

Государственное учреждение
«Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации»



На правах рукописи

Нахаев Мурат Ислемгалеевич

**ОСОБЕННОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НИЖНИХ
СЛОЕВ АТМОСФЕРЫ В МОСКОВСКОМ МЕГАПОЛИСЕ ПО
ДАНЫМ МИКРОВОЛНОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Специальность 25.00.30 – метеорология, климатология и агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

23 АПР 2009

Москва – 2009

Работа выполнена в Государственном учреждении «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации»

Научный руководитель:	И.Н. Кузнецова кандидат географических наук
Официальные оппоненты:	Ю.П. Переведенцев доктор географических наук Г.С. Ривин доктор физико-математических наук
Ведущая организация:	ГУ «Центральная аэрологическая обсерватория» Росгидромета

Защита состоится 28 апреля 2009 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д327.003.01 при Государственном учреждении «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» по адресу: 123242, Москва, Большой Предтеченский переулок д. 11-13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного учреждения «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации».

Автореферат разослан 23 марта 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор географических наук



Нестеров Е.С

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность выполненного исследования.

Следствием роста мегаполисов является изменение климата больших городов и состава воздуха. Погодные условия влияют на качество воздуха, но уже неоспоримым фактом является обратная связь – воздействие компонентов воздуха на погоду и климат. Сегодня изучение особенностей метеорологического режима в больших городах находится на передовых рубежах мировой науки. Представленная работа посвящена получению количественных подтверждений влияния московского мегаполиса на термический режим нижних слоев атмосферы.

Существенный прогресс в науке о городском климате связан с применением новых методов наблюдений за состоянием городского воздуха. В первую очередь, речь идет о расширении сети городских метеостанций и проведении наблюдений во всем городском пограничном слое атмосферы с помощью контактных методов, и используя дистанционные измерения. В представленной работе главным источником получения информации о температурной стратификации стали данные микроволновых измерений в разнесенных пунктах московского мегаполиса с помощью отечественной аппаратуры – микроволнового температурного профилемера МТП-5. При подготовке отдельных разделов диссертации были использованы данные метеорологических станций в Москве. Также были использованы наблюдения за температурой и ветром на высотной метеорологической мачте в Обнинске (100 км от Москвы) и на телевизионной башне в Останкино.

Последние научные обобщения высотных наблюдений в московском мегаполисе на метеорологических мачтах и данных радиозондирования (г. Долгопрудный) были сделаны более 30 лет назад. Сегодня в регионе проводятся метеорологические наблюдения на двух высотных мачтах (Обнинск, Останкино), в 5 пунктах осуществляется измерение профилей температуры с помощью МТП-5. Начинает активно развиваться сеть акустического мониторинга.

Накопленные данные измерений МТП-5 в разнесенных пунктах московского региона в совокупности с высотными наблюдениями представляют собой редкий натуральный материал для получения статистических характеристик и исследований малоизученных атмосферных процессов в городском пограничном слое. К числу последних относятся особенности формирования температурных инверсий в условиях повышенного содержания аэрозолей и значительного притока антропогенного тепла.

Таким образом, актуальность представленной работы определяется:

- малой изученностью и необходимостью расширения представлений о специфических городских процессах в нижних слоях атмосферы, возникающих под влиянием большого города;
- отсутствием методических рекомендаций по анализу данных микроволновых измерений в большом городе с учетом высокой сезонной и внутрисуточной изменчивости термической структуры городского пограничного слоя;
- необходимостью совершенствования методов прогнозирования состояния воздуха в большом городе, а также элементов и явлений погоды.

Цель диссертационной работы.

Основной целью диссертационной работы является получение количественных показателей антропогенного влияния на нижние слои атмосферы.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- Определение количественных показателей и установление сезонных особенностей термической структуры нижних слоев городской атмосферы под влиянием большого города (на примере московского мегаполиса).
- Изучение сезонной и суточной динамики термических характеристик городского острова тепла на основе данных синхронных микроволновых измерений с помощью МТП-5 и наблюдений на высотных метеорологических мачтах (Останкино, Обнинск), а также наблюдений на городских метеостанциях.
- Изучение пространственно-временной изменчивости вертикальных градиентов температуры в приземном слое в московском мегаполисе.
- Определение статистических характеристик температурных инверсий в мегаполисе, и исследование их связи с синоптическими ситуациями.

Научная новизна.

- Получены количественные показатели сезонных и внутрисуточных особенностей влияния большого города (г. Москва) на пространственную неоднородность поля температуры в нижнем 300-метровом слое атмосферы. Выявлено, что тепловое воздействие города на термическую структуру городского пограничного слоя летом выражено сильнее, чем зимой, ночью – больше, чем днем.
- Показано, что в центре Москвы преобладают вертикальные градиенты температуры (γ), превышающие сухоадиабатические (γ_{ca}), достигая годового максимума ($2,2^\circ\text{C}/100\text{ м}$) в апреле. Повторяемость градиентов температуры ($\gamma > \gamma_{ca}$) в городе в 1,5-2,0 раза больше, чем в пригороде.

Резко отличающиеся характеристики термической устойчивости на территории мегаполиса показывают метеорологическую обусловленность ухудшения условий рассеивания примесей в направлении от центра города к окраинам в утренние и вечерние часы.

- Частота образования приземных инверсий в центральной части города по отношению к ближнему пригороду (Долгопрудный) и невозмущенной влиянием большого города местности (Обнинск) находится в соотношении 1:3:4.
- Показано, что над термически неустойчивым и более теплым приземным слоем в городе образуется так называемая «линза холода», т.е. в слое 200-300 м часто холоднее, чем в пригороде. Этот городской эффект обнаруживается ночью и в ранние утренние часы в основном в холодный период, с частотой 20-30% может проявляться в то же время суток и в летние месяцы.
- Обнаружен устойчивый характерный только для лета эффект утреннего (6-9 ч) нагрева воздуха на высоте 150-300 м в городе как результат поглощения солнечной радиации городским аэрозолем и водяным паром.
- Выявлен весенний эффект влияния городского аэрозоля в утренние часы, проявляющийся в замедлении прогресса приземного воздуха в городе по сравнению с пригородом.
- На основе анализа измерений МТП-5 описан профиль температуры в слое 0-600 м в некоторых городах России – Красноярск, Нижний Новгород, Москва (средний за год и для определенных часов суток). Показано, что даже в осредненном

за год температурном профиле обнаруживаются специфические индивидуальные черты термической структуры в нижних слоях атмосферы, обусловленные влиянием локальных физико-географических и антропогенных факторов.

Практическая значимость работы.

