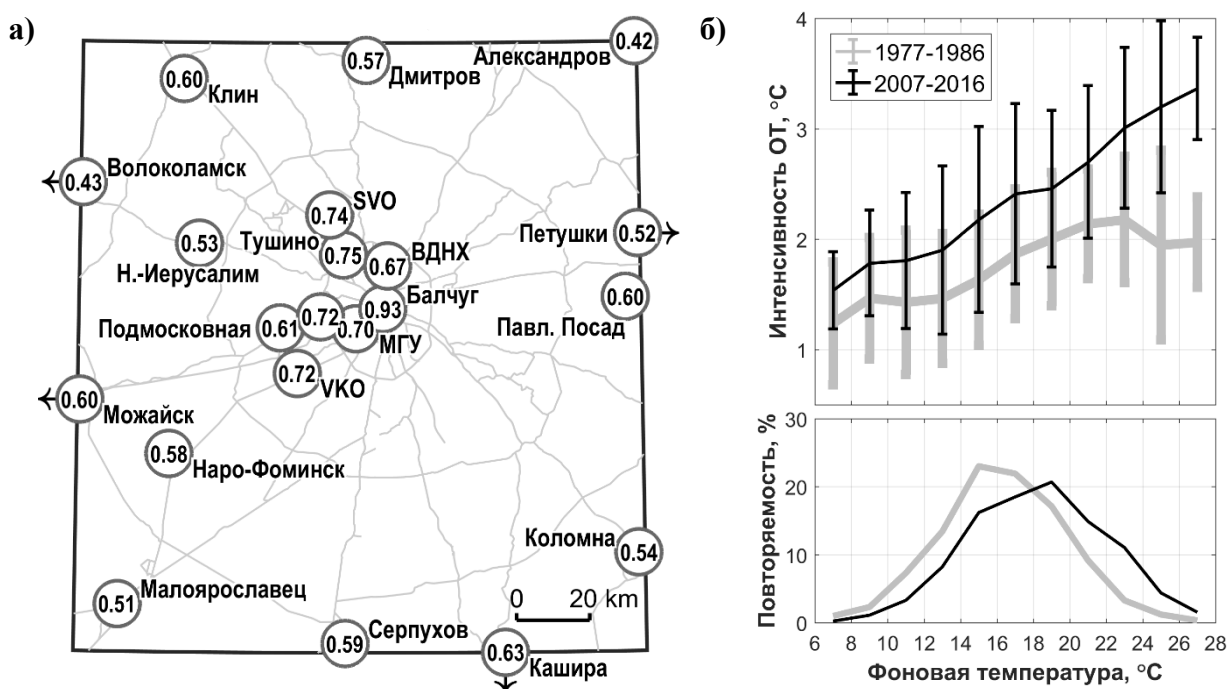


Рисунок 1 – Коэффициенты линейного тренда средней летней температуры (°C/10 лет) для МС Московского региона за 1988–2016 гг. (**а**); зависимость среднесуточной интенсивности ОТ (для МС Балчуг) от фоновой температуры для летних сезонов за 1977–1986 гг. и 2007–2016 гг. (**б**). Вертикальные отрезки показывают ± 1 стандартное отклонение, снизу показана повторяемость различных значений фоновой температуры за два периода

Интенсификация ОТ выражена для всех диапазонов летних температур, но сильнее всего – для периодов жары (*Рисунок 1б*), характерной для условий антициклональной погоды. Повторяемость последней также увеличивается за счет крупномасштабных изменений метеорологического режима, проявляющихся также в региональном уменьшении скорости ветра [Мещерская

и др., 2004; 2006], уменьшении облачности нижнего яруса, увеличении продолжительности солнечного сияния и сумм прямой солнечной радиации [Сидоренко и др., 2012; Горбаренко, 2016]. Такие изменения способствуют усилению ОТ. Их вклад в итоговый тренд интенсификации ОТ составляет примерно 15–20 % для МС Балчуг и 40–45 % для МГУ; оставшуюся часть можно объяснить урбанистическими изменениями – ростом и развитием города.

Зависимость интенсивности ОТ от температуры отмечается и для других городов, например, в [De Ridder et al., 2016]. Ее значимость и экологическая опасность обусловлена усилением экстремальной жары на большую величину в сравнении со средней климатической интенсивностью ОТ. Также усиливаются тепловой стресс и нагрузка на здоровье жителей, формируется городская аномалия смертности [Buechley et al., 1972; Vandentorren et al., 2004; Tan et al., 2010; Gabriel, Endlicher, 2011]. В условиях продолжающегося потепления климата это обстоятельство доказывает актуальность работ по мониторингу, изучению и прогнозу климатических изменений для МА и других мегаполисов.

В разделе 1.5 анализируются городские аномалии влажности. Закономерности их временной изменчивости согласуются с результатами, полученными ранее для Москвы [Климат..., 1995; Lokoshchenko, 2017] и других городов умеренных широт [Hage, 1975; Unger, 1999; Kuttler et al., 2007]. Летним днем и вечером парциальное давление водяного пара в городе меньше фонового, т.е. выражен **городской остров сухости** (далее – ОС). Летними ночами, а также зимой из-за эффекта ОТ точка росы в городе достигается реже, чем за городом, что обуславливает положительную аномалию влагосодержания – **остров влажности** (далее – ОВ). В поле относительной влажности практически всегда выражен ОС. Многолетние тренды интенсивности ОС и ОВ для Москвы выражены слабо и в большинстве случаев не являются значимыми.

Вторая глава посвящена анализу пространственной структуры ОТ и ОС по совместным данным МС и новых сетей АМС ФГБУ «Центральное УГМС» и АСКЗА ГПБУ «Мосэкомониторинг». В разделе 2.1 обоснована возможность использования для этой задачи данных измерений АСКЗА. Формально они не соответствуют стандартам метеорологических наблюдений (проводятся

на высоте ≈ 2 м над металлической крышей измерительного павильона и ≈ 4 м над землей). Кроме того, АСКЗА могут быть расположены вплотную к зданиям и деревьям. Сравнение измерений МС и АСКЗА для точек, где они проводятся совместно (Павловский посад и МГУ) показало возможность использования данных АСКЗА для анализа пространственного распределения среднесуточных и ночных значений температуры для всех сезонов года, а также влажности для дневных условий летом. В разделе 2.2 на основе анализа пространственных корреляционных функций обоснована возможность интерполяции и проведения изолиний по данным новых сетей мониторинга.

В разделе 2.3 рассмотрена пространственная структура ОТ по данным за лето 2014 и 2015 гг. и зимы 2013/14 и 2014/15 гг. В полях средней сезонной температуры ярко выражена концентрическая аномалия, оправдывающая термин «остров тепла» и соразмерная городу. Однородная область высоких температур, сравнимых со значениями для МС Балчуг, охватывает всю территорию внутри Третьего транспортного кольца. При удалении от центра города температура плавно убывает. Отдельными холодными пятнами выделяются городские парки. Эти закономерности наиболее наглядно видны на примере выборок случаев с ярко выраженным ОТ (когда его интенсивность для МС Балчуг более $4\text{ }^{\circ}\text{C}$) (*Рисунок 2*).

На примере таких выборок изучены факторы, определяющие пространственную структуру ОТ. С использованием коэффициентов множественной линейной регрессии и частных коэффициентов корреляции показано, что 90 % пространственной изменчивости температуры в пределах МА обусловлено двумя факторами – долей площади урбанизированной территории в окрестностях точки измерений (см. Главу 3) и удаленностью от центра города. Первый характеризует локальные особенности местности, а второй – мезомасштабное влияние агломерации. Зимой их вклад соизмерим, летом преобладает первый, но второй остается значимым.

