

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА**

Географический факультет

**На правах рукописи
УДК 581.524.42.001.57**

Константинов Павел Игоревич

**Изменение летних условий микроклимата
Московского мегаполиса в условиях глобального
потепления.**

25.00.30 - Метеорология, климатология, агрометеорология

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

Москва - 2011

Работа выполнена на кафедре метеорологии и климатологии географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

Научный руководитель - **Кислов Александр Викторович**
доктор географических наук, профессор

Официальные оппоненты - **Русин Игорь Николаевич**
доктор географических наук, профессор

- **Репина Ирина Анатольевна**
кандидат физико-математических наук

Ведущая организация - **Институт географии РАН (г.Москва)**

Защита состоится 10 ноября 2011 года в 17 часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.68 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, географический факультет, 18-й этаж, ауд. 1801.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке географического факультета Московского университета на 21 этаже

Автореферат разослан 10 октября 2011 года

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук
профессор



Савенко В.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время одной из актуальных проблем, стоящих перед метеорологией и климатологией, является решение задачи прогноза изменений климата. Важную роль при этом играет пространственная детализация результатов, т.е. рассмотрение ситуаций в конкретной физико-географической обстановке. Особенно ярко проблемы, возникающие при решении подобных задач, проявляются при изучении климата города, горного массива или морского побережья – там, где неоднородность подстилающей поверхности особенно высока.

Современные модели общей циркуляции атмосферы воспроизводят метеорологические поля с пространственным разрешением около 50–100. Региональные модели улучшает детализацию до 3–20 км. Однако, этого не достаточно для описания микроклимата, в особенности городского микроклимата, причем дело не только в требовании высоких компьютерных мощностей, необходимых для увеличения пространственного разрешения моделей, – сама гидродинамическая теория обтекания препятствий развита недостаточно полно. Использование же каких-либо параметризаций снижает ценность применения моделей высокого разрешения, создавая априорность результатов моделирования. Кроме того, их просто невозможно проверить, поскольку адекватная наблюдательная сеть, осуществляющая измерения трехмерных полей температуры, влажности воздуха, скорости ветра и др., в городских условиях отсутствует. Иначе говоря, даже с помощью современных региональных моделей (COSMO, WRF) пока еще невозможно непосредственно решать проблемы городской климатологии, в частности, ответить на вопрос, как глобальное потепление климата скажется на изменении температурного режима различных микрорайонов мегаполиса. А при долгосрочном планировании развития города, эта информация играет важную роль.

Цели и задачи работы. Цель работы – оценка изменений микроклимата Московского мегаполиса в условиях глобального потепления в середине и в конце XXI века.

При этом были решены следующие задачи:

- 1) разработана и реализована в программном коде физико-математическая модель, предназначенная для детализированного (микроклиматического) воспроизведения температуры и влажности воздуха в пределах Московского мегаполиса.

- 2) проведено районирование Москвы и ближайшего Подмосковья по различным категориям землепользования территории с размером горизонтальной ячейки 500 на 500 метров.
- 3) проведено тестирование микроклиматической модели на современных климатических данных.
- 4) дан климатический прогноз изменений температуры и влажности в пределах Москвы для середины XXI века в зависимости от плана застройки мегаполиса и сценария глобального потепления.

Научная новизна предлагаемой работы заключается в следующем:

- разработана физико-математическая модель микроклимата мегаполиса (MosClim), позволяющая оценивать термические условия и режим увлажнения городских ландшафтов, а также процессы тепло- и влагообмена на среднесуточном масштабе осреднения;
- осуществлена проверка качества воспроизведения современного климата на данных метеостанций Московского региона;
- на основе численных экспериментов исследована чувствительность микроклиматического режима Московского мегаполиса к глобальным изменениям климата и к сценариям изменений городских ландшафтов;
- продемонстрирована возможность использования разработанной модели для решения задачи оценки возможной реакции термического режима различных районов мегаполиса на характер реорганизации городской территории .

Основные защищаемые положения:

1. Разработанная модель MosClim воспроизводит реалистичную картину пространственной неоднородности значений среднемесячной температуры июля в условиях современного климата, что позволяет считать данную методику удовлетворительной и использовать ее при решении аналогичных задач для других городских агломераций и иных временных срезов.
2. Выполнен климатический прогноз температуры в пределах Москвы для середины и конца XXI века в соответствии с климатическим сценарием ИРСС А2 в зависимости от характера застройки мегаполиса.
3. Продемонстрировано (путем численного моделирования), что при сохранении текущей застройки высокие температуры в Москве в летний период будут нарастать более быстрыми темпами по сравнению с условиями фонового потепления, что повлечет за собой сопутствующие экологические проблемы.

Практическая значимость. Модель MosClim может быть использована для решения различных прикладных задач климатологического и экологического мониторинга мегаполисов, в том числе для решения задачи оптимального городского планирования.

Модель MosClim в сочетании с мезомасштабными прогностическими моделями способна улучшить качество прогноза погоды в различных районах Московского мегаполиса за счет более полной пространственной детализации.

Апробация работы. Разработанная модель MosClim в настоящее время используется при моделировании процессов энерго- массообмена внутри городских ландшафтов в рамках международного проекта MEGAPOLI (Megacities: Emissions, urban, regional and Global Atmospheric POLution and climate effect, and Integrated tools for assessment and mitigation) и национального проекта «Мегаполис». Основные результаты диссертационной работы докладывались на международной конференции Европейского Геофизического Союза (EGU Вена 2010, Вена 2011), Международной конференции по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: ENVIROMIS-2010, Томск, Россия, на Международной Конференции по Городской Климатологии (ICUC-7) – Йокогама, Япония, 2009, в рамках школы молодых ученых и международной конференции «CITES-2009», Красноярск, 2009 г, на Всероссийской конференции «Михаил Арамаисович Петросянц и современные проблемы метеорологии и климатологии», Москва, 2009), а также на Международной конференции по изучению ветровых воздействию на здания (AWAS'08) – Чеджудо, Корея, 2008.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 12 работ (3 статьи в рецензируемых журналах и 9 тезисов докладов).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 102 страницы, 13 рисунков, 7 таблиц. Список использованной литературы содержит 97 наименований.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации. Сформулированы основные цели и задачи диссертационной работы.

В **главе 1** дан краткий исторический обзор этапов развития городской метеорологии и климатологии.

Первым автором, который получил оценки особенностей городского микроклимата, следует считать Л. Ховарда (1772-1864), который в своей работе *The climate of London deduced from meteorological observations* представил данные о климате одного из самых крупных по тем временам мегаполиса. Им был открыт «городской остров тепла». В обсуждаемой работе разница городской и пригородной температур составила на месячном интервале осреднения 1-1,2⁰С.

Вторым городом (после Лондона), которому посчастливилось стать плацдармом для изучения климатических эффектов города, стала шведская Упсала. В начале 50-х XX века У.Сандборг провел ряд исследований с помощью передвижной метеостанции, впервые изучив пространственные характеристики городского острова тепла.