- Полученные результаты количественно подтверждают особый термический режим в мегаполисе и показывают, что ближние пригороды находятся под тепловым влиянием мегаполиса.
- Подчеркивается, в дневное время температурные контрасты в Москве в основном не превышают 2-3°C; ночью они возрастают, достигая экстремальных величин 7-9°C (в единичных случаях зимой 13-14°C).
- Выявлена зависимость разности температуры между двумя пунктами измерений в Москве (Красная Пресня, Останкино) $\Delta T_{\text{пр-ост}}$ от скорости ветра: в интервал $\Delta T_{\text{пр-ост}} = \pm 2^\circ\text{C}$ попадает при слабых ветрах только 25%, при скорости переноса от 3 до 7 м/с – 85%, при скорости выше 7 м/с – более 90% величин $\Delta T_{\text{пр-ост}}$.
- Полученные характеристики повторяемости температурных инверсий в центре Москвы и окрестностях могут быть использованы не только в прогнозе погоды и загрязнения воздуха, но и учитываться при подготовке справочного климатического материала.
- Количественные оценки интенсивности и изменчивости городского острова тепла в мегаполисе, а также вертикальных градиентов температуры в приземном слое могут быть использованы для верификации мезомасштабных численных моделей атмосферы.
- Горизонтальная неоднородность поля температуры в городском пограничном слое характеризуется выраженной внутрисуточной и сезонной изменчивостью, что необходимо учитывать при оценке репрезентативности локальных наблюдений, а также при проведении натурных экспериментов.

Личный вклад автора.

Автор принимал непосредственное участие во всех этапах исследований, включая: 1) систематизацию полученных ранее оценок термической стратификации нижних слоев атмосферы, характеристик городского острова тепла и температурных инверсий; 2) получение пространственно-временных характеристик термической структуры нижних слоев атмосферы по данным микроволновых измерений, включая среднегодовые характеристики стратификации температуры в некоторых крупных городах России (Москва, Нижний Новгород, Красноярск); 3) анализ характеристик «городского острова тепла» в Москве, его вертикальной структуры и сезонной изменчивости, анализ условий появления экстремальных величин ГОТ; 4) оценку характеристик инверсий температуры в центре Москвы, анализ пространственных характеристик температурных инверсий в московском мегаполисе.

На защиту выносятся:

1. Результаты исследования суточной и сезонной изменчивости вертикальных градиентов температуры в нижних слоях городской атмосферы;
2. Показатели сезонной и суточной динамики неоднородности поля температуры в нижних слоях атмосферы в московском мегаполисе, включая термические характеристики городского острова тепла;

3. Статистические характеристики температурных инверсий в московском мегаполисе, их связь с синоптическими ситуациями;
4. Показатели связи формирования внутригородских контрастов температуры со скоростью переноса в нижних слоях атмосферы.

Апробация работы.

Результаты диссертационной работы докладывались на научных семинарах в Гидрометцентре РФ, а также на Международной конференции по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды «ENVIROMIS 2004», Томск, 2004 г.; IV Всероссийской научной конференции «Физические проблемы экологии (Экологическая физика)», Москва, 2004 г.; VIII Всероссийской школе - конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты», Борок, 2005 г.; Европейских курсах исследования атмосферы «ERCA - 2006», Гренобль, 2006 г.; X Всероссийской конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Климатические эффекты. Атмосферное электричество», Москва, 2006 г.; Международной конференции по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды «ENVIROMIS 2006», Томск, 2006 г.; Международной конференции по проблемам гидрометеорологической безопасности, Москва, 2006 г.; II конференции молодых ученых национальных гидрометслужб государственных участников СНГ «Новые методы и технологии в гидрометеорологии», Москва, 2006 г.; XI Всероссийской школе-конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты», Нижний Новгород, 2007 г.; Международном симпозиуме «Физика атмосферы: наука и образование», С.-Петербург, 2007 г.; XII международной конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы», Борок, 2008 г.; Всероссийской научной конференции «Исследование процессов в нижней атмосфере при помощи высотных сооружений», Обнинск, 2008 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 печатных работ. Перечень публикаций приведен в конце реферата.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 135 страницах, включая 49 рисунков, 17 таблиц и 4 приложения. Список литературы содержит 111 наименований и восемь ссылок на интернет - сайты.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследований, приведены сведения о научной новизне и практической значимости работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения о структуре работы, а также о личном вкладе соискателя.

В первой главе представлен обзор публикаций, посвященных исследованию термических характеристик пограничного слоя атмосферы, рассмотрены основные средства мониторинга пограничного слоя атмосферы, подробно описаны характеристики метеорологического температурного профилемера (МТП-5), данные измерений которого в московском регионе и в некоторых городах России стали основой для выполнения представленной работы.

Средства мониторинга пограничного слоя атмосферы. В настоящее время для наблюдений за состоянием пограничного слоя атмосферы (ПСА) используют контактные методы (аэрологическое зондирование, наблюдения на метеорологических мачтах и башнях, самолетах, привязных аэростатах и т.п.) и дистанционные (акустические, лидарные, микроволновые).

Наиболее распространенным является метод аэрологического радиозондирования. Несмотря на определенные недостатки данного вида наблюдений, именно данные радиозондирования позволили получить климатические характеристики пограничного слоя атмосферы на территории России (Справочное пособие «Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере», Безуглая, 1983 г.). До сих пор в России этот Справочник является основным источником информации о характеристиках ПСА для выполнения прикладных задач.

Особое место в исследовании ПСА занимают высотные метеорологические мачты. В научных публикациях широко представлены исследования, по наблюдениям на высотной метеорологической мачте (ВММ) в Обнинске.

Активно развивающиеся дистанционные методы наблюдений позволили в последние годы существенно продвинуться в понимании и оценках влияния большого города на процессы в нижних слоях атмосферы. К числу средств дистанционного зондирования атмосферы относятся содарты и приборы оптического зондирования атмосферы – лидарты. Еще одним средством дистанционного зондирования ПСА являются микроволновые радиометры.

МТП-5 был разработан в начале 90-х годов прошлого столетия в Центральной аэрологической обсерватории. Данный метод измерения профилей температуры основан на приеме собственного теплового излучения атмосферы в диапазоне миллиметровых радиоволн. В 1993-1999 гг. прибор прошел успешные международные сравнения с данными радиозондирования, привязными аэростатами, контактными датчиками на высотных метеорологических мачтах, лидартами и системами радиоакустического зондирования.

Исследования температурного режима ПСА. Большой вклад в изучение термической структуры нижних слоев атмосферы внесен сотрудниками НПО «Тайфун» под руководством Н.Л. Бызовой. Используя данные наблюдений на ВММ в Обнинске и высотном метеорологическом комплексе (ВМК) Останкино в период с 1968 по 1974 гг., проведены оценки влияния большого города на температуру в ПСА. Было показано, что различия между температурой в районе двух высотных комплексов не существенны. В последние годы значительно изменилась степень

урбанизации города (размеры, плотность и высотность городской застройки и т.п.), а, следовательно, полученные несколько десятилетий назад выводы об особенностях климата ПСА в московском мегаполисе нуждаются в уточнении.