В разделе 2.4 рассмотрена пространственная структура летнего дневного ОС. В полях средней за лето относительной и удельной влажности мезомасштабная аномалия не идентифицируется, картина очень пестрая.

Однако мезомасштабный ОС ярко выражен для выборки дневных случаев, когда относительная влажность на МС Балчуг меньше фоновой более чем на 10 % (которые характерны для дождливых периодов или в первые дни после их окончания). Интенсивность ОС для таких случаев значительно превосходит фоновую изменчивость и плавно убывает по мере удаления от центра города.

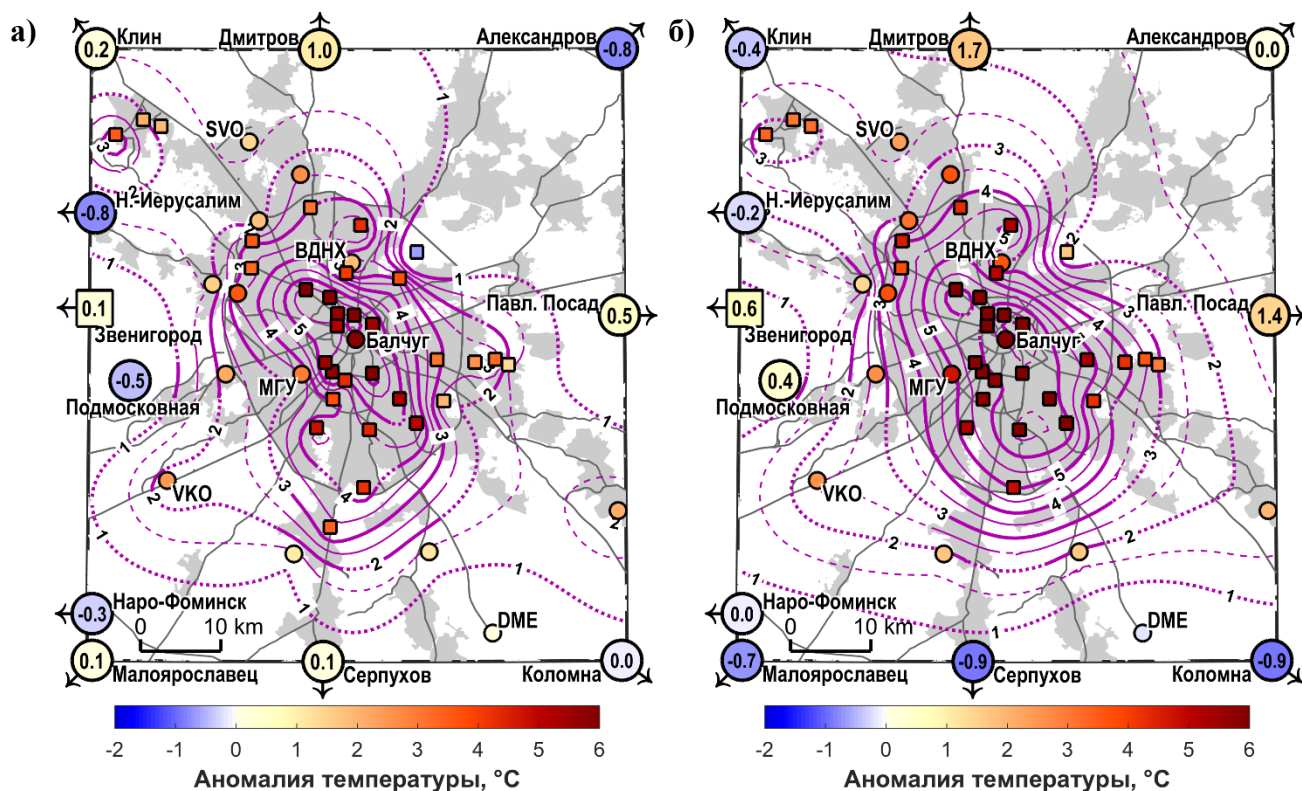


Рисунок 2 – Пространственное распределение аномалий температуры в среднем по выборкам случаев с выраженным ОТ (интенсивность для МС Балчуг более 4 °С) за лето 2014 г. (а) и зиму 2013/14 гг. (б). Пунктирные участки изолиний характеризуют области, в которых их проведение не является достоверным. Толстые изолинии проведены через 1 °С, дополнительные тонкие изолинии – через 0.5 °С, нулевая изолиния не проведена. Цифрами показаны значения аномалии в °С для основных фоновых МС и АСКЗА Звенигород

Таким образом, ОТ и ОС по горизонтальному размеру (десятки км) соизмеримы с территорией МА, что соответствует мезомасштабу метеорологических процессов согласно классификации [Orlanski, 1975]. Свойства этих аномалий для конкретной точки определяются как локальными особенностями окружающей территории, так и ее положением относительно МА. При этом в центральной части города выражена однородная область наибольшей температуры и наименьшей дневной влажности, для которой репрезентативны данные МС Балчуг.

В главе 3 представлена методика численного моделирования метеорологического режима МА. В разделе 3.1 обоснованы возможность применения для этого мезомасштабных моделей атмосферы и выбор горизонтального шага сетки в 1 км (он позволяет явно задавать крупные особенности городского ландшафта – парки и районы плотной застройки, а также воспроизводить большую часть мезомасштабных процессов, в т.ч. глубокую конвекцию [Калинин и др., 2017; Prein et al., 2015]). В разделе 3.2 дано описание региональной негидростатической модели COSMO [Baldauf et al., 2011; Вильфанд и др., 2010; Ривин и др., 2015], ее уравнений, параметризаций и особенностей используемой версии COSMO-CLM, адаптированной для продолжительных экспериментов [Böhm et al., 2006].

В разделе 3.3 описана конфигурация численных экспериментов. Используются вложенные области моделирования (домены) D1, D2 и D3 с горизонтальным шагом сетки 12, 3 и 1 км соответственно, последний охватывает территорию вокруг Москвы размером 180x180 км (*Рисунок 3*).

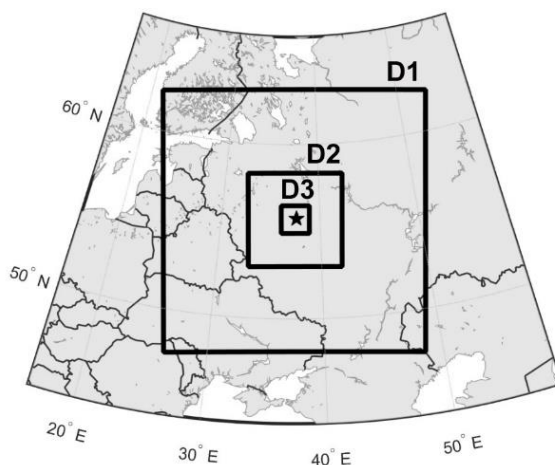


Рисунок 3 – Конфигурация вложенных областей моделирования

При расчетах для D1 боковые граничные условия обновляются каждые 6 ч по данным реанализа ERA-Interim (с шагом сетки ≈ 75 км), что вместе с использованием метода «спектрального подталкивания» [von Storch et al., 2000; Варенцов и др., 2016] обеспечивает близость крупномасштабной циркуляции в модели к реально наблюдавшейся. Результаты расчетов для D1 используются в качестве граничных условий для D2, далее процедура повторяется для D3, т.е. осуществляется динамическая детализация данных реанализа для Московского региона. Инициализация модели по данным реанализа задана 1 мая, далее непрерывный расчет ведется до конца следующей зимы. Такой подход позволяет «забывать» начальное состояние атмосферы и при этом избегать накопления ошибок, обусловленных «медленными» процессами влагообмена между почвой, снежным покровом и

атмосферой. Конфигурация настроек модели адаптирована для условий Московского региона, что значительно уменьшает ее систематические ошибки. Для вычислений использован суперкомпьютер «Ломоносов-2» МГУ.

