

Диагностика городских и мезомасштабных атмосферных процессов по данным микроволновых измерений в московском мегаполисе

Е.Н.Кадыгров¹, И.Н.Кузнецова², М.И.Нахаев, Н.Е.Брусова², Е.В. Ганьшин¹,

¹ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория», 141700, Московская область, г.Долгопрудный, ул. Первомайская 3, e-mail: ldz@cao-rhms.ru

²ФГБУ «Гидрометеорологический центр России», 123242, Москва, Большой Предтеченский переулок, д.11-13, e-mail: muza@metcom.ru

Дано краткое описание возможностей использования данных дистанционных микроволновых измерений профилей температуры для диагностики городских и мезомасштабных процессов в атмосферном пограничном слое московского мегаполиса.

Applications of ground-based microwave temperature profilers data for study of urban atmospheric boundary layer above Moscow megacity are described in the report

Введение

Современный мониторинг состояния атмосферы невозможно представить без дистанционных методов и технических средств микроволнового зондирования атмосферы. Главным преимуществом дистанционных методов является возможность проведения непрерывных и мобильных измерений, чем не обладают традиционные методы - периодические выпуски одноразовых радиозондов и датчики на высотных метеорологических мачтах [1-5]. В Центральной аэрологической обсерватории при участии специалистов НИРФИ и ИКИ РАН в конце 80-х годов прошлого века был разработан микроволновый температурный профилемер для измерения профилей температуры атмосферного пограничного слоя атмосферы (АПС) [5-9]. В настоящее время коммерческими предприятиями изготовлено в РФ более 100 подобных приборов, которые используются как на наблюдательной сети Росгидромета, так и на крупных промышленных объектах и в зарубежных странах (США, Япония, Германия, Италия, Франция, Испания, Норвегия, Сербия, Нидерланды, Австралия, Китай, Тайвань, Южная Корея, Вьетнам, Бангладеш, Кувейт, и др.) [6-9]. В частности, в московском регионе непрерывно работают семь микроволновых температурных профиломеров МТР-5, данные которых используются рядом организаций (ФГБУ «ЦАО», ФГБУ «Гидрометцентр России», Мосэкомониторинг, Бюро прогноза погоды по Москве и Московской области, Институт физики атмосферы им.А.М. Обухова РАН и другие) [1].

Метеорологические температурные профиломеры МТР-5

Микроволновые приборы МТР-5 предназначены для непрерывных измерений в автоматическом режиме профилей температуры в диапазоне высот 0-1000 м в любых погодных условиях. В данных приборах используется угловой способ измерений, когда луч антенны микроволнового одноканального радиометра с фиксированной частотой вблизи максимума поглощения молекулярного кислорода (60 ГГц или длина волны 5 мм) сканирует от горизонта до зенита, и по характеристикам измеренного излучения (зависимости радиоярких температур от угла наблюдения) восстанавливается профиль температуры (зависимость термодинамической температуры от высоты) [1,6-9]. При этом рабочая частота в центре поглощения молекулярного кислорода (где ослабление достигает значений 14 дБ/км) имеет как свои плюсы, так и минусы. Основным минусом является ограничение максимальной высоты зондирования - 1000 м и тот факт, что для корректных измерений атмосфера должна быть горизонтально однородной хотя бы в пределах 500 м от места установки прибора. Но

при этом имеется целый ряд достоинств по сравнению с многоканальными системами [10]: прибор работает в полностью автоматическом режиме, без участия оператора; абсолютные калибровки прибора производятся автоматически, также без участия оператора; работа в максимуме поглощения позволяет использовать гораздо более широкую полосу пропускания радиометра, чем на склоне линии поглощения, а значит чувствительность прибора гораздо более высокая и точность измерений повышается; ошибки измерений не зависят от изменений концентрации водяного пара и почти не зависят от облачности; возможно проведение измерений при любых метеорологических условиях, кроме жидких ливневых осадков интенсивностью более 8 мм/час; алгоритмы восстановления профилей температуры существенно проще и надежнее, чем в многочастотном методе, т.к. нет необходимости учета в реальном масштабе времени текущих значений водозапаса облаков и влагозапаса атмосферы; аппаратура существенно проще многоканальной, не требует для обслуживания высокопрофессионального персонала, потребляет существенно меньше электроэнергии и легко трансформируется в мобильный вариант. Если измерение профилей температуры тропосферы (высоты от 3 до 10 км) возможно и с помощью спутниковых дистанционных приборов (например, AMSU спутников NOAA), то непрерывное измерение профилей температуры АПС доступно только наземным дистанционным приборам. Приборы этого типа были сертифицированы Росгидрометом и Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии, имеются утвержденные Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП Росгидромета) Методические рекомендации по использованию данных микроволновых профилемеров МТР-5.

Все отмеченные преимущества делают микроволновые сканирующие одноканальные профилемеры для измерения профилей температуры практически идеальными для использования в сетевых метеорологических и экологических системах наблюдений. В настоящее время используются в основном две версии прибора: стандартная и полярная. Полярная версия отличается более широким рабочим диапазоном в области низких температур, антенна имеет более узкую диаграмму направленности и соответственно вертикальное разрешение на высотах менее 100 м более высокое по сравнению со стандартной версией. В московском регионе используются приборы МТР-5 стандартной версии [1]. На Рис.1 показан внешний вид профилемеров МТР-5 стандартной и полярной версий, а на Рис.2 - состав профилемера. Более подробные характеристики этих приборов изложены в [1] и на сайтах www.mtp5.ru и www.attex.net.