С появлением МТП-5 – нового технически эффективного и методически обеспеченного средства измерения – появилась возможность исследования тонких структур ПСА и оценки теплового влияния большого города на поле температуры. Последнее обобщение наблюдений с помощью МТП-5 было сделано по данным за 2000-2004 гг. В представленной работе приводятся результаты анализа данных измерений МТП-5 в московском регионе за более поздний период с 2004 по 2008 гг.

Городской остров тепла (ГОТ). Зарубежные и отечественные исследования показывают, что характеристики острова тепла изменяются в зависимости от типа погоды, местных особенностей города, а также количества сжигаемого топлива и т.п. Принято считать, что «пик» ГОТ располагается в центральной части города, но в каждом конкретном случае «рельеф» ГОТ определяется специфической структурой каждого города.

Наличие ГОТ в сочетании с большой шероховатостью подстилающей поверхности обуславливают особенности ветрового режима в условиях города, который характеризуется снижением скорости ветра в городе по сравнению с пригородом. Помимо этого, при слабых ветрах (1-3 м/с) может возникнуть городская циркуляция, в общем случае направленная от более холодных окраин к теплой центральной части города. Некоторые авторы называют этот эффект «сельским бризом» по аналогии с морским бризом.

Ученые, изучающие различные аспекты городского климата и влияния городов на его изменения, создали международную ассоциацию *International Association for Urban Climate (IAUC)* и регулярно обмениваются полученными результатами на симпозиумах и доступном интернет-сайте www.urban-climate.org.

Первые наиболее полные обобщения влияния города Москвы на метеорологический режим были сделаны по наблюдениям до 1965 г и представлены в монографии Дмитриева А.А. «Климат Москвы». В этой работе показано, что тепловое влияние города проявляется в повышении температуры, которое прослеживается в виде шлейфа вдоль преобладающих ветровых потоков. Область положительных отклонений температуры простирается от центра города за его пределы в юго-восточном направлении.

В 1995 году опубликована монография Клинова Ф.Я. «Климат, погода, экология Москвы», дополненная анализом более поздних наблюдений. В этой работе в числе других вопросов обсуждаются горизонтальные размеры острова тепла Москвы; отмечается, что ареал заметного влияния Москвы как мощного источника тепла распространяется на 10-15 км на запад и 25-30 км на юго-восток и восток от Москвы.

Первые сведения о вертикальной структуре термического поля в московском мегаполисе появились с началом метеорологических наблюдений на ВМК Останкино и ВММ в Обнинске.

Несмотря на значительное количество исследований, многие эффекты и специфические процессы в нижних слоях атмосферы больших городов остаются малоизученными. Надежды на существенное продвижение знаний в этой области связаны в большей степени с использованием дистанционных методов и высотных измерений.

Инверсии температуры. В нашей стране первые сведения об инверсиях температуры появились в начале XX в. в работах Рыкачева М.М. и Молчанова П.А. Рыкачевым впервые описаны некоторые характеристики инверсий по материалам змейковых подъемов в г. Павловске в 1911-1914 гг. Молчанов в 1922 году выявил новый вид инверсий – весенние, или снежные инверсии.

Появление высотных измерений температуры дало начало более глубокому исследованию термической структуры ПСА, в частности, инверсий температуры. По данным наблюдений на ВМК «Останкино» (1970-1972 гг.) показано, что величина вертикального температурного градиента при инверсиях изменялась от 0,1 до 10,0°С/100 м, в 80% случаев наблюдались слабые инверсии ($\gamma = 0,1 \dots 2,0^\circ\text{C}/100 \text{ м}$). Наибольшая повторяемость инверсий (64,5%) приходится на ночное время.

Представленный анализ научных публикаций показывает с одной стороны большой интерес к проблеме влияния большого города на термический режим пограничного слоя, а с другой – противоречивость некоторых результатов и, следовательно, недостаточную изученность такого специфического явления как городской остров тепла и связанных с ним городских эффектов.

Во второй главе представлены пространственно-временные характеристики термической структуры нижних слоев городской атмосферы по данным микроволновых измерений приборами МТП-5.

2.1. Рассчитаны средние годовые характеристики стратификации температуры в некоторых крупных городах России (Красноярск, Нижний Новгород, Москва и Долгопрудный – ближний северный пригород Москвы). Для удобства сравнений стратификации температуры в разных климатических зонах рассчитаны профили отклонений температуры в слое 0-600 м от приземной температуры. Даже при годовом осреднении (рисунок 1) в центре московского мегаполиса в нижнем 250-метровом слое стратификация температуры неустойчивая. На окраине московского мегаполиса (Долгопрудный), а также в Нижнем Новгороде и Красноярске средние за год γ в нижнем 100-метровом слое не превышают влажноадиабатический градиент температуры ($\gamma_{\text{ва}}$).



Рисунок 1 – Профили средней годовой температуры (в отклонениях от приземной температуры).

Делается вывод, что в больших городах процессы теплообмена в нижних слоях атмосферы при общих закономерностях имеют индивидуальные особенности,

отражая влияние местных факторов. Следующие разделы главы посвящены анализу сезонных и суточных особенностей температурных различий между центром Москвы (район Красная Пресня) и ближним северным пригородом (Долгопрудный).

2.2. Сравнение синхронных наблюдений с помощью МТП-5 в московском мегаполисе (2004-2007 гг.) показало, что влияние большого города выражается в усилении термической неустойчивости в центре Москвы по сравнению с пригородом. Так, в центре города повторяемость сверхсухоадиабатических градиентов температуры ($\gamma > \gamma_{ca}$) в нижнем 100-метровом слое в среднем составляет 60% летом и 95% зимой, в пригороде повторяемость $\gamma > \gamma_{ca}$ летом – около 40%, зимой – 45%.

Установлены сезонные особенности термического режима в московском мегаполисе (результаты получены для срединных месяцев каждого сезона года, за исключением зимнего – из-за больших погодных аномалий в январе 2004 - 2007 гг. для характеристики зимних условий выбран февраль соответствующих годов):

– в феврале в центре города в течение всех суток приземный слой на 1,0-1,6°C теплее, чем на окраинах. В слое 200-300 м над центром города в 60-70% случаев холоднее, чем в пригороде (в ночные часы на 0,8-1,1°C). Днем различия в температуре между пунктами в слое 200-300 м практически исчезают (рисунок 2).