В разделе 3.4 представлена параметризация TERRA_URB, разработанная бельгийским исследователем Хендриком Вoutersом [Wouters et al., 2015; 2016] и используемая в COSMO для описания городской поверхности. Особенности теплового баланса последней воспроизводятся за счет коррекции свойств подстилающей поверхности с учетом геометрических особенностей застройки и специфики водного баланса города. Также задается антропогенный поток тепла с учетом «типичного» суточного и годового хода по [Flanner, 2009]. Схема TERRA_URB использована только при расчетах для домена D3.

В разделе 3.5 описана методика получения необходимых для модели параметров городской среды (доли площади урбанизированной территории в площади модельных ячеек, доли площади зданий, их высоты, отношения последней к ширине улиц) с использованием оригинальной технологии анализа картографических данных OpenStreetMap [Samsonov et al., 2015]. Среднегодовой антропогенный поток тепла задан на основе оценки его осредненного по площади города значения в 75 Вт/м^2 [Stewart, Kennedy, 2017], а его величина для каждой из модельных ячеек определена пропорционально произведению средней высоты зданий на их суммарную площадь.

В разделах 3.6 и 3.7 приведены результаты верификации модели. На основе сравнения с данным наблюдений загородных МС показана адекватность воспроизведения летнего фоновое метеорологического режима. При этом использование модифицированных настроек существенно уменьшает ошибки моделирования, особенно для жарких и сухих сезонов (2002, 2010 и 2014 гг.). Также модель реалистично воспроизводит временную и пространственную изменчивость интенсивности ОТ (в т.ч. суточный ход и характерные экстремумы), что показывает пример для лета 2015 г. (*Рисунки 4, 5*). Эффекты ОС и ОВ также воспроизводятся, но влажность в городе несколько занижается, в т.ч. по причине отсутствия учета растительности внутри застройки.

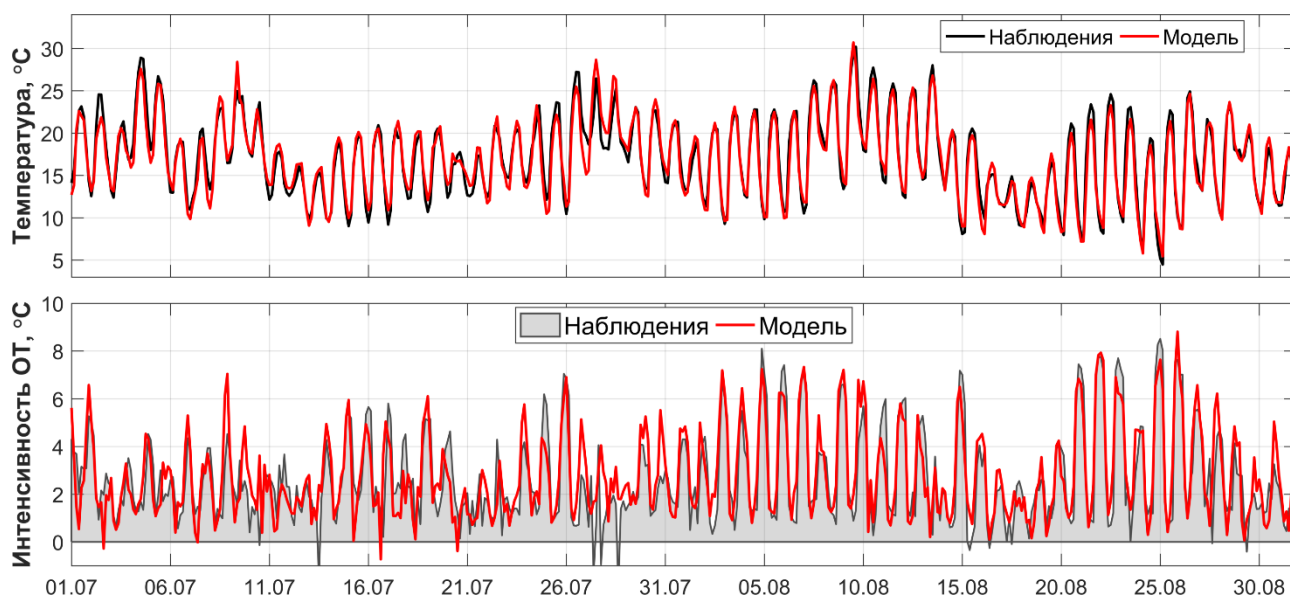


Рисунок 4 – Динамика средней по 9 фоновым МС температуры воздуха (сверху) и интенсивности ОТ (снизу) для МС Балчуг по данным наблюдений и моделирования за июль – август 2015 г.

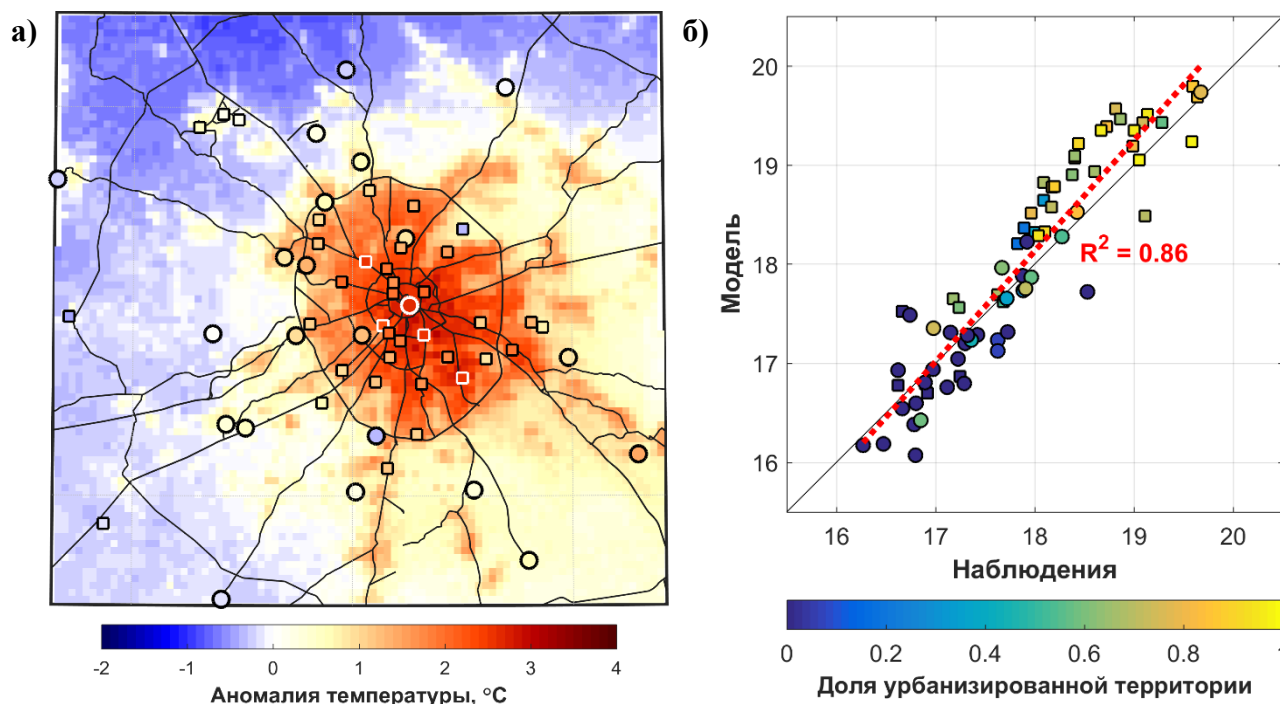


Рисунок 5 – Пространственное распределение среднесуточной аномалии температуры по данным наблюдений (круглые маркеры для МС и АМС, квадратные – для АСКЗА) и моделирования (цветной фон) за лето 2015 г. (а); сравнение значений среднесуточной температуры по данным наблюдений и моделирования (б)