Следующий этап начался в 60-70х годах XX столетия. От описания самого эффекта острова тепла исследователи (Оке, 1968; Terjung, 1976) перешли к описанию физических предпосылок для его возникновения. Основой теории послужило уравнение теплового баланса, в которое был добавлен антропогенный поток тепла. Впервые этот подход был применен в работе (Мугур, 1969). В работе (Оке, 1975) нижняя часть атмосферного пограничного слоя (располагающаяся ниже уровня крыш зданий) была рассмотрена как составная часть Городского Подслоя. Процессы, происходящие в этом подслое, тесно связаны с особенностями городской среды, особенно характеристики радиационного обмена, в основном зависящие от геометрии городского ландшафта – улиц, площадей, стен зданий. Таким образом, основным средством спецификации территории при изучении метеорологического режима города стал так называемый городской каньон – упрощенная геометрическая форма «улицы в профиль», имеющей два борта (стены домов) и днище (сама улица).

В 80-х годах XX века источником новых представлений о природе образования городского острова тепла стали исследования (Оке, 1987), показавшие, что многие особенности функционально определяются безразмерным параметром застройки - отношением высоты зданий к ширине улиц между ними.

В настоящее время все широко используемые в моделировании метеорологических процессов в городском пограничном слое подходы, тем или иным способом используют либо концепцию городского каньона, либо модели, разрешающие процессы обтекания зданий воздушным потоком (Дубинский, 2010; Glazunov, 2003). Каждый из этих подходов имеет как свои преимущества, так и недостатки.

Глава 2 посвящена описанию и критическому обсуждению различных блоков разработанной микроклиматической модели MosClim и ее месту в иерархии современных моделей.

В связи с различным масштабом атмосферных явлений, а также с учетом различий в научных и хозяйственных задачах городской метеорологии, применяются модели разных типов.

Обсуждаемая модель MosClim описывает энергообмен в системе «городской приземный слой воздуха – подстилающая поверхность». Следует отметить назначение модели – она строится для того, чтобы осуществить детализацию данных моделирования более грубого разрешения. Это могут быть модели общей циркуляции атмосферы (МОЦА) или региональные модели.

Перспективным подходом, позволяющим интегрально описать многообразие особенностей городского «деятельного слоя» является, как и было отмечено в главе 1, концепция городского каньона (Оке, 1998; Masson 2002; Kusaka et al., 2004) Для городов, обладающих сложной структурой, городскую среду разумно представлять набором различных типов поверхностей (в том числе и каньонов). Опираясь на территориальными масштабами, существенно превышающими типичный размер реальных улиц, можно считать, что каньоны заполняют такую территорию хаотически. В связи с этим предположением, в работе (Кислов, Константинов, 2007), была реализована упрощенная схема расчета теплового баланса, которая не зависит от пространственной ориентации каньона. Для Москвы, с ее сложным рисунком улиц, этот подход представляется вполне допустимым. Схема такого каньона, с перечислением структурных характеристик, изображена на рис.2

Следует отметить, что в данной работе традиционная схема (Kusaka, 2004) была существенно модифицирована автором.

Понятно, что в свете существования в пределах мегаполисов естественных типов ландшафтов (парки, водные объекты), а также более простых, нежели каньоны, антропогенных ландшафтов (площади, летные поля аэропортов, промзоны), в модели также учитывается энергообмен между подстилающей поверхностью и приземным слоем воздуха в неканьонных типах ячеек.

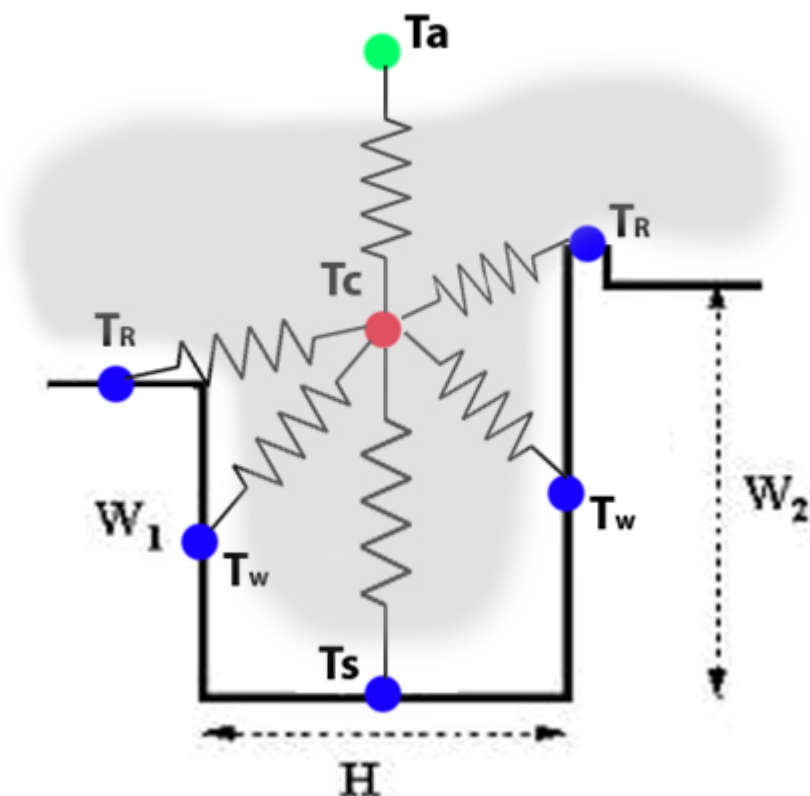


Рис 1. Энергетическая структура городского каньона.
Серым цветом показана квазиоднородная в термическом плане область каньона

Основная вычислительная задача модели состоит в определении температуры на уровне 2 метров в неканьонных ячейках и в слое воздуха между домами в городском каньоне (T_c). Эта величина удобна, в частности, тем, что результаты расчетов можно проверить, сопоставляя (там, где возможно) модельную величину с традиционно измеряемой температурой воздуха на метеорологических станциях. Для расчета T_c внутри городских каньонов требуется определить «вспомогательные» температуры крыш, поверхности (улиц) и стен зданий. Для «неканьонных» типов ячеек схема расчета температуры более проста – здесь во внимание принимается только теплообмен в вертикальном направлении между приземным слоем воздуха и подстилающей поверхностью. Обозначения основных переменных, используемые на рис.1 и далее в тексте, даны в Табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры, переменные и условные обозначения

Параметры и переменные	Обозначение
Температура воздуха на нижнем σ -уровне МОЦА, град. К	T_a
Температура поверхности земли, улицы град. К	T_s
Температура воздуха на уровне 2м, град. К	T_c
Температура поверхности стены дома в каньоне,	T_w