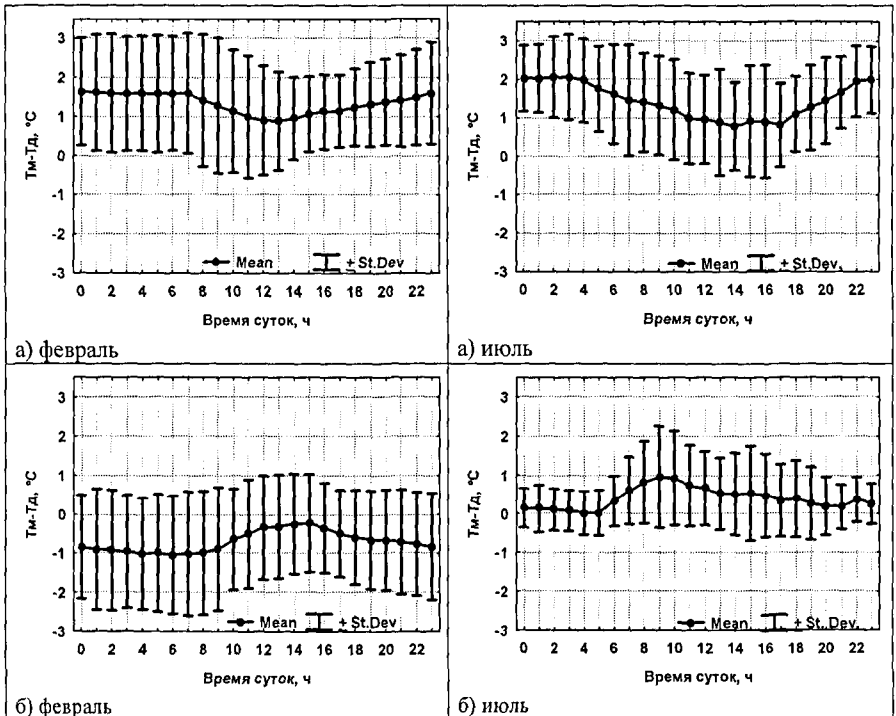


Рисунок 2 – Разность температуры между центром (Красная Пресня) и пригородом (г.Долгопрудный) Москвы (а) – у земли, б) – высота 300 м).

– в апреле горизонтальная неоднородность в поле приземной температуры в мегаполисе хорошо выражена ночью (в центре Москвы теплее на 1-1,6°C у земли и на 0,5-0,7°C на высоте 100 м) и практически размывается днем. В центре Москвы наблюдаются максимальные за год вертикальные градиенты температуры, в дневные часы увеличиваясь до 2,2°C/100 м. В утренние часы (8-10 ч) наблюдается эффект замедленного прогресса приземного слоя вследствие ослабления солнечной радиации городским аэрозолем и газами (рисунок 3).

– в июле в среднем за месяц весь нижний 300-метровый слой в центре города теплее, чем в пригороде. Наблюдается наибольшая в году и самая изменчивая горизонтальная неоднородность в поле температуры. По сравнению с апрелем уменьшаются вертикальные градиенты температуры в центре мегаполиса и не меняются за городом.

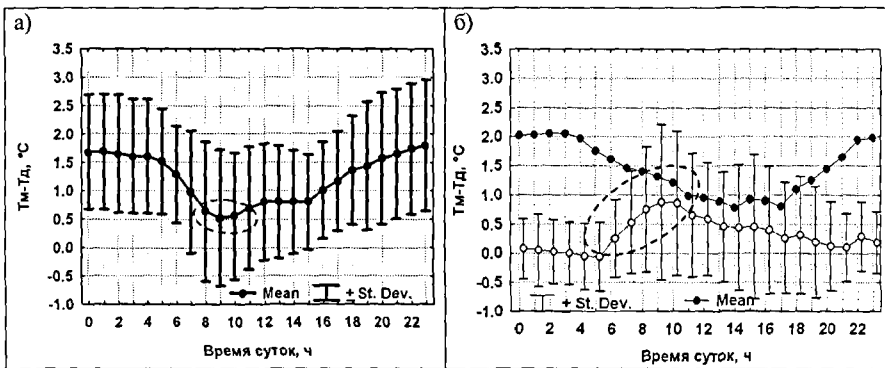


Рисунок 3 – «Городские эффекты» в суточном ходе разности температуры $\Delta T(h)_{M-D}$ (а) в апреле у земли, (б) в июле (толстая линия – ΔT у земли, тонкая линия – ΔT на высоте 300 м).

Летом наблюдается устойчивый утренний эффект нагрева внутренних слоев городского пограничного слоя на высоте 150-300 м (рисунок 3) как результат поглощения солнечной радиации городским аэрозолями и парниковыми газами, накоплению которых способствует самая устойчивая в году термическая стратификация в ночные и утренние часы.

Для октября характерна меньшая, чем в другие сезоны разность приземной температуры между центром и пригородом $\Delta T(0)_{M-D}$: в среднем за месяц ночью составляет 1,2°C, днем – меньше 1,0°C.

В третьей главе изложены основные результаты исследования изменчивости термических характеристик городского острова тепла (ГОТ). За период 2004-2007 гг. по данным измерений МТП-5 в районе Красной Пресни Москвы (М) и в ближнем пригороде г. Долгопрудный (Д) рассчитаны разности средней часовой температуры между этими пунктами на соответствующих уровнях $\Delta T(h)_{M-D} = T(h)_M - T(h)_D$, а также некоторые статистические характеристики температурных различий в разные сезоны (среднее значение, мода, стандартное отклонение и диапазон изменчивости).

Получено, что термическая структура в городском острове тепла характеризуется высокой сезонной изменчивостью. Модальные и средние разности температуры между Пресней и Долгопрудным показывают, что в середине лета ГОТ

достигает годового максимума по величине и высоте. Примерно в 70% случаев купол ГОТ поднимается выше 300 м. В другие сезоны такое явление возможно с повторяемостью 25-35% (в апреле около 40%). Зимой ГОТ обнаруживается в нижнем 150-метровом слое.

Установлено, что в зимний и переходные сезоны вертикальное распределение $\Delta T(h)_{M-d}$ в нижнем 300-метровом слое принципиально отличается от летнего. Над более теплым приземным слоем в центре города устойчиво наблюдается более холодный, чем в пригороде слой воздуха – как результат смешивания с вышележащими слоями. Ярче всего такая неоднородная по знаку стратификация $\Delta T(h)_{M-d}$ выражена зимой: в среднем за месяц у земли $\Delta T(0)_{M-d} = +1,3^\circ\text{C}$, на высоте 300 м $\Delta T(300)_{M-d} = -0,7^\circ\text{C}$. Весной средняя за месяц $\Delta T(0)_{M-d} = +1,2^\circ\text{C}$, на высоте 300 м $\Delta T(300)_{M-d} = -0,1^\circ\text{C}$.