Зимний метеорологический режим МА и окрестностей воспроизводится моделью также адекватно, но ошибки больше летних. Это связано с известными проблемами воспроизведения положительной приземной температуры в рамках модели COSMO при наличии снежного покрова [Казакова и др., 2010; 2013], сложностью описания динамики последнего для города и отсутствием учета

зависимости антропогенного потока тепла от температуры в модели. По этим причинам основной акцент далее сделан на летнем сезоне.

Важно подчеркнуть, что реалистичное воспроизведение ОТ достигнуто путем параметризации физических свойств городской поверхности и антропогенного потока тепла, но без учета особенностей газового и аэрозольного состава городской атмосферы. Это не отрицает важную роль последних в формировании ОТ [Еланский и др., 2012; Климат Москвы..., 1969], но показывает, что она не является определяющей.

Глава 4 посвящена анализу четырёхмерной структуры городских мезо-аномалий по данным моделирования, позволяющих получить более детализированную и комплексную картину по сравнению с данными наблюдений. Интенсивность аномалий далее определяется как разность результатов моделирования с параметризацией TERRA_URB и без нее.

В разделе 4.1 рассмотрена пространственная структура аномалий температуры и влажности. По данным моделирования они имеют значительную вертикальную протяженность, а их структура подвержена выраженной суточной и сезонной изменчивости. Летними днем и вечером ОТ вытянут по вертикали более чем на 1 км (**Рисунок 6а**). Протяженность более интенсивного ночного ОТ ограничена высотой ≈ 150 м (**Рисунок 6б**), а выше (в слое 200–600 м) формируется отрицательная аномалия, известная как кросс-овер эффект [Duckworth, Sandberg, 1954] или «линза холода» [Khaikine et al., 2006]. Считается, что этот эффект обусловлен интенсификацией перемешивания над городом в условиях устойчивой фоновой стратификации, а также дивергенцией потока длинноволновой радиации, характерной для более загрязнённого и влажного (ночью) городского воздуха [Lee, Olfe, 1974; Oke, 1982]. Однако последний фактор не должен играть важной роли в модели, так как загрязнение воздуха в ней не учитывается, а влажность в городе занижается. Зимой вертикальная структура ОТ (для случаев, когда он хорошо выражен) похожа на летнюю ночную. Аномалии влажности характеризуются схожей с ОТ вертикальной протяженностью. Днем и вечером ярко выражен ОС (до высот порядка 1–1.5 км), а ночью диагностируется приподнятый над городом ОВ.

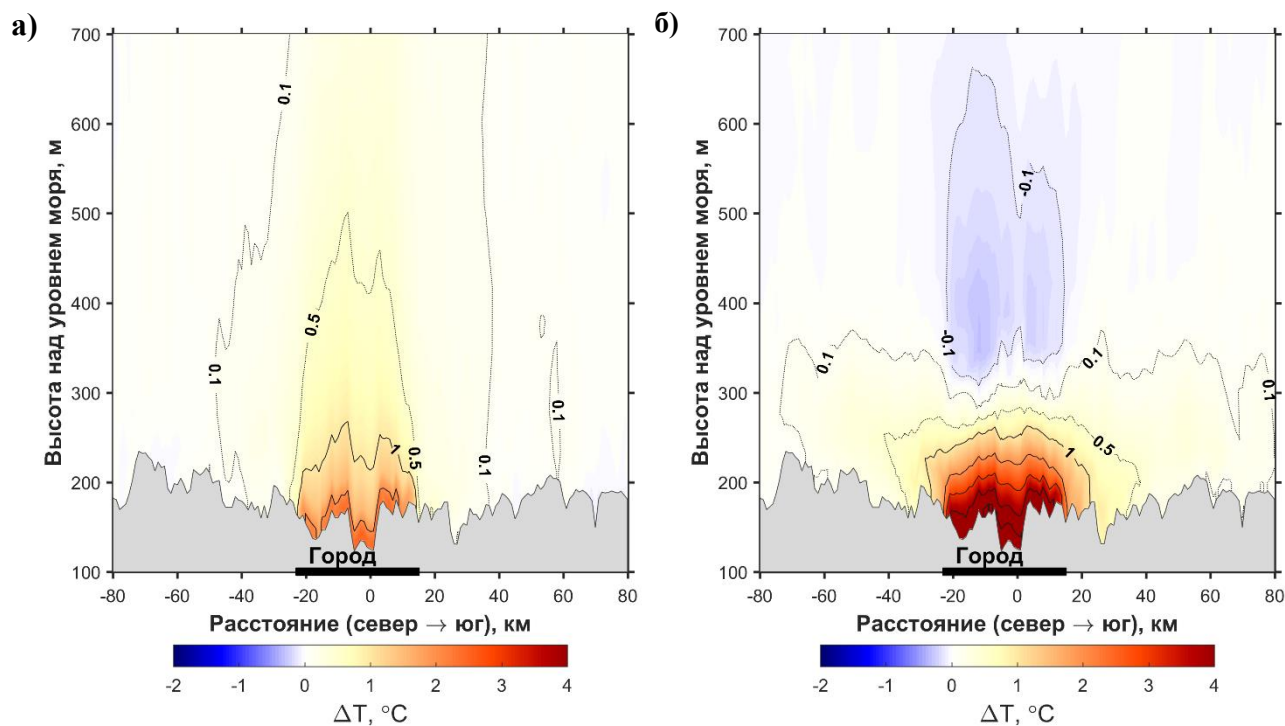


Рисунок 6 – Вертикальный разрез (с севера на юг через центр Москвы) городской аномалии температуры ΔT , построенный для средних вечерних (16 UTC/19 МСК) (а) и ночных (0 UTC/3 МСК) (б) значений за дни с интенсивным ОТ за лето 2014 г. Изолинии проведены с шагом 1°C и для значений ± 0.1 и $\pm 0.5^\circ\text{C}$, нулевая изолиния не проведена. Ноль оси абсцисс соответствует положению МС Балчуг, черный отрезок обозначает пересечение города. Серой заливкой показана высота поверхности над уровнем моря

Результаты моделирования на качественном уровне согласуются с результатами анализа данных контактных измерений [Локощенко и др., 2016] и дистанционного зондирования с использованием микроволновых профиломеров МТП-5 [Кадыгров и др., 2002; Кузнецова, Нахаев, 2010; Khaikine et al., 2006; Варенцов и др., 2017], а также со спутниковыми данными [Горлач и др., 2017; Кислов и др., 2017]. При этом воспроизводимая моделью динамика вертикальной структуры ОТ объясняет расхождения в существующих эмпирических оценках его вертикальной протяженности (от 100 м до 1.5 км), которые характеризуют различное время года и суток.