град. К	
Температура поверхности крыши, град. К	T_R
Поток явного тепла у поверхности, Вт/м ²	H_s
Поток скрытого тепла у поверхности, Вт/м ²	LE_s
Поток суммарной солнечной радиации на поверхность улиц, парков и др., Вт/м ²	Q_s
Поток суммарной солнечной радиации на вертикальную поверхность стен, Вт/м ²	Q_w
Поток суммарной солнечной радиации на поверхность крыш, Вт/м ²	Q_r
Поток встречного излучения атмосферы, Вт/м ²	\tilde{E}
Антропогенный поток тепла, Вт/м ²	Q
Модуль скорости ветра, м/с	$ u_a $
Плотность воздуха, кг/м ³	ρ
Коэффициент сопротивления (разный для разных частей приземного слоя)	C
Постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м ² •К ⁴).	σ
Удельная теплота парообразования воды, Дж/кг	L
Количество секунд в сутках, сек	τ
Удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, Дж/(кг К)	c_p
Высота зданий, м	h
Ширина улиц, м	W
Ширина зданий, м	χ
Альbedo улиц, стен, крыш	$\alpha_s, \alpha_w, \alpha_R$
Теплоемкость улиц, стен, крыш, Дж/м ³ К	C_s, C_w, C_R
Параметр шероховатости, м	Z_0
Безразмерный параметр ($\eta = \frac{h}{W + \chi}$)	η
Безразмерный параметр ($\xi = \frac{\chi}{\chi + W}$)	ξ

Алгоритм расчета температуры воздуха в городском каньоне выглядит следующим образом. Для описания температуры поверхности («улицы») используем уравнение теплового баланса, которое сразу представим разностной схемой по времени:

$$T_s^{k+1} = T_s^k + \frac{\tau}{C_s} \{Q_s(1 - \alpha_s) + (\tilde{E} - \sigma T_s^4) - H_s - LE_s\}^{k+1} \quad (1)$$

Потоки явного и скрытого тепла будем описывать выражениями:

$$H_s = -c_p \rho |u_a| C (T_s - T_A) = h_s (T_s - T_A) \quad (2)$$

$$LE_s = -L \rho |u_a| C (q_s - q_A) \approx e_s (T_s - T_A) \quad (3)$$

Последнее выражение основано на предположении неизменности профиля относительной влажности воздуха. Коэффициент сопротивления, как известно, сложным образом зависит от свойств поверхности и стратификации атмосферы. В настоящей работе при расчетах принималось предположение о том, что на среднесуточном масштабе осреднения стратификация атмосферы нейтральна. Именно для того, чтобы использовать данное предположение фактически и выбирался суточный масштаб осреднения. Однако это представляется разумным упрощением, поскольку детальное описание пограничного городского слоя атмосферы в условиях разной стратификации представляет собой крайне сложную проблему (Зилитинкевич 2010; Курбацкий 2005), которую все равно невозможно реализовать для практических задач без серьезных упрощений.

В формуле (1) разложим в ряд Тейлора функцию (T_s^4) и запишем получившееся выражение в специальной форме, имея в виду, что температуры T_s, T_c, T_a близки между собой: $T_s^4 \approx T_a^4 + 4T_a^3(T_s - T_c)$. В результате, из (1) получим выражение для определения изменения во времени температуры поверхности улицы на $k+1$ шаге по времени:

$$T_s^{k+1} = T_c^{k+1} + \frac{T_s^k - T_c^{k+1} + \frac{\tau}{C_s} [Q_s(1 - \alpha_s) + \tilde{E} - \sigma T_a^4]}{1 + \frac{\tau}{C_s} [r + h_s + e_s]}, \quad (4)$$

где $r = 4\sigma T_a^3$. Предполагается, что $Q_s, \tilde{E}, T_a, |\vec{u}|$ доступны по данным МОЦА.

Аналогичным образом получается выражение для температуры поверхности крыш (в котором не учитываются потери тепла на испарение) и используются свои параметры (другое альbedo и проч.). Такого же типа получается выражение для температуры стен в городском каньоне, однако здесь, для упрощения, будем пренебрегать всеми видами теплообмена, кроме осуществляемого потоками явного тепла. Введем обозначения:

$$\frac{1}{1 + \frac{\tau}{C_R} [h_R + r]} \equiv l, \quad \frac{1}{1 + \frac{\tau}{C_s} [h_s + e_s + r]} \equiv p, \quad \frac{1}{1 + \frac{\tau}{C_w} [h_w]} \equiv n \quad (5)$$

$$B_w \equiv nT_w^k + n \frac{\tau}{C_w} Q_w(1 - \alpha_w) \quad (6)$$

$$B_s = pT_s^k + p \frac{\tau}{C_s} [Q_s(1 - \alpha_s) + \tilde{E} - \sigma T_a^4] \quad (7)$$

$$B_R = lT_R^k + l \frac{\tau}{C_R} [Q_R(1 - \alpha_R) + \tilde{E} - \sigma T_a^4] \quad (8)$$

Запишем уравнение теплового баланса слоя «воздуха между домами». Естественно считать, что изменения его теплосодержания малы по сравнению с аналогичными величинами для стен, крыш и уличного покрытия. Также логично считать, что теплообмен осуществляется путем турбулентного обмена. Тогда, учитывая морфометрические характеристики каньона, для любого момента времени получим:

$$(1-\xi)(h_s + e_s)(T_s - T_c) + 2\eta h_w(T_w - T_c) + Q + \xi h_R(T_R - T_c) - (1-\xi)(h_a + e_a)(T_c - T_a) = 0 \quad (9)$$

И, соответственно,

$$T_c = \frac{(1-\xi)(h_s + e_s)T_s + 2\eta h_w T_w + \xi h_R T_R + (1-\xi)(h_a + e_a) + Q}{(1-\xi)(h_s + e_s) + 2\eta h_w + \xi h_R + (1-\xi)(h_a + e_a)} \quad (10)$$

Обозначим знаменатель буквой ψ , а в числителе множители перед значениями температуры, как a, b, c соответственно. Два последних слагаемых обозначим, как B_c .

Используя введенные обозначения, от уравнений (4), (10) и др., приходим к системе из 4-х уравнений с четырьмя неизвестными:

$$\begin{cases} \psi T_c - aT_s - bT_w - cT_R = B_c \\ (p-1)T_c + T_s = B_s \\ (n-1)T_c + T_w = B_w \\ (l-1)T_c + T_R = B_R \end{cases}, \quad (11)$$

которая решается стандартным методом.

В случаях, когда ячейка модели не относится к каньонному типу, схема заметно упрощается:

$$T_c = \frac{(h_a + e_a)T_a + (h_s + e_s)B_s + Q}{(h_s + e_s + h_a + e_a) + (h_s + e_s)(p-1)} \quad (12)$$

Для расчетов термического режима необходимо иметь алгоритм для вычисления коэффициента сопротивления и модуля скорости ветра, входящего в формулы для потоков тепла. Эти величины могут быть рассчитаны на основе теории Монино-Обухова с использованием информации на ближайшем к поверхности сигма-уровне глобальной или региональной модели. В диссертационной работе для решения этой задачи было использовано приближение нейтральной стратификации с задаваемыми параметром шероховатости и слоем вытеснения.