Повторяемость специфической стратификации разностей температуры, когда над теплым приземным слоем в центре мегаполиса располагается более холодный, чем в пригороде слой воздуха, имеет следующие показатели: в феврале она наблюдается около 75%, днем – 60%, в апреле примерно в половине случаев, в октябре ночью около 65%, днем – на 10% меньше.

Одним из важных полученных результатов является вывод о том, что ГОТ имеет ярко выраженную внутрисуточную изменчивость. Во все сезоны ГОТ достигает максимального развития ночью (перед восходом солнца), днем ГОТ значительно ослабевает. Днем во все сезоны с повторяемостью примерно 85% в центре Москвы немного теплее, чем в ближнем северном пригороде. Но величина $\Delta T(0)_{M-d} > 2^\circ\text{C}$ наблюдается редко – примерно в 10% (зимой около 20%, Таблица 1).

Таблица 1 – Сезонная повторяемость (%) градаций $\Delta T(h)_{M-d}$

	Величина $\Delta T(h)_{M-d}$, °C	Ночь				День			
		Февраль N=1115	Апрель N=942	Июль N=737	Октябрь N=991	Февраль N=1105	Апрель N=942	Июль N=750	Октябрь N=968
$\Delta T(0)_{M-d}$	≥ 0	90	96	99	93	84	85	85	84
	≥ 1	61	70	83	54	54	46	45	41
	> 2	32	27	35	14	19	11	12	8
	< 0	10	4	1	7	16	15	15	16
$\Delta T(300)_{M-d}$	≥ 0	26	41	68	36	40	54	71	47
	≥ 1	2	4	7	5	6	14	29	12
	> 2	0	0	1	1	1	1	8	2
	< 0	74	59	32	64	60	46	29	53

Ночью ГОТ проявляется в центре города в теплый сезон года практически всегда (96-99%), зимой – с повторяемостью около 90%. Величина разности приземной температуры $\Delta T(0)_{M-d} > 2^\circ\text{C}$ ночью имеет повторяемость 27 - 35% (осенью – около 15%). Практически никогда ночью в центре города не бывает холоднее пригорода больше, чем на 2°C .

Анализ температуры на метеостанциях Москвы за период 2002-2006 гг. показал, что ГОТ величиной не менее 5°C наблюдается с повторяемостью 8-24% в год. Летом городской остров тепла формируется чаще, чем зимой, но экстремальные величины ГОТ ($8-12^\circ\text{C}$) наблюдаются в холодный сезон (Рисунок 4).

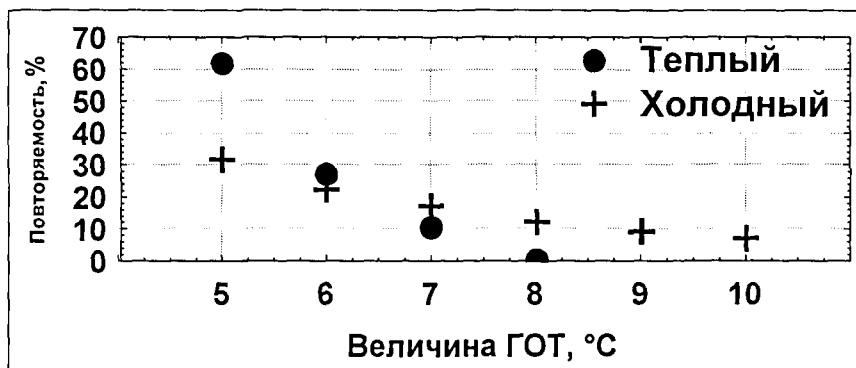


Рисунок 4 – Распределение величины ГОТ в теплый и холодный сезоны года.

Установлено, что наиболее благоприятными условиями для развития в Москве ГОТ величиной не менее 5°C являются малоградиентное барическое поле (около 55%) и северная периферия антициклона при средней скорости переноса в $ПСА \leq 5$ м/с.

Поскольку ближние пригороды Москвы (Долгопрудный) находятся под тепловым влиянием города, для анализа характеристик ГОТ были привлечены данные высотных наблюдений на фоновой территории – ВММ Обнинск. Сравнение температурных различий между фоновой местностью (Обнинск), пригородом и центром Москвы показало:

– зимой в городе в приземном слое чаще всего (около 80%) теплее, чем на фоновой территории (в 10% случаев более чем на 5°C). На высоте 300 м в городе практически всегда холоднее, чем в районе Обнинска (примерно 95%), в 55% случаев более, чем на 2°C (в 50% на 2-4°C).

– летом в приземном слое, как и зимой, в 80% случаев в городе теплее, чем на фоновой территории (в 20% больше, чем на 5°C). На высоте 300 м в отличие от зимы почти с равной повторяемостью наблюдаются как отрицательные, так и положительные разности температуры Москва – Обнинск.

В четвертой главе представлены результаты анализа температурных инверсий по данным высотных наблюдений на метеорологической мачте (г. Обнинск) и данным дистанционных измерений МТП-5 в центре Москвы (Красная Пресня), и в ближнем пригороде (г. Долгопрудный).

4.1. Полученные результаты анализа синхронных данных в трех разнесенных пунктах подтверждают, что термическая структура нижней атмосферы в ближнем пригороде (г. Долгопрудный) формируется под влиянием теплового шлейфа Москвы.

Важным методологическим результатом проведенного анализа является совпадение средней повторяемости приземных инверсий (около 26%) по данным радиозондирования (1959 – 1968 гг.) и полученных при анализе данных МТП-5 в пункте Долгопрудный (24%) за период 2004-2007 гг.

Установлено, что среднее отношение частоты образования инверсии на территории вне влияния московского мегаполиса (Обнинск), пригороде (Долгопрудный) и в центре Москвы (Красная Пресня): 4:3:1.

Выявлено:

- при отсутствии инверсии в центре Москвы в 80% случаев ее нет в Долгопрудном и в 60% – в Обнинске (Таблица 2);
- при отсутствии инверсии на фоновой территории практически никогда температурная инверсия не наблюдается и в мегаполисе;
- приземная инверсия в центре мегаполиса лишь в 2-3% случаев не сопровождается инверсией в других пунктах;
- приподнятые инверсии в центре мегаполиса почти в 30% случаев сопровождаются аналогичной инверсией в пригородах, чаще в такой ситуации на окраине мегаполиса и на фоновой территории наблюдаются приземные инверсии температуры (60-70%).

Таблица 2 – Связь инверсий температуры в центре Москвы, Долгопрудном и Обнинске.