Все вышеперечисленное подтверждает адекватность модели и позволяет использовать ее для анализа более тонких особенностей городских мезо-аномалий, изучение которых по данным наблюдений затруднительно. Так, показан сдвиг ОТ по направлению фонового воздушного потока и формирование в условиях устойчивой стратификации атмосферы приподнятых тепловых шлейфов, вытянутых по ветру на десятки км. Их существование понятно из

теоретических соображений, однако подтверждалось ранее только разовыми измерительными кампаниями [Clarke, 1969; Wong, Dirks, 1978]. Также показано, что тепловые шлейфы увеличивают устойчивость атмосферы над загородными территориями с подветренной стороны от города, что может быть важно в задачах моделирования распространения загрязнений.

В разделе 4.2 анализируется влияние города на ветровой режим выше уровня крыш. Оно представлено двумя основными факторами: торможением ветра более шероховатой поверхностью и усилением конвергенции воздушных потоков над городом за счет мезомасштабной циркуляции, индуцируемой температурной аномалией и известной как **городской бриз** [Ландсберг, 1983; Oke, 1987; Lemonsu, Masson, 2002; Мягков и др., 2007].

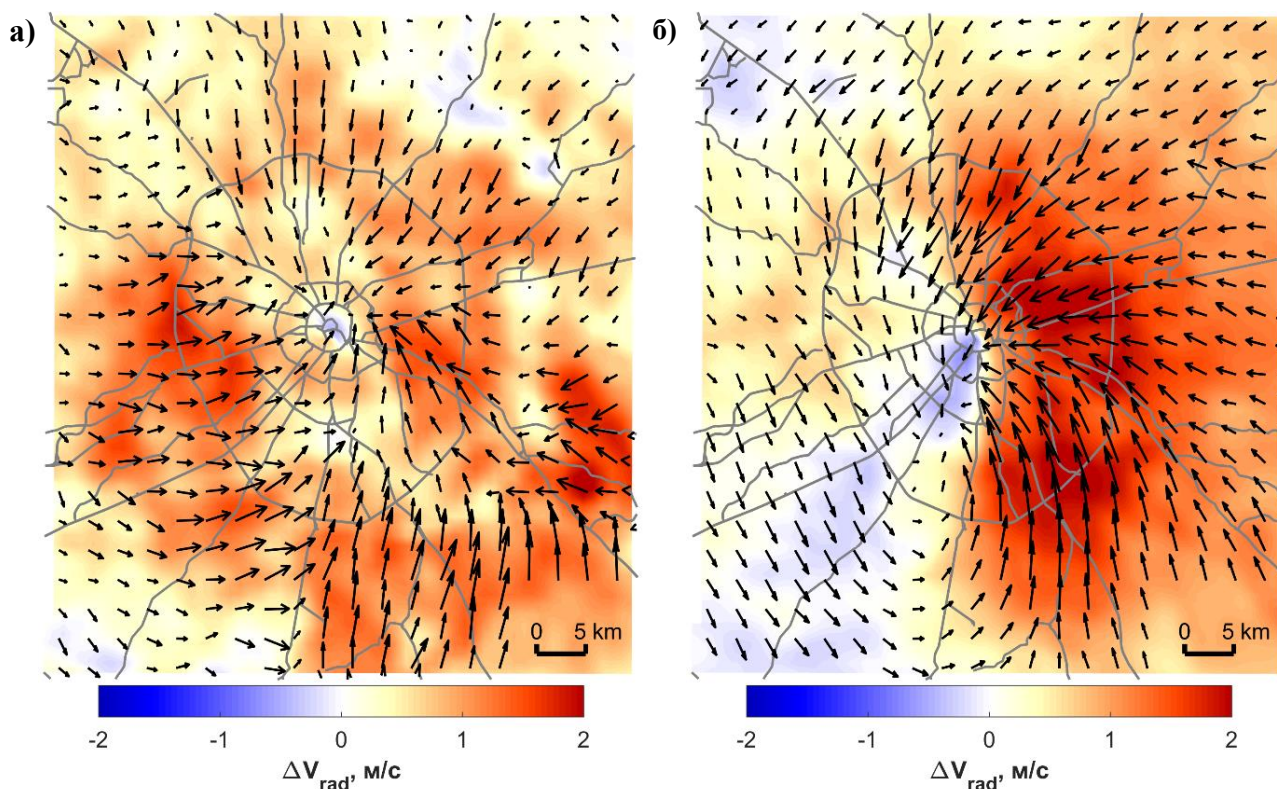


Рисунок 7 – Векторное поле городской аномалии ветра (черные стрелки) и аномалия его радиальной (направленной к центру города) компоненты ΔV_{rad} (цветной фон) на высоте 120 м над поверхностью в среднем для выборок вечерних (15–16 UTC/18–19 МСК) сроков со слабым фоновым ветром и интенсивным ОТ за лето 2014 г. (а) и зиму 2009/10 гг. (б)

По данным моделирования оба фактора оказывают значительное влияние на ветровой режим нижней тропосферы и характеризуются сложной пространственно-временной изменчивостью. Так, городской бриз выражен сильнее вечером (**Рисунок 7**). В ночные часы летом и практически все время

зимой диагностируется не только усиление конвергенции приповерхностных потоков, но и увеличение циклонической завихренности вокруг города (*Рисунок 7б*). Ярче эти эффекты проявляются в дни со слабым фоновым ветром (при его средней скорости в нижних 150 м менее 3 м/с), но также они выражены и в средних сезонных значениях. Несмотря на общее уменьшение скорости ветра над городом (до высот ≈ 500 м над поверхностью), за счет эффекта городского бриза приповерхностная аномалия скорости в среднем за сутки близка к нулю, а ее средние вечерние значения – положительны.

В разделе 4.3 рассмотрены урбанистические аномалии облачности и летних/зимних сумм осадков («базового» климатического показателя режима их выпадения). Аномалии осадков для отдельных сезонов незначимы на фоне случайных флуктуаций, однако по данным моделирования за 10 лет (2007–2016 гг.) видно, что суммы летних осадков увеличиваются над центральной частью МА и к востоку от ее (с подветренной стороны относительно преобладающего западного переноса). В среднем в пределах МКАД увеличение составляет $\approx 10\%$ с локальными экстремумами до 25% (*Рисунок 8а*). В суточном ходе максимум аномалии приходится на дневные и вечерние часы. Эти результаты согласуются с рядом работ, показывающих увеличение сумм осадков над крупными городами, в т.ч. над Москвой [Климат..., 1969; Стулов, 1993]. Данный эффект объясняется интенсификацией влажной конвекции над городом, развитием кучево-дождевой облачности и ее сдвигом по потоку [Bornstein, Lin, 2000; Dixon, Mote, 2003; Han et al., 2014; Zhu et al., 2017].

Об интенсификации конвекции также свидетельствуют положительные аномалии дневной облачности, воспроизводимые моделью (*Рисунок 8б*) и подтверждаемые по данным космических снимков [Romanov, 1999]. Зимняя аномалия сумм осадков также воспроизводится моделью, однако она слабее летней и уступает существующим для МА оценкам по данным наблюдений [Климат..., 1969; Стулов, 1993; Матвеев, 2007]. Предположительно, это можно объяснить отсутствием учета в модели повышенного содержания аэрозолей в городской атмосфере, что также считается важным фактором влияния города на облачность и осадки [Han et al., 2012; 2014].