Вышеприведенный алгоритм «термического блока модели» позволяет рассчитать температуру в каждой из «микроклиматических» ячеек покрывающих территорию мегаполиса.

Важную роль в формировании поля температуры играет адвекция и диффузия тепла. Однако решить такую задачу путем непосредственного моделирования движений воздуха в условиях сложной городской застройки практически невозможно. Поэтому был избран наиболее простой путь. Ветровой режим внутри города считается хаотичным – это, видимо, близкое к реальности предположение, по крайней мере, при используемом дроблении

территории нет оснований рассматривать движение воздуха «вдоль» и «поперек» улиц. Для описания теплообмена можно в этом случае использовать вместо адвективного переноса модель плоской диффузии, с заданными на границах области постоянными температурами (условие Дирихле), которые принимаются равными значениям, полученными в глобальной или региональной модели. В рамках этого способа может быть описан и адвективный перенос путем задания различных значений температуры на границах. Эти вычисления были реализованы в виде применения к полученному полю температуры фильтра, соответствующего данной разностной схеме.

Кроме температуры, в рамках данного подхода можно осуществить детализацию полей атмосферного давления и влажности воздуха. Первая проблема решается просто, учитывая непрерывный характер изменения давления. Расчет характеристик влажности ставит проблемы иного рода по сравнению с теми, которые возникают при решении задачи расчета поля температуры. Дело в том, что методика детализации не может строиться на уравнении водного баланса, поскольку его компоненты в условиях городской среды определить очень сложно. Причем мало того, что недостаточно разработаны способы параметризации таких процессов, как сток воды, движение вод в грунтах и системе канализации города), но в распределении воды в городе активно вмешивается «человеческий фактор», то есть происходит поливание улиц и парков, уборка снега, активные воздействия на атмосферные осадки, и др. Эти процессы не поддаются описанию с точки зрения физики, а должны задаваться в виде внешнего фактора.

Учитывая отмеченные сложности, в данной работе реализован другой подход. Основная идея заключается в том, чтобы использовать характеристики влажности, рассчитываемые глобальной или региональной моделью, а затем «детализировать» эту величину на сетку микромоделей, учитывая рассчитанное в рамках MosClim микрораспределение температуры.

Таким образом, обладая информацией об удельной влажности и температуре в каждой ячейке MosClim, возможно рассчитать на сетке MosClim детализированное распределение относительной влажности воздуха.

Глава 3 посвящена постановке задачи климатического моделирования в мегаполисах, описанию модельного комплекса МОЦА + модель MosClim и верификации результатов моделирования на современных данных.

Иерархически структура модельного комплекса выглядит следующим образом. В рамках модели общей циркуляции атмосферы (будем для определенности говорить о МОЦА) воспроизводится климатический режим. Данные, принадлежащие соответствующему узлу сетки, поступают в «микроклиматическую модель», в которой происходит модификация сигнала МОЦА, то есть пересчет для ячеек мелкой сетки. Эта методика была неоднократно использована ранее при осуществлении процедуры детализации для различных задач (Кислов и др., 2004; Кислов и др., 2006; Кислов,

Константинов, 2007). В настоящей работе размер «микроклиматических» ячеек составляет $500 \times 500 \text{ м}^2$. Временной масштаб выходных данных – 1 сутки. Использование среднесуточных значений – с одной стороны, обеспечивает потребителя достаточно важной информацией, а с другой - позволяет избежать сложного описания суточной динамики городского пограничного слоя (см. Гл.2).

Как было показано в предыдущем разделе, для расчета полей температуры в пределах Московского региона необходимы данные о температуре, влажности воздуха, скорости ветра и потоке суммарной солнечной радиации на внешнем уровне микроклиматической модели. Он, согласно принятой концепции, совпадает с нижним сигма-уровнем МОЦА.

Численные эксперименты были направлены на воспроизведение средних климатических условий июля для московского мегаполиса. Воспроизведение зимних условий не рассматривается, поскольку представляет собой не только метеорологическую задачу, так как описание снежного покрова в городе может быть корректным только при учете уборки снега.

Требуемые для микроклиматической модели входные данные были получены с помощью глобальной модели T42L15, представляющей собой модифицированную для проведения климатических экспериментов версию оперативной спектральной глобальной модели Гидрометцентра России. Численные эксперименты были организованы, так, чтобы получить ансамбль реализаций. Это осуществлялось следующим образом. Каждый эксперимент, с несколько различающимися начальными условиями, стартовал 15 апреля (от набора данных за конкретный год) и интегрирование продолжалось до 1 августа. Для анализа оставлялись только данные за июль, то есть первые 76 дней каждого эксперимента, в течение которых осуществлялась адаптация модели к граничным условиям, отбрасывались. Дата начала численного эксперимента была выбрана по двум причинам. Во-первых, 2.5-месячное интегрирование позволяет модели выйти на режим зависимости от текущих граничных условий летнего периода. Во вторых, к середине апреля сезонный снежный покров уже практически сходит с большей части северного полушария, таким образом исчезает важный источник ошибок моделирования. Всего проведено 30 подобных экспериментов. Статистический анализ, основанный на использовании критерия медианы (Поллард, 1982), позволил установить, что все численные выборки могут считаться принадлежащими к одной статистической совокупности. Это позволяет использовать результаты осреднения по ансамблю для характеристики модельного климата. Сопоставление осредненных таким образом модельных температур (для модельной области, включающей московский мегаполис) с климатическими данными (данными наблюдений на станциях, окружающих Москву) для июля показало прекрасное совпадение результатов (различия как среднемесячных значений, так и стандартного отклонения не превысили 0.6°C).

Детализация данных МОЦА T42L15 была осуществлена для области размером $30 \times 30 \text{ км}^2$, включающей московский мегаполис и районы ближнего Подмосковья. Данная территория была разделена на 3600 элементарных

«микроклиматических» ячеек, которые были отнесены к определенному типу с заданными свойствами. Для каждой был осуществлен переход от единой для всего региона температуры (за каждый день модельного июля в 30 реализациях – всего 930 дней) МОЦА Т42L15 к значению T_c .

Главный результат проведенных экспериментов в том, что воспроизводимый термический режим летних условий Москвы близок к реальному. Это подтверждается сравнением модельных величин с данными измерений на московских метеостанциях (рис. 2).