Совпадение		Москва (100%)			Долгопрудный (100%)			Обнинск (100%)		
		Отсутствие инверсии	Приподнятая инверсия	Приземная инверсия	Отсутствие инверсии	Приподнятая инверсия	Приземная инверсия	Отсутствие инверсии	Приподнятая инверсия	Приземная инверсия
Условие										
Москва (%)	Отсутствие инверсии	100	-	-	99,6	51,9	65,0	99,5	84,6	75,7
	Приподнятая инверсия	-	100	-	0,3	48,1	15,9	0,4	15,3	11,7
	Приземная инверсия	-	-	100	0,1	0,0	19,1	0,1	0,1	12,6
Долгопрудный (%)	Отсутствие инверсии	80,4	3,7	1,7	100	-	-	97,2	77,0	35,2
	Приподнятая инверсия	2,4	33,2	0,0	-	100	-	1,5	18,6	4,0
	Приземная инверсия	17,2	63,1	98,3	-	-	100	1,3	4,4	60,8
Обнинск (%)	Отсутствие инверсии	59,0	3,2	1,4	70,9	18,2	3,0	100	-	-
	Приподнятая инверсия	10,2	27,1	0,4	11,5	47,7	2,0	-	100	-
	Приземная инверсия	30,8	69,7	98,2	17,6	34,1	95,0	-	-	100

4.2. Ниже приведены характеристики температурных инверсий, полученные по измерениям с помощью МТП-5 в центре Москвы:

- в 55% случаев инверсии температуры имеют продолжительность менее 6 ч, примерно в 35% – 7-12 ч. Максимальная продолжительность инверсии в рассматриваемый период составила 190 ч (январь, 2008 г.);
- в теплый сезон 80% инверсий имеют величину 1,5-2,5°C; инверсий величиной более 4,5°C не наблюдалось;
- в холодный сезон года инверсии величиной 1,5-2,5°C составляют около 65%, на долю инверсий величиной более 2,5°C приходится около 25%. Инверсии температуры величиной 10-12°C наблюдаются зимой в редких случаях;

– характерное время образования и разрушения зависит от генезиса инверсии; радиационные инверсии в центре города формируются значительно позже загородных – в 2-3 ч ночи, разрушаются – чаще через 1,5-2 ч после восхода солнца. При сильном загрязнении воздуха устойчивая стратификация (инверсионный профиль) может сохраняться дольше обычного – до 10-13 ч.

4.3. Используя данные о температуре и скорости ветра на ВММ Обнинск (17 месяцев 2007 и 2008 гг.), отдельное внимание уделено изучению явлений, связанных с наличием в нижнем 300-метровом слое локального максимума скорости ветра на высоте 121 м. В некоторых публикациях такие явления называют струйным течением нижнего уровня (СТНУ, LLJ – low-level jet). Установлено, что в суточном распределении СТНУ в слое 0-300 м наблюдаются два максимума повторяемости: в ранние утренние и вечерние часы. В отличие от зимы днем и во второй половине ночи летом СТНУ практически не наблюдаются.

Получено, что с увеличением скорости вблизи оси СТНУ, расположенного в нижнем 300-метровом слое атмосферы, возрастает частота его сопровождения приземной инверсией температуры. В 90% случаев СТНУ при $V_{\max} \geq 10$ м/с наблюдаются одновременно с приземной инверсией температуры, а СТНУ с $V_{\max} > 5$ м/с сопровождается приземной температурной инверсией в 60% и практически никогда – приподнятой инверсией с нижней границе ниже 300 м.

При наблюдении приземной температурной инверсии только в 15 % случаев наблюдается СТНУ в слое 0-300 м с $V_{\max} > 3$ м/с, и лишь 7 % приподнятых инверсий температуры сопровождается таким СТНУ. В то же время около 10 % приземных инверсий и 4% приподнятых инверсий наблюдаются при СТНУ с $V_{\max} > 5$ м/с.

В пятой главе описаны результаты изучения влияния скорости и направления переноса на городские контрасты температуры. При исследованиях использованы данные высотных измерений на северной периферии города (ВМК Останкино), на фоновой территории (ВММ Обнинск) и измерения профилемера МТП-5 в центре Москвы (Красная Пресня). Показателем переноса служили данные о ветре на высоте 300 м по наблюдениям на метеорологических мачтах. Анализ температурных различий между пунктами проводился для дня (9-15 ч) и ночи (21-03 ч) отдельно.

Получены выраженные сезонные зависимости формирования пространственных контрастов температуры как от скорости, так и от направления переноса.

При слабых ветрах в ПСА (V_{300} не больше 3 м/с) формируется наиболее выраженная горизонтальная неоднородность поля температуры в московском мегаполисе. Тепловое пятно в городе относительно фоновых территорий наблюдается практически каждой ночью (97% зимой, 99% летом).

При скорости переноса 3-7 м/с в городе ночью летом также всегда теплее, а зимой только в 70% случаев (таблица 3, таблица 4).

При интенсивном переносе ($V_{300} > 7$ м/с) ночью летом в центре Москвы теплее чем в Обнинске более чем на 2°C в 65%, а на 3°C и больше – примерно в 40%. Зимой при сильном переносе разность приземной температуры между центром Москвы и фоновой территорией в половине случаев не превышает 1°C и почти в 70% случаев 2°C.

Таблица 3 – Повторяемость (%) разностей приземной температуры Красная Пресня-Обнинск ($\Delta T_{п-обн}$) при различных скоростях переноса (V_{300}). Ночь (22 - 07 ч). Зима 2007-2008 г.

V_{300} , м/с	$\Delta T_{п-обн}$, °С						
	$\Delta T < -2$	$-2 \leq \Delta T < -1$	$-1 \leq \Delta T < 0$	$0 \leq \Delta T < 1$	$1 \leq \Delta T < 2$	$2 \leq \Delta T < 3$	$\Delta T \geq 3$
≤ 3	0	1	3	29	25	23	19
$3 < V_{300} \leq 7$	3	3	25	39	23	4	3
> 7	3	5	21	50	18	3	0

Таблица 4 – Повторяемость (%) разностей приземной температуры Красная Пресня-Обнинск ($\Delta T_{п-обн}$) при различных скоростях переноса (V_{300}). Ночь (22 - 07 ч). Лето 2007 г.

V_{300} , м/с	$\Delta T_{п-обн}$, °С						
	$\Delta T < -2$	$-2 \leq \Delta T < -1$	$-1 \leq \Delta T < 0$	$0 \leq \Delta T < 1$	$1 \leq \Delta T < 2$	$2 \leq \Delta T < 3$	$\Delta T \geq 3$
≤ 3	0	0	1	4	10	17	68
$3 < V_{300} \leq 7$	0	0	1	5	12	15	67
> 7	0	1	3	9	24	26	37

Тепловое влияние города при слабых ветрах обеспечивает формирование существенных городских контрастов приземной температуры: в 75% случаев разность между центральным районом (Пресня) и районом Останкино превышает 2°С.