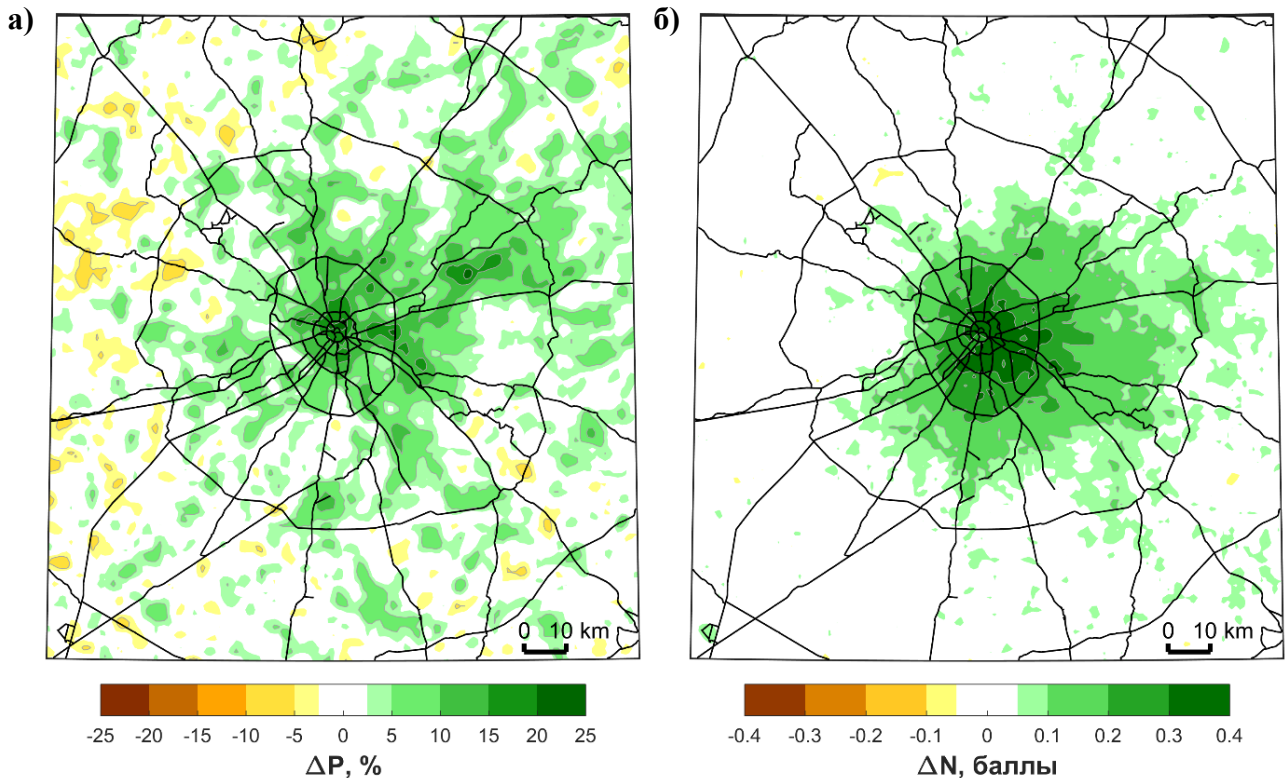


Рисунок 8 – Городские аномалии летней суммы осадков ΔP (в % относительно ее значений по данным расчетов с выключенным влиянием города) (а) и среднего за дневные и вечерние сроки (13–18 UTC/15–21 МСК) балла общей облачности ΔN (б) в среднем за 2007–2016 гг.

Глава 5 посвящена анализу отклика климата МА на реализацию гипотетических сценариев ее развития по данным моделирования. В разделе 5.1 обсуждается актуальность такой задачи и возможные подходы к ее решению. Рассматриваемые сценарии описаны в разделе 5.2. Они разработаны без учета реальных градостроительных планов, однако показательны для изучения отклика климата на различные пути развития города. Два из них предполагают экстенсивное развитие агломерации и удвоение численности ее населения путем расширения города – условно-изотропного (сценарий **URBext2_iso**) или только в пределах «Новой Москвы» (**URBext2_NM**) при условии неизменности застройки внутри МКАД. Условная численность населения задана пропорционально сумме произведений высоты зданий на их площадь, т.е. фактически речь идет об удвоении суммарного антропогенного потока тепла от агломерации. Два других сценария предполагают интенсивное развитие – изменения параметров застройки без увеличения площади города. Сценарий **URBint** базируется на концепции Программы реновации [2017] и предполагает уплотнение застройки и увеличение ее этажности до 10 этажей для всех

модельных ячеек со среднеэтажной застройкой за пределами исторического центра МА. В сценарии **URBint2** для тех же ячеек дополнительно увеличена доля площади урбанизированной территории до 75 % (там, где она меньше этой величины). Условная численность населения в сценарии URBint увеличивается на 70 %, а в сценарии URBint2 – удваивается.

В разделе 5.3 рассмотрен отклик летнего метеорологического режима МА на реализацию перечисленных сценариев (в сравнении с результатами расчетов для современного города). В поле температуры отклик максимален для модельных ячеек, где задана новая застройка или изменения существующей, но распространяется также и на окрестные территории (*Рисунок 9*).