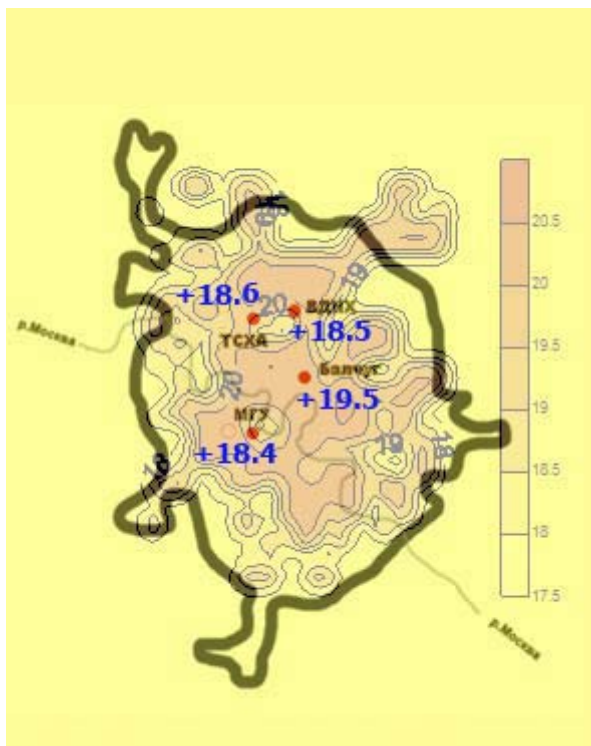


Рис 2. Результаты моделирования современного климата Москвы и данные измерений на 4-х столичных метеостанциях.

По итогам сравнения данных моделирования со стационарными данными (рис.2), можно отметить, что расхождение на станциях МГУ, ТСХА и ВДНХ не превышает 0.5 градуса, что свидетельствует, что методология моделирования и основной набор характеристик подстилающей поверхности выбраны правильно (табл.2).

Разумеется, в ходе работы проводился выбор параметров так, чтобы достичь лучшего совпадения с данными наблюдательной сети. Однако это не было формальной подгонкой свободных параметров для обеспечения минимизации ошибок, подбор осуществлялся для величин, имеющих ясный физический смысл, и проводился лишь в допустимых пределах, определяемых погрешностями информации.

Модель реалистично воспроизводит контраст (2–3°C) между полностью заасфальтированным центром города и ближайшим Подмосковьем. Отметим, что по смыслу задачи это - различия среднеклиматических значений, а в

отдельных ситуациях аномалии могут быть выражены резче (Кислов, Константинов, 2007). Среднесуточные температурные градиенты между различными внутригородскими районами не превышают 1–2.5°, что соответствует данным по другим городам – к примеру, Ванкуверу (Toros et al, 1997; Oke, 1978).

Отлично проявились очаги тепла в центре Москвы, подтвержденные реальными наблюдениями (на метеостанции Балчуг). В данном случае модель немного завывает данные (0.5°C), что может быть связано с тем, что тип подстилающей поверхности на метеостанции Балчуг отличается от преобладающего в ячейке моделирования, и общий фон температуры в районе несколько выше, чем наблюдаемый на станции.

Таблица 2. Сравнение среднемесячной июльской температуры воздуха и СКО (среднего квадратического отклонения) на метеорологических станциях Москвы и смоделированных значений для районов метеостанций

Станция	Средняя июльская температура воздуха по климатическим данным (1961-1990гг), °C ± СКО	Средняя июльская температура воздуха по данным моделирования, °C ±СКО
ВДНХ	18.5 ±2.7	18.8 ±2.1
Балчуг	19.5 ±2.7	20.1 ±2.2
МГУ	18.4 ±2.9	18.5 ±2.1
ТСХА	18.6± 2.0	19.0 ±2.1

В **главе 4** описывается натурный эксперимент, направленный на оценку способности модели MosClim воспроизводить распределение температуры в условиях конкретного городского каньона. При этом модель усваивала данные прогностической оперативной мезомасштабной модели COSMO-RU (Гидрометцентр России), работавшей с разрешением 2.8x2.8 км². Для этой цели был выбран городской каньон в 100 метрах от Метеорологической Обсерватории МГУ (рис.3), в котором 26-27 апреля 2011 года были проведены непрерывные измерения термических и влажностных величин приземного слоя воздуха, в том числе и турбулентный поток тепла, внутри городской застройки.



Рис 3. Городской каньон для проведения натурного эксперимента

Сравнение показало, что между термическим режимом каньона и близлежащим участком естественной поверхности (метеоплощадка Обсерватории МГУ) даже в случае сильного горизонтального теплообмена существует заметное различие, достигающее $0.5-0.7^{\circ}\text{C}$. Таким образом, даже в небольшом по площади каньоне, расположенном внутри «зеленого района», на среднесуточном масштабе осреднения видны области повышенной температуры, которые оказалось возможным воспроизвести путем моделирования. Это является определенным свидетельством оправданности использования обсуждаемой в работе технологии.

В **главе 5** описывается методика климатического прогноза температуры воздуха в Московском мегаполисе в середине и конце XXI века, и обсуждаются результаты.

Поскольку эксперименты по моделированию современного климата показали хорошее качество воспроизведения пространственного распределения температуры внутри Московского региона, стало возможным применить развитую технологию моделирования для оценки изменений микроклимата Москвы в условиях нарастающего глобального потепления.

Для определенности был выбран климатический сценарий A2, как один из наиболее «жестких» сценариев, обеспечивающий этим преимущество в интерпретации результатов моделирования с точки зрения большей статистической значимости аномалий.

Модельный климат XX века (1961-1989 гг.) оценивался по результатам эксперимента 20C3M (20th Century Climate in Coupled Models). Значения будущего состояния климата взяты по данным CMIP3 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 3) для интервала 2046-2065 гг, которые условно

отнесены к 2050 году и 2081-2100 года, отнесенные, соответственно, к 2100 году. Проблема осложнялась тем, что в выходном наборе данных СМIP3 не полно представлены данные, необходимые для работы модели MosClim. Поэтому пришлось поступить следующим образом. Данные о температуре поверхности океана, полученные по результатам моделирования СМIP3 для середины и конца 21 века, были использованы в стартовом наборе для реализации экспериментов с МОЦА Т42L15 (аналогично тому, как это описано в Гл.3). Вместе с измененными парниковыми свойствами атмосферы (из-за увеличения эквивалентного содержания CO_2), это позволило получить требуемые поля метеорологических элементов, характеризующие условия потепления климата. Получившиеся с помощью Т42L15 результаты были сопоставлены с данными моделей СМIP3 и показали хорошее соответствие. Затем эти данные были пространственно детализированы согласно описанной выше методике.