При умеренном переносе (от 3 до 7 м/с) резко уменьшается диапазон различий между центром и периферийной частью города: в интервале $\Delta T_{п-ост} = \pm 2^\circ\text{C}$ находится 85%, а при скорости выше 7 м/с – более 90% величин.

Изучение связи величины разности температуры между центральной и периферийной частью города (Красная Пресня и Останкино) с направлением переноса ($H = 300$ м, Останкино) показало, что она находится в зависимости от времени суток. Ночью в среднем за год при любом направлении переноса район Красной Пресни теплее Останкино, а днем – при уменьшении величины температурных различий – холоднее (рисунок 5).

Смена знака разности температуры между пунктами от ночи ко дню указывает на различия механизмов формирования внутригородских контрастов температуры в большом городе. А именно, ночные горизонтальные градиенты температуры образуются в системе городского острова тепла с сопутствующими ему циркуляциями, которые обеспечивают приток более холодного воздуха из пригородов к окраинам города (под влиянием переноса ГОТ может быть смещен относительно геометрического центра города, но увеличение скорости, как показано выше, разрушительно для ГОТ). Днем в любой сезон года конвективное перемешивание подавляет развитие городских циркуляций, и неоднородность поля приземной температуры в городе определяется локальными свойствами подстилающей поверхности – ландшафтными особенностями, характером застройки, загрязнением воздуха.

Оказалось, что днем в районе Красной Пресни при ветрах со стороны поймы Москва-реки (от западного до юго-восточного) в среднем за год температура на 0,7-1,0°С ниже, чем в районе Останкино. При ветрах противоположного направления различий в температуре практически нет.

Ночью наименьшие различия в температуре во всем 300-метровом слое (в среднем за год около 0,5°С) между Красной Пресней и районом Останкино связаны с северо-западным переносом – наветренным для обоих пунктов. Наибольшие различия в температуре между двумя пунктами приходится на восточный сектор переноса: в районе Красной Пресни ночью теплее, чем в Останкино в среднем за год у земли на 1,4-1,6°С, на высоте 300 м – на 0,9°С.

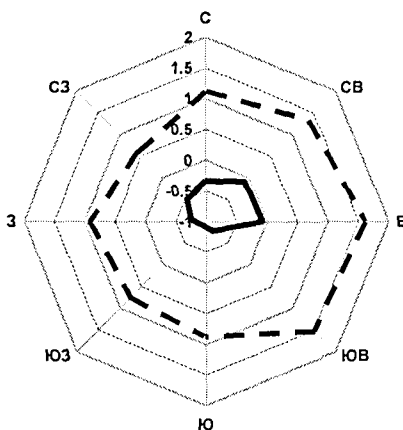


Рисунок 5 – Средняя за год разность температуры Красная Пресня-Останкино при различных направлениях переноса Н (300 м). Пунктирная линия – ночь (21-03 ч), сплошная – день (09-15 ч).

Установлено, что в ночное время городской тепловой шлейф способствует усилению термической устойчивости на наветренных городских окраинах. В образовании существенных температурных различий между Красной Пресней и районом Останкино обнаружено влияние теплового шлейфа, формирующегося в самой урбанизированной юго-восточной части Москвы.

В **Заключении** диссертационной работы сформулированы основные результаты:

1. Измерения с помощью МТП-5 в Красноярске, Н.Новгороде и в 2 пунктах московского мегаполиса показали, что термическая структура нижних слоев атмосферы при общих закономерностях внутрисуточной изменчивости имеет индивидуальные особенности, отражая специфическое в каждом городе влияние местных факторов.
2. Выявлены основные сезонные и суточные особенности изменчивости вертикальных градиентов температуры в центре и на окраине Москвы:
- в зимние месяцы (февраль) отмечаются значительные внутрисуточные преобразования термического состояния приземного слоя атмосферы (от сильной

устойчивости до сильной неустойчивости) на окраинах мегаполиса на фоне практически неизменной сверхадиабатической неустойчивости в центре города;

- весной (апрель) формируются самые большие в году значения вертикального градиента температуры, в приземном слое в центре города они достигают $2,2^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$, в окрестностях $1,8^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$.

- летом (июль) в ночные часы наблюдается наиболее устойчивое в году состояние приземного слоя атмосферы, летом по сравнению с весной уменьшаются вертикальные градиенты температуры в центре мегаполиса и не меняются за городом;

- осенью (октябрь) существенное влияние города на термическую структуру нижних слоев атмосферы сказывается лишь в приземном слое.

3. По синхронным измерениям вертикальных профилей в центре Москвы (район Красная Пресня) и ближнем пригороде (г.Долгопрудный) получены количественные оценки влияния большого города на пространственную неоднородность поля температуры в нижнем 300-метровом слое городской атмосферы. Установлены сезонные особенности:

Для зимы характерна сильная деформация вертикального профиля температурных различий между центром и окрестностями: антропогенное тепло в течение суток обнаруживается в основном в нижнем 100-200-метровом слое, над которым находится более холодный, чем в пригороде воздух.

Летом наблюдается наибольшая в году внутрисуточная изменчивость термической структуры городского пограничного слоя атмосферы.

Горизонтальная неоднородность поля температуры в мегаполисе имеет ярко выраженный суточный ход. Достигая максимальных величин ночью, температурные различия в приземном слое между центром и окраинами днем становятся незначительными, а нередко меняют знак.

4. Выявлены устойчивые «городские» эффекты, в их числе:

– ночная «линза холода» в городе над более теплым, чем на окраинах приземным слоем – результат смешивания с воздухом верхних уровней из-за вынужденной конвекции в городском пограничном слое;

– характерное для весны утреннее (8-10 ч) замедление (по сравнению с «незагрязненным» пригородом) прогрева приземного слоя атмосферы вследствие ослабления солнечной радиации городским аэрозолем;

– характерный для лета утренний нагрев внутренних слоев городского пограничного слоя как результат поглощения солнечной радиации примесями и водяным паром, накоплению которых способствует самая устойчивая в году термическая стратификация в ночные и утренние часы.

5. Городской остров тепла характеризуется значительной сезонной и внутрисуточной изменчивостью. Верхняя граница значимого городского влияния на поле температуры колеблется от 100 м зимой до 300 м и более летом.

6. С использованием данных наблюдений на высотных мачтах и измерений приборами МТП-5 получены характерные особенности температурных инверсий в центре Москвы:

– инверсии температуры формируются в 3 раза реже, чем в ближнем пригороде и в 4 раза реже, чем в невозмущенной мегаполисом местности;

– в центре Москвы 55% температурных инверсий имеют продолжительность менее 6 ч; наиболее интенсивные инверсии в Москве наблюдаются в холодный сезон, но в редких случаях до $10-12^{\circ}\text{C}$;

– радиационные инверсии температуры в городе формируются позже, чем за городом, разрушаются чаще всего через 1,5-2 ч после восхода солнца. Летом при сильном загрязнении воздуха устойчивая стратификация нижних слоев сохраняется до 10-13 ч.