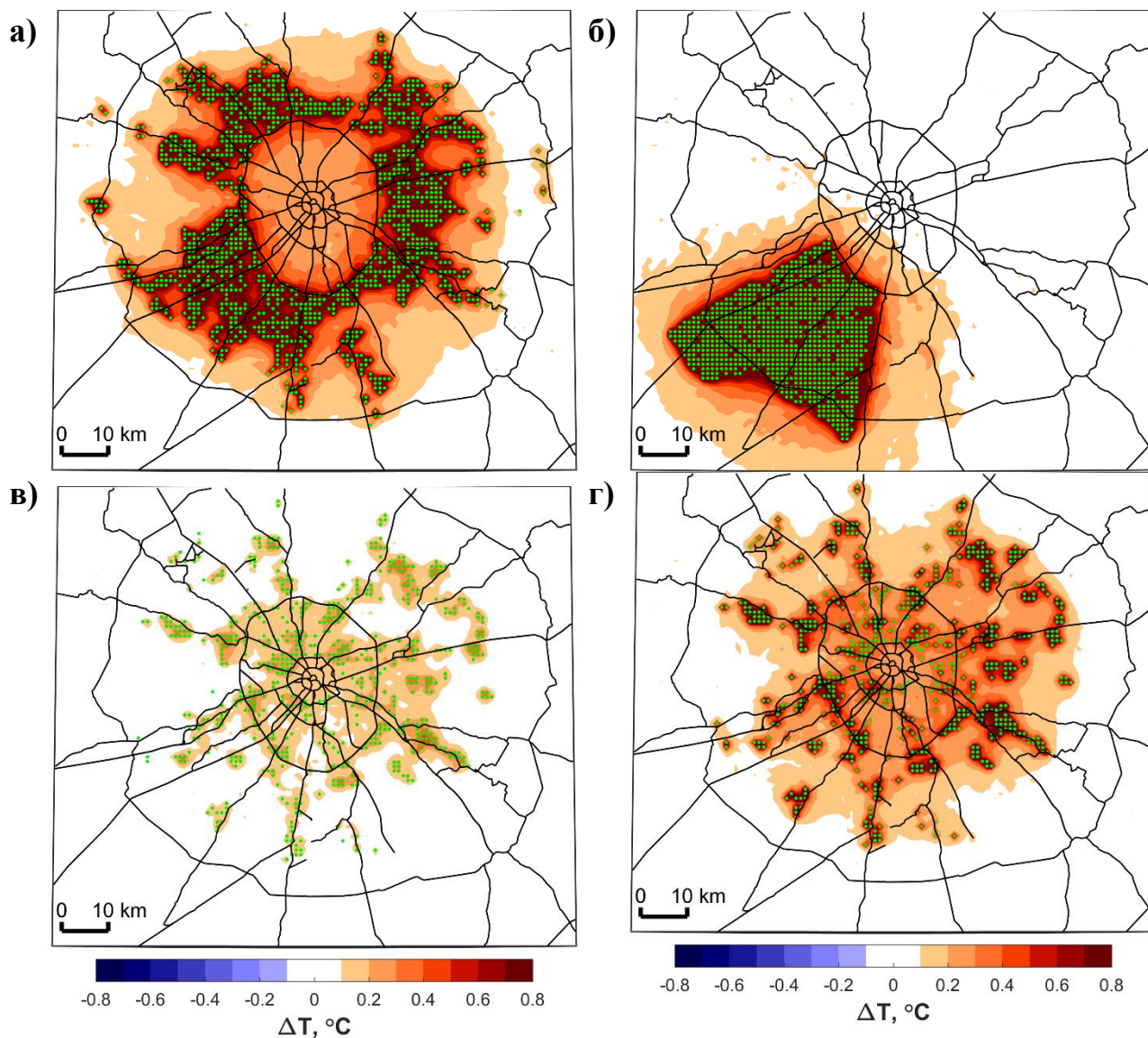


Рисунок 9 – Отклик средней за 2007–2016 гг. летней температуры ΔT на реализацию сценариев URBext2_iso (а), URBext2_NM (б), URBint (в) и URBint2 (г). Зелеными точками отмечены центры ячеек, в которых задавалась новая застройка или изменялась существующая

В результате, застройка новых территорий на периферии города (URBext2_iso) приводит к росту среднесуточной температуры в его центре на ≈ 0.3 °C (**Рисунок 9а**), средней ночной температуры – на ≈ 0.5 °C. Это эквивалентно интенсификации ОТ примерно на 10 %, для остальной части города эффект в процентном отношении больше. Факт того, что удвоение населения усиливает ОТ на значительно меньшую величину, не удивителен и согласуется с эмпирическими данными о нелинейной (логарифмической или степенной с показателем степени $p < 1$) связи между интенсивности ОТ и численностью населения города [Оке, 1973; Мохов, 2009; Zhou et al., 2017].

Застройка «Новой Москвы» (URBext2_NM) оказывает тепляющее влияние на юг и юго-запад «старого» города (**Рисунок 9б**). Отклик на повышение высоты и плотности застройки выражен слабее (**Рисунок 9в**), но значительно усиливается, если дополнить этот сценарий относительно небольшим (по сравнению с экстенсивными сценариями) увеличением площади урбанизированных территорий (**Рисунок 9г**).

Интенсивность локального и удаленного откликов зависит от фоновой температуры и максимальна для наиболее жарких дней. Это показано на примере влияния реализации сценария URBext2_iso на термический режим трех городских метеостанций (**Рисунок 10**). Такая закономерность хорошо согласуется с результатами Гл. 1. В результате, относительно небольшие, в среднем,

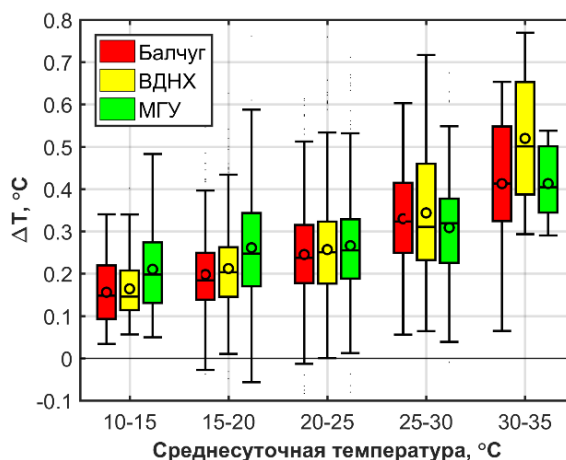


Рисунок 10 – Зависимость отклика среднесуточной температуры (ΔT) на реализацию сценария URBext2_iso от среднесуточной фоновой температуры для трех городских МС

отклики усиливаются в условиях экстремальной жары и оборачиваются значительными изменениями условий термической комфортности. Последнее показано на примере повторяемости «жарких ночей» (когда температура не опускается ниже 20 или 24 °C), часто используемой для индикации теплового стресса, например, в [Nicholls et al., 2008; Macnee, Tokai, 2016].

Также реализация всех сценариев увеличивает летние суммы осадков в Московском регионе (*Рисунок 11*). Ярче всего выражен отклик на компактную застройку «Новой Москвы» – сумма осадков над ней увеличивается на 5–10 % с локальными максимумами до 25 %, что соизмеримо с аномалией, формируемой современным городом. Условно-изотропное расширение города увеличивает осадки на большей площади, локальные максимумы не так велики, но интегральный эффект соизмерим с эффектом от застройки «Новой Москвы». В обоих случаях отклик выражен сильнее с подветренной стороны от застраиваемых территорий. Интенсивное развитие города влияет на режим осадков слабее. Отклик на реализацию сценария UR Bint практически не выражен, а для UR Bint2 он слабее по сравнению с экстенсивными сценариями.

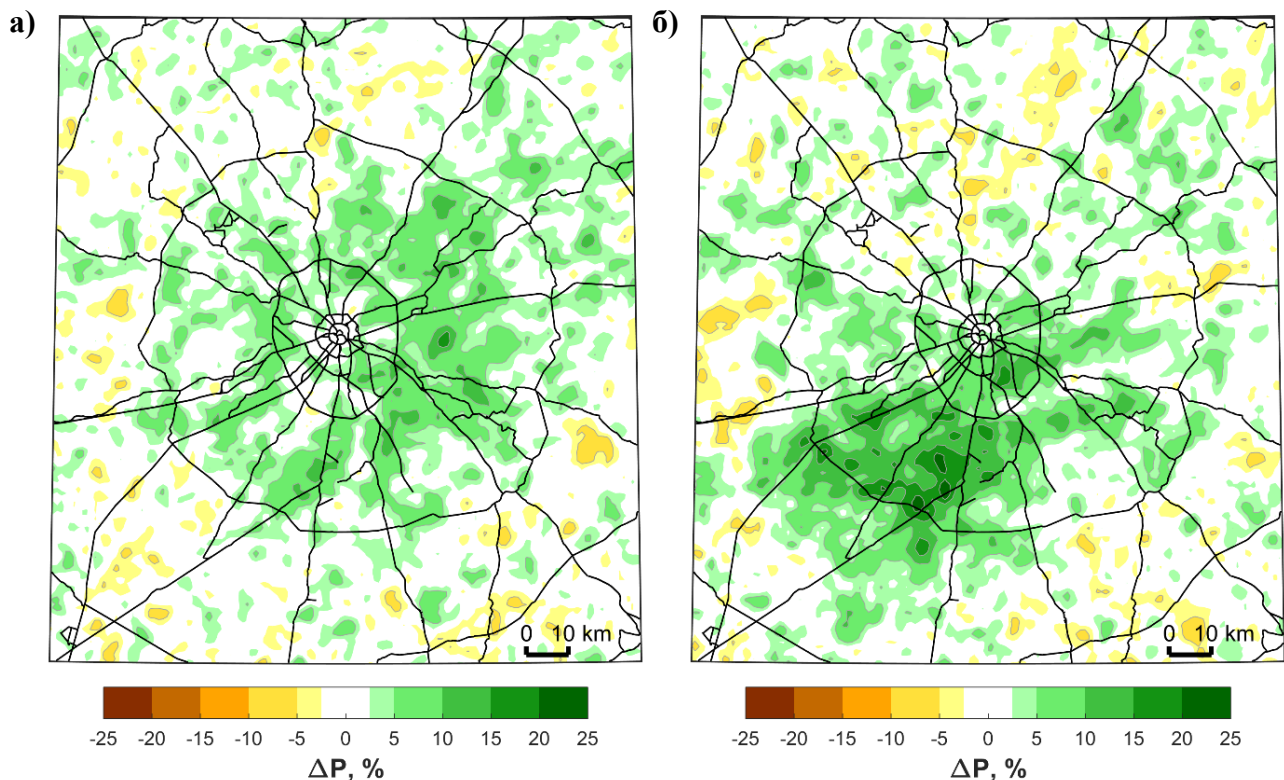


Рисунок 11 – Отклик средней за 2007–2016 гг. летней суммы осадков ΔP на реализацию сценариев UR Bext2_iso (a) и UR Bext2_NM (б)