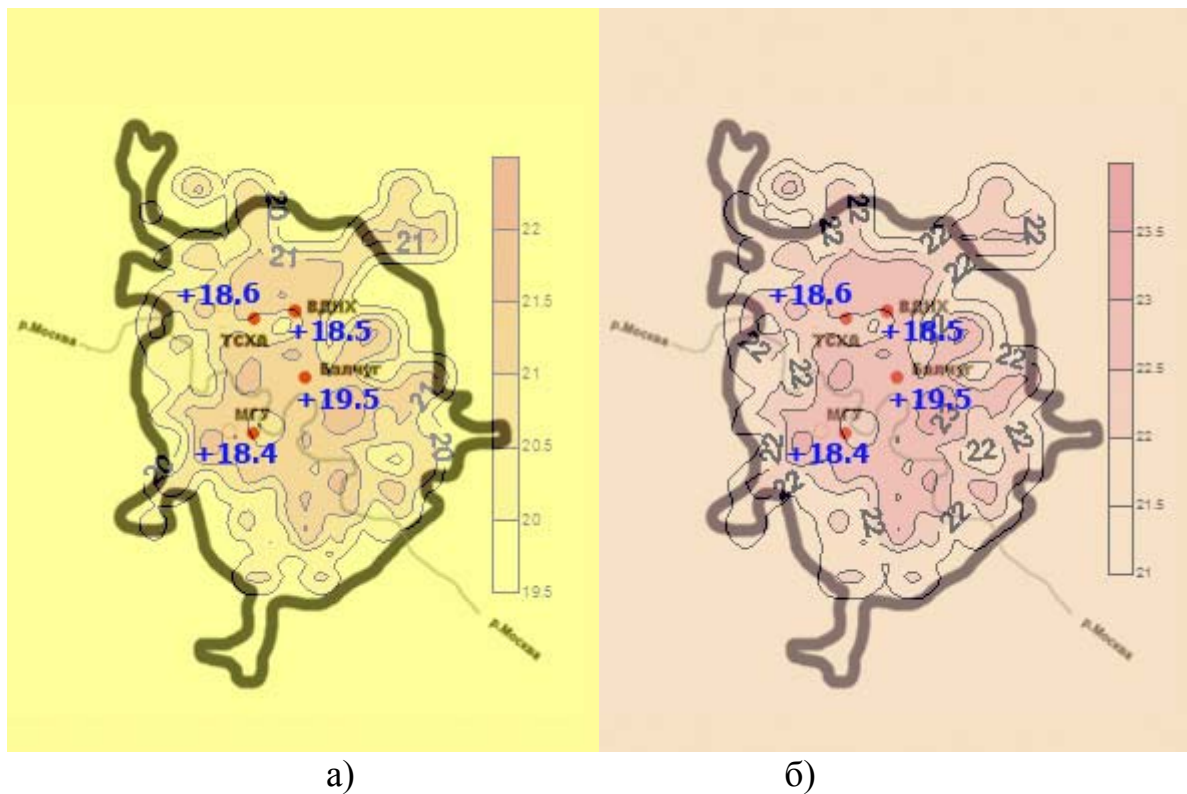


Рис 4 Результаты моделирования климата Москвы для середины (а) и конца (б) XXI века и сравнение с данными измерений на 4х столичных метеостанциях (современный климат)

Из рис.4 видно, что для 2050 года взаимное расположение очагов тепла и холода осталось неизменным – что следует из гипотезы неизменности застройки. По-прежнему самыми теплыми являются центральные области, а локальные очаги прохлады в пределах МКАД связаны с обширными лесопарковыми зонами – Лосиным Островом, парком ВДНХ и Тимирязевской

сельхозакадемии и Воробьевыми горами. Именно в трех последних зонах и расположены три из четырех московских метеорологических станций.

Осредненный прирост температуры (по зонам расположения станций) к 2050 году составит 1.65°C . Такой результат неплохо соотносится с более ранними исследованиями (Шерстюков, 2005), в которых экстраполяция тренда потепления климата в Московском регионе в июле (учитывалась не только Москва, но и ближайшее Подмосковье) приводит к установлению в середине XXI века среднемесячной температуры $+20^{\circ}\text{C}$ (по сравнению с современным значением 18.8°C - см. Табл.2). Изменение температурного режима проявляется также в том, что при потеплении увеличивается вероятность положительных аномалий.

Как видно из рис.5, вероятность их возникновения неодинакова для центра города и лесопарковых зон. К примеру, температура $+25^{\circ}\text{C}$ почти в три раза более вероятна в центре города, нежели в национальном парке Лосиный Остров (северо-восток Москвы).

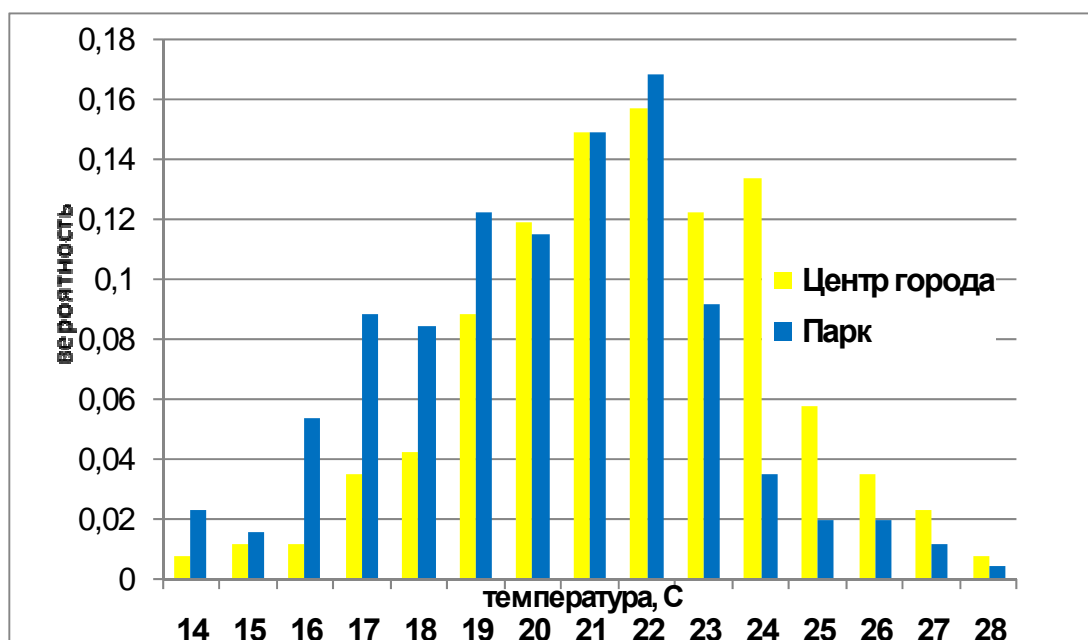


Рис 5. Распределение частот повторяемости значений средних июльских температур для середины XXI века.

К концу XXI века, наименьшие изменения (так же как и в предыдущем примере) ожидаются в районе Балчуга, где температура вырастет на 2.6°C , наибольшие – в районе МГУ, где потеплеет на 3.6°C . Тем не менее, даже в конце XXI века средние значения пока еще остаются в пределах естественной изменчивости – известны годы, когда в столице среднесуточная температура июля месяца превышала $+23^{\circ}\text{C}$, и составляла $+23.4^{\circ}\text{C}$ в 2002 году и 23.3°C в 1938 соответственно. В экстремально-жарком 2010 году было зафиксировано 26.8°C .