7. На примере двух пунктов высотных наблюдений – центр города (Красная Пресня) и городская периферия (Останкино) получены зависимости формирования температурных контрастов в городе от переноса в нижних слоях атмосферы: при слабых ветрах в диапазоне $\pm 2^\circ\text{C}$ находится только 25% разности приземной температуры между Красной Пресней и районом Останкино, при скорости переноса от 3 до 7 м/с – 85%, при скорости выше 7 м/с – более 90% величин.

8. Полученные результаты показывают, что микроволновые измерения профилей температуры с помощью МТП-5 позволяют получать не только статистически надежные характеристики изменчивости температуры в нижних слоях городской атмосферы, но и выявлять устойчивые городские эффекты, обусловленные физическими процессами с антропогенной составляющей.

Основные научные результаты, полученные в процессе исследования, опубликованы в следующих работах:

1. Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Лезина Е.А., Семутникова Е.Г., Хайкин М.Н. Особенности загрязнения воздуха Москвы при неблагоприятных метеорологических условиях в холодное время года// Международная конференция по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды и семинар "Организация комплексного мультидисциплинарного исследования климатических "горячих пятен" в Северной Евразии", Томск, 2004, с. 71.

2. Хайкин М.Н., Кадыгров Е.Н., И.Н. Кузнецова, М.И. Нахаев. Влияние аэрозоля на термический режим пограничного слоя атмосферы по данным микроволновых дистанционных измерений профилей температуры в Москве и пригороде// Труды IV Всероссийской научной конференции «Физические проблемы экологии» Москва, 2004, с. 179-180.

3. Нахаев М.И., Кузнецова И.Н., Лезина Е.А. Влияние инверсии температуры на уровень загрязнения воздуха// Труды IX Всероссийской конференции «Состав атмосферы и электрические процессы», Борок, 2005, с. 27.

4. Kuznetsova I., Lezina E., Nakhaev M. et al. Features of urban air pollution during adverse meteorological conditions in Moscow // Proceedings of the 5th International conference on urban air quality, 29-31 March 2005, Valencia, Spain.

5. Нахаев М.И., Шалыгина И.Ю., Лезина Е.А. Загрязнение воздуха в периоды продолжительных зимних инверсий температуры// Труды X Всероссийской конференции «Состав атмосферы. Климатические эффекты. Атмосферное электричество», Москва, 2006, с. 21-22.

6. Нахаев М.И. Исследования условий формирования городского острова тепла и его влияния на загрязнение приземного воздуха// Международная конференция по проблемам гидрометеорологической безопасности, Москва, 2006, с. 72.

7. Kadygrov E., M. Khaykin, E. Miller, I. Kuznetsova, M. Nakhaev. Study of Urban heat island on the basis of stationary and mobile microwave temperature profilers data// Proc. of 6-th International conference on Urban climate, June 12-16, Goteborg, Sweden, 2006, pp. 160-163.

8. Nakhaev M.I., Shalygina I.Yu., Lezina E.A. Winter episodes of high air pollution in Moscow// International conference on environmental observations, modeling and informational systems «ENVIROMIS 2006», Tomsk, 2006, p. 114.

9. Нахаев М.И., Шалыгина И.Ю., Лезина Е.А. Загрязнение воздуха в период продолжительных инверсий температуры// X Всероссийская конференция молодых ученых «Состав атмосферы. Климатические эффекты. Атмосферное электричество», Москва, 2006, с. 21.

10. Нахаев М.И., Кузнецова И.Н., Хайкин М.Н. Сезонные особенности термической структуры пограничного слоя атмосферы в крупных городах// Международный симпозиум «Физика атмосферы: наука и образование». Санкт-Петербург, 2007, с. 253-255.

11. Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Лезина Е.А., Звягинцев А.М. О прогнозировании приземного озона в большом городе (на примере Москвы)// Оптика атмосферы и океана, Том 20, 2007, № 07, с.651-658.

12. Кузнецова И.Н., Зарипов Р.Б., Константинов П.И., Нахаев М.И., Шакина Н.П., Шалыгина И.Ю., Лезина Е.А. Прогнозирование качества воздуха – конечная цель мониторинга состава атмосферы// Всероссийская конференция «Развитие системы мониторинга состава атмосферы», Москва, 2007, с.108.

13. Kuznetsova I.N., Khaikine M.N., Nakhayev M.I. The mean yearly temperature lapse rates in the urban atmospheric boundary layer (ABL) on microwave sounding data// Research Activity, 2007, p. 2.

14. Нахаев М.И. Количественные характеристики устойчивости городского пограничного слоя атмосферы// Труды XI Всероссийской конференции «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты», Нижний Новгород, 2007, с. 40.

15. Горчаков Г.И., Исаков А.А., Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н., Аношин Б.А., Лезина Е.А., Нахаев М.И. Анализ атмосферных процессов в эпизодах высокого газового и аэрозольного загрязнения воздушного бассейна московского региона// Тезисы докладов 14-й рабочей группы "Аэрозоли Сибири", 2007, Томск, ИОА СО РАН, с. 18.

16. Нахаев М.И., Кузнецова И.Н. Условия формирования экстремальных значений городского острова тепла в московском мегаполисе// XII Международная конференция молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы», Борок, 2008, с. 99.

17. Кузнецова И.Н., Артамонова А.А., Нахаев М.И., Шалыгина И.Ю., Смирнова М.М., Мазурин Н.Ф., Хайкин М.Н. Сравнительный анализ данных высотных наблюдений (Обнинск, Останкино) и микроволновых измерений профилей температуры// Всероссийская научная конференция «Исследование процессов в нижней атмосфере при помощи высотных сооружений», Обнинск. 2008, с. 65-69.

18. Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Шалыгина И.Ю., Звягинцев А.М., Лезина Е.А. Изменчивость стратификации примесей в нижней атмосфере как индикатор атмосферных процессов// Всероссийская научная конференция «Исследование процессов в нижней атмосфере при помощи высотных сооружений», Обнинск. 2008, с. 158-161.

19. Нахаев М.И., Кузнецова И.Н., Хайкин М.Н. Среднегодовые характеристики термической устойчивости в городском пограничном слое атмосферы по данным микроволновых измерений.// Труды Гидрометцентра России, 2008, вып. 342.- с. 88-97.

20. Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Шалыгина И.Ю., Лезина Е.А.
Метеорологические предпосылки формирования зимних эпизодов высокого
загрязнения воздуха в г. Москва // Метеорология и гидрология, 2008, № 3. - с.48-59.