Таким образом, локальные урбанистические изменения усиливают мезо-аномалии метеорологического режима, формируя его нелокальные отклики. Это хорошо согласуется с результатами предыдущих глав и объясняет механизм интенсификации ОТ, диагностируемой по данным наблюдений. Другой важный вывод – чувствительность городского мезо- и микроклимата (в рамках

выбранной системы моделирования) к изменению морфологических параметров существующей застройки значительно меньше, чем к застройке новых территорий. Наконец, усиление откликов на урбанистические изменения в условиях экстремальной жары показывает важность их учета в задачах анализа и прогноза изменений биометеорологической комфортности климата и, в конечном итоге, в планах долгосрочного развития Москвы.

В заключении сформулированы основные выводы работы:

1. По результатам анализа многолетней динамики интенсивности ОТ Москвы выявлен тренд его интенсификации, выраженный ярче для условий летней жаркой погоды и обусловленный урбанистическими изменениями и крупномасштабными изменениями фонового метеорологического режима.
2. С использованием данных новых сетей мониторинга (АСКЗА ГПБУ «Москэкомониторинг» и АМС ФГБУ «Центральное УГМС») изучена пространственная структура ОТ и ОС. Показано, что они выражены как мезомасштабные аномалии, свойства которых определяются не только влиянием локальных факторов, но и агломерации в целом.
3. Предложена методика детализированного моделирования метеорологического режима МА на многолетних временных масштабах с использованием модели COSMO-CLM, параметризации городской подстилающей поверхности TERRA_URB и оригинальной технологии анализа картографических данных OpenStreetMap. Путем детальной верификации установлено, что модель реалистично воспроизводит метеорологический режим Московского региона, включая ОТ и другие мезоклиматические аномалии МА. При этом показана возможность значительного уменьшения ошибок моделирования для летнего сезона путем определения оптимальной конфигурация модельных настроек.
4. По данным моделирования изучена вертикальная структура урбанистических аномалий температуры, влажности и ветра. Установлено, что они распространяются на сотни метров вверх и на десятки км за пределы города, влияя на стратификацию атмосферы над загородными территориями, а также на мезомасштабные циркуляции за счет эффекта городского бриза.

5. По данным моделирования изучены урбанистические аномалии облачности и осадков. Установлен факт увеличения летних сумм осадков и среднего балла дневной облачности над МА и ее подветренной окраиной, что отражает влияние города на динамические процессы в тропосфере, обусловленное особенностями термодинамических свойств урбанизированной поверхности.
6. На примере гипотетических сценариев развития МА показано, что локальные урбанистические изменения (застройка новых территорий или повышение высоты и плотности существующей застройки) усиливают мезомасштабные аномалии метеорологического режима и обуславливают формирование нелокальных откликов термического режима и летних сумм осадков.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных Положением о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова:

1. Konstantinov P., Varentsov M., Malinina E. *Modeling of thermal comfort conditions inside the urban boundary layer during Moscow's 2010 summer heat wave (case-study)* // Urban Climate. 2014. V. 10. Pt. 3. P. 563–572.
2. Samsonov T., Konstantinov P., Varentsov M. *Object-oriented approach to urban canyon analysis and its applications in meteorological modeling* // Urban Climate. 2015. V. 13. P. 122–139.
3. Кислов А.В., Варенцов М.И., Тарасова Л.Л. *Роль весеннего локального состояния влажности почвы в формировании крупномасштабных засух восточно-европейской равнины 2002 и 2010 гг.* // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 4. С. 464–471.
4. Кислов А.В., Варенцов М.И., Горлач И.А., Алексеева Л.И. *«Остров тепла» Московской агломерации и урбанистическое усиление глобального потепления* // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2017. № 4. С. 12–19.
5. 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 Московского университета. Серия 5. География. 2017. № 6. С. 25-37.
6. Varentsov M., Konstantinov P., Samsonov T. *Mesoscale modelling of the summer climate response of Moscow metropolitan area to urban expansion* // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. V. 96. P. 12009.

7. **Varentsov M.**, Wouters H., Platonov V., Konstantinov P. *Megacity-Induced Mesoclimatic Effects in the Lower Atmosphere: A Modeling Study for Multiple Summers over Moscow, Russia* // Atmosphere. 2018. V. 9. № 2. P. 50

Разделы и главы в коллективных монографиях:

1. *Климат Москвы в условиях глобального потепления: Монография* / Под редакцией А.В. Кислова. – М.: Издательство Московского университета, 2017. – 288 с. **Соискатель является автором и соавтором 4-х глав.**
2. **Варенцов М.И.**, Юшков В.П., Миллер Е.А., Константинов П.И. *Вертикальная структура городского «острова тепла» по данным микроволнового дистанционного зондирования* // Динамика и обменные процессы в атмосфере / под ред. О.Г. Чхетиани, М.Е. Горбунов, С.Н. Куличков, И.А. Репина. Москва: ГЕОС, 2017. С. 113–129.

Тезисы конференций:

Опубликовано 17 работ в сборниках тезисов российских и международных конференций. Их полный список доступен на странице соискателя в ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/profile/mikhail.varentsov/>

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает искреннюю признательность за постановку задач исследования и поддержку на пути к их решению своему научному руководителю, д.г.н., проф. Александру Викторовичу Кислову. Автор глубоко благодарен д.ф.-м.н., проф. Ривину Г.С., к.г.н. Розинкиной И.А., Блинову Д.В. и к.г.н. Платонову В.С. за помощь в освоении и настройке модели COSMO; руководству и сотрудникам ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» и лично к.ф.-м.н. Булыгиной О.Н., руководству и сотрудникам ФГБУ «Центральное УГМС» и лично Терешонку Н.А., руководству и сотрудникам ГПБУ «Мосэкомониторинг» за содействие в получении данных наблюдений; к.г.н. Самсонову Т.Е. за создание базы данных параметров городской среды; руководству и сотрудникам суперкомпьютерного комплекса МГУ за техническую поддержку проведенных вычислений; к.г.н. Константинову П.И., д.ф.-м.н., проф. РАН Репиной И.А., к.г.н. Торопову П.А., к.ф.-м.н. Степаненко В.М., д.г.н., проф. Чубаровой Н.Е., к.г.н. Локощенко М.А., к.ф.-м.н. Юшкову В.П., проф. Эзау И.Н., Трусилевой К. и Воутерсу Х. за ценные консультации и обсуждение результатов работы; к.г.н. Алексеевой С.Ф., д.б.н. Ольчеву А.В., д.г.н. Сурковой Г.В. и к.г.н. Шестаковой А.А. за помощь при подготовке к защите, членам своей семьи за неоценимую помощь и поддержку.