Далее в этой главе приведены результаты расчета температуры в Москве в середине XXI века в зависимости от различных сценариев застройки мегаполиса.

Согласно проведенному осреднению температуры по округам Москвы, в настоящее время самым жарким является Центральный административный округ, в котором доля зеленых насаждений сведена к минимуму, а общий процент застройки максимален (рис.6а).

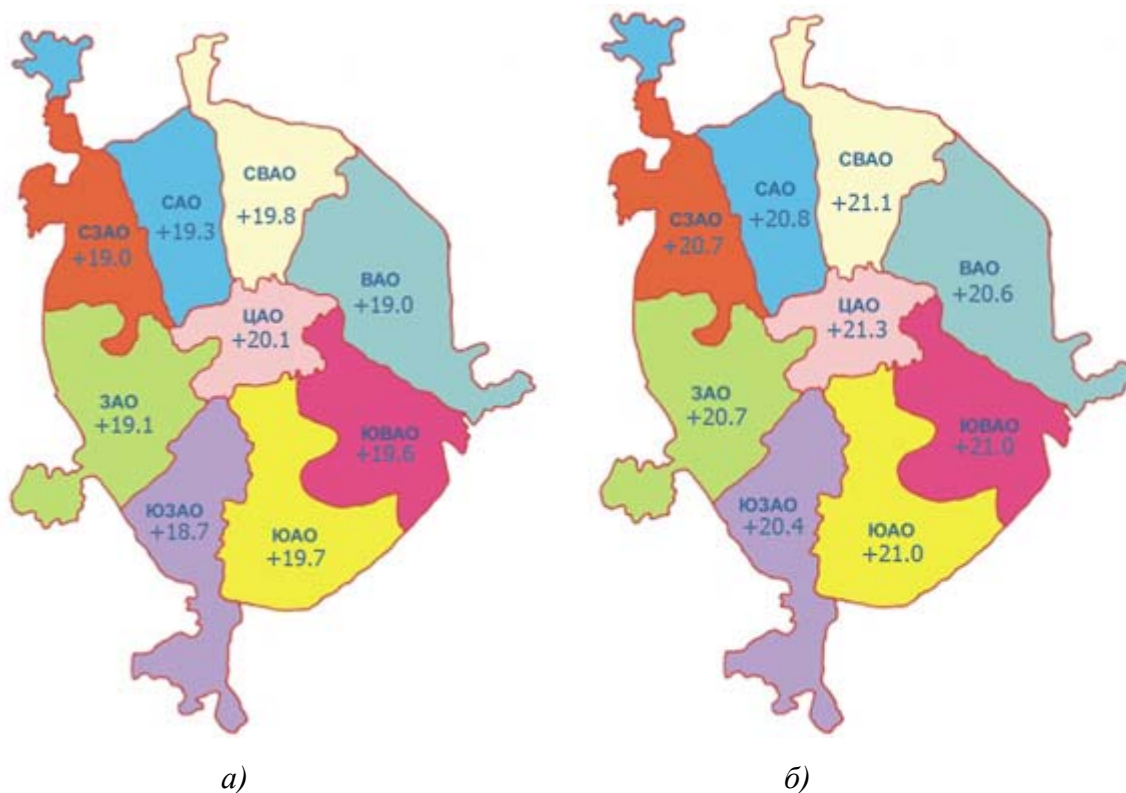


Рис 6. Средняя температура воздуха в различных округах г.Москвы (а - современный климат, б -2050 год)

Наиболее прохладным является Юго-Западный округ, который известен большим процентом лесных массивов (Битцевский лесопарк). Не лишним будет вспомнить, что и экологическая ситуация здесь одна из самых благоприятных на территории столицы.

Целью эксперимента было определить, как к середине 21 века средняя температура июля будет меняться в зависимости от различных сценариев изменения застройки мегаполиса и от глобальных изменений климата. Были рассмотрены три сценария развития событий:

1. Сценарий неизменности типа застройки.
2. Сценарий уменьшения площади зеленого пояса столицы на 50%
3. Сценарий уменьшения застроенных площадей столицы на 50%

В рамках первого сценария при проведении расчетов проектные изменения в городской планировке Москвы не принимались во внимание. Поэтому пространственное распределение очагов тепла осталось прежним (рис 6б).

По-прежнему наблюдаются очаги тепла в центре, на севере, юге и юго-востоке Москвы, а самым прохладным округом столицы остается юго-западный. Однако, средний фон температуры заметно вырос – на 1.2 -1.8 градуса как в «холодных», так и более теплых районах. Это приводит, в частности, к тому, что вероятность возникновения экстремальных значений еще более повышается. Однако средние значения пока еще остаются в пределах изменчивости. Сопоставляя модельные аномалии с данными о состоянии московского климата за последние 100 лет можно отметить, что прогнозируемые на середину XXI века температуры июля соответствуют тем, которые случались один раз в 7 лет.

В рамках второго эксперимента, была принята гипотеза, что к 2050 году половина площади, занимаемой сейчас зелеными насаждениями, будет равномерно отдана под застройку.

В этом случае, как мы видим, температура воздуха практически во всех округах будет гораздо меньше отличаться друг от друга. Амплитуда средней температуры по округам не будет превышать 0.5⁰С. Самым жарким станет останется Центральный округ столицы, а самыми «свежими» - Юго-западный и Северо-западный. Причем, в отдельных районах нормой станет по меркам современного климата довольно жаркий июль – температура, к примеру, на юго-западе достигнет отметки +20.8⁰С. То есть та температура июля, которая сейчас достигается в среднем раз в 10 лет (Исаев, 2005), станет нормой при данном типе застройки уже через 40 лет.

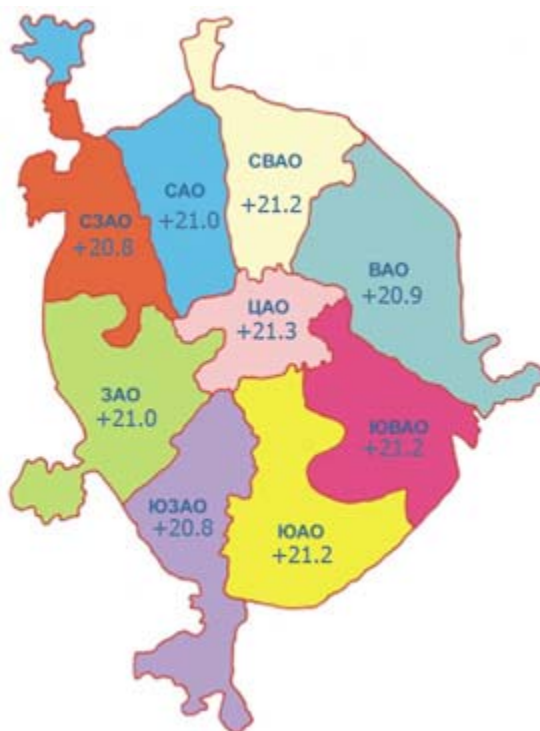


Рис. 7. Средняя температура июля для каждого из Московских округов по данным моделирования для середины XXI века при уменьшении площади зеленых насаждений вдвое.

В рамках последнего эксперимента, ради контраста, была принята гипотеза, что к 2050 году половина площади, занимаемой сейчас антропогенно измененными ландшафтами в каждой микроячейке, будет отдана под лесопарковую зону.

Из рис. 8 видно, что подобное радикальное озеленение, возможное, разумеется, только гипотетически, приведет к серьезному улучшению столичного климата. По сравнению со сценарием, который предусматривал сохранение текущей застройки, в отдельных округах температура понизится на 0.3-0.6⁰С, что серьезно уменьшит вероятность возникновения экстремально жарких условий на фоне потепления климата. Этот факт наглядно демонстрирует роль зеленых насаждений в климатической карте города только на примере теплового эффекта, не говоря о таких параметрах, как содержание кислорода в воздухе, относительной влажности и прочих.

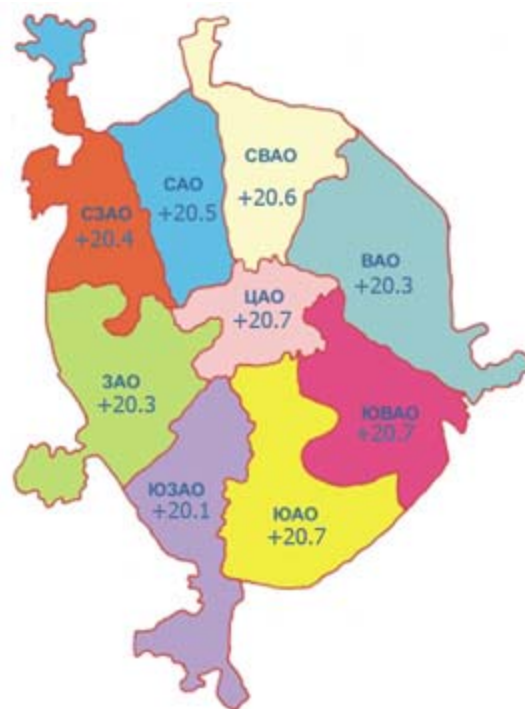


Рис 8. Средняя температура воздуха в различных округах г.Москвы при сценарии увеличения зеленого пояса к 2050 году.

В заключении перечислены основные полученные результаты и сформулированы выводы по диссертационной работе:

- Разработана и реализована в программном коде математическая модель (MosClim), предназначенная для детализированного (горизонтальный размер ячейки сетки 500x500 метров) воспроизведения температуры воздуха в пределах Московского мегаполиса.
- По результатам сравнения смоделированной с помощью вычислительного комплекса «МОЦА - MosClim» средней температуры июля в Москве и

данных современного климата было показано, что комплекс воспроизводит реалистичную картину пространственной неоднородности термического режима мегаполиса. Это позволяет считать данную методику удовлетворительной и использовать ее при решении аналогичных задач для других городских агломераций и иных временных срезов.

- Дан климатический прогноз средней температуры июля в пределах Москвы для середины и конца XXI века в соответствии с сценарием IPCC A2. Температура вырастет в различных районах города к середине XXI века на 1.2-2.0°C, к 2100 году это значение достигнет 2.5-3.6 °C.
- Путем численного моделирования показано, как изменение характера застройки может влиять на коррекцию средней температуры районов мегаполиса. Продемонстрировано, что при сохранении текущей застройки к середине XXI века климат российской столицы в летний период будет заметно более жарким (на 0.3-0.6°C), нежели в случае проведения озеленительных преобразований что повлечет за собой сопутствующие экологические проблемы.

Список работ по теме диссертации

Основные научные результаты опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, **определенных ВАК**:

1. Кислов А.В. **Константинов П.И.** Детализированное пространственное моделирование температуры Московского мегаполиса. // Метеорология и Гидрология, 2011, №5, с.25-32.
2. **Константинов П.И.** Изменение микроклимата Москвы в первой половине XXI века при глобальных изменениях климата и различных сценариях застройки мегаполиса. // Проблемы региональной экологии - №2, 2010, с. 111-114.
3. Кислов А.В. **Константинов П.И.** Моделирование летнего температурного режима Московского региона. //Вестник Московского университета, серия 5, «География», №1, 2007, с.70-74

Содержание диссертации также отражено в следующих публикациях:

4. **Konstantinov P.I.** Kislov A.V. Simulation of temperature regime of the Moscow region in XXI century // Abstracts of General Assembly of European Geophysical Union, 2010
5. **Константинов П.И.** Изменение микроклимата Москвы в первой половине XXI века при различных сценариях застройки мегаполиса // Тезисы Международной конференции по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: ENVIROMIS-2010, 5-11 июля 2010 года, Томск, Россия

6. **Konstantinov P.I.** Kislov A.V. Simulation of climate of the Moscow Region in XXI century with simple urban canopy model // Proceedings of the Seventh International Conference on Urban Climate (ICUC-7), 29 June- 3 July 2009
7. **Konstantinov P.I.** Kislov A.V. Simulation of temperature regime of the Moscow region in XXI century // The proceedings of 4th international Conference on Advances in Wind and Structures (AWAS'08) 29-31 May 2008, Jeju, Korea pp 642-654
8. **Константинов П.И.** Моделирование температурного режима Московского мегаполиса в XXI веке с помощью климатической модели города. // Тезисы школы молодых ученых и международной конференции «CITES-2009», Красноярск, 5 – 15 июля 2009 г.
9. Кислов А.В. **Константинов П.И.** Детализированное пространственное моделирование температуры Московского мегаполиса // Тезисы Всероссийской конференции «Михаил Арамаисович Петросянец и современные проблемы метеорологии и климатологии», Москва, МГУ, 2009 с.37
10. **Konstantinov P.I.** Simulation of temperature regime of the Moscow region in XXI century // Abstracts of 5th Japanese-German Meeting on Urban Climatology, Meteorological Institute, Albert-Ludwigs-University of Freiburg, Germany (6-11 October, Freiburg, Germany pp.53)
11. Кислов А.В. **Константинов П.И.** Моделирование летнего температурного режима Московского региона // Abstracts of International conference on Computational Information Technologies for Environmental Sciences, Cites-2007, Tomsk, Russia 14-25 July 2007 p.38
12. Кислов А.В., **Константинов П.И.**, Бабина Е.Д. Развитие методики диагноза и прогнозирования микроклимата мегаполиса. Тезисы Международной научно-практической конференции «Экологическая безопасность урбанизированных территорий в условиях устойчивого развития», Изд-во Евразийского национального университета им. Л.Н.Гумилева, Астана, Казахстан, 2006.