Рис.1. Микроволновые температурные профиломеры МТР-5 для измерения профилей температуры атмосферного пограничного слоя (крайний справа - полярная версия)

Почти пятнадцатилетний мониторинг термического состояния атмосферного пограничного слоя (АПС) в московском регионе стал основой для получения средних многолетних характеристик температурного режима в нижних слоях атмосферы, которые описаны в целом ряде научных публикаций [10-13]. Одним из инициированных измерениями МТР-5 направлений исследований городской атмосферы стало изучение и установление пространственных характеристик городского острова тепла (ГОТ).

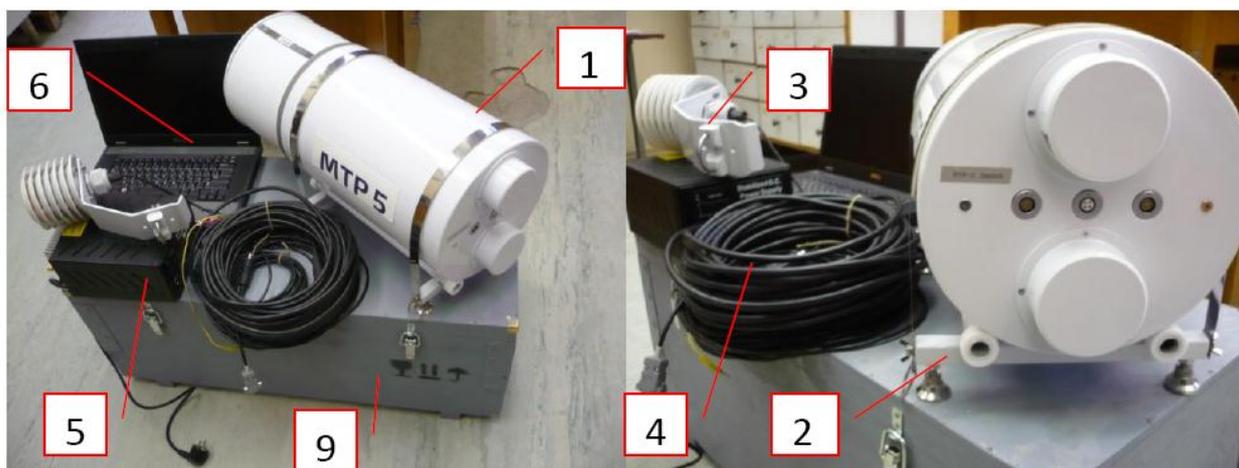


Рис.2. Основные составляющие профиломера МТР-5: 1-измерительный блок, 2-установочная опора, 3-внешний контактный датчик температуры, 4-комплект кабелей, 5-блок питания, 6-упаковочный ящик

Только с применением данных МТР-5 удалось получить количественные показатели городского влияния на термические (радиационные) процессы в нижних слоях атмосферы, выявить роль загрязнений в аномальной динамике температурной

стратификации как следствия усиления термической устойчивости приземного воздуха из-за прямого поглощения солнечной радиации внутри АПС и пр.

Были подготовлены несколько методических рекомендаций по использованию данных измерений МТР-5 для выполнения научных исследований в области физики пограничного слоя, городской метеорологии, а также для решения практических задач

Ниже представлены одни из самых важных полученных результатов и иллюстраций формирования особой структуры городского пограничного слоя, полученные по пространственно разнесенным данным измерений МТР-5.

Характеристики температуры в нижнем 600-метровом слое атмосферы в центре и пригороде Москвы.

Аналогов представленных в таблице 1 результатов многолетнего усреднения температуры по измерениям МТР-5 в слое до высоты 600 м в центре Москвы не существует. Последние данные о вертикальном распределении температуры датированы 70-тыми годами прошлого столетия, которые были получены по контактными измерениями температуры на телебашне Останкино. Эти данные могут служить базисом для оценки многолетних трендов температуры, т.е. для климатических тенденций

Таблица 1. Средняя месячная температура T_m (°C) и стандартное отклонение (CO) (°C) в центре города

высота (м)	0		100		200		300		400		500		600	
	T_m	CO												
январь	-4.1	5.7	-5.4	5.9	-6.0	5.7	-6.2	5.5	-6.3	5.1	-6.5	4.8	-6.8	4.7
февраль	-5.2	6.0	-6.7	6.3	-7.4	6.3	-7.7	6.2	-7.7	5.9	-7.9	5.5	-8.2	5.3
март	2.6	4.0	1.4	4.0	0.6	4.0	0.0	3.9	-0.6	3.9	-1.2	3.8	-1.8	3.8
апрель	7.6	5.6	6.4	5.6	5.6	5.7	4.8	5.7	4.1	5.7	3.5	5.8	2.9	5.8
май	14.6	6.4	13.5	6.4	12.7	6.4	12.1	6.5	11.5	6.6	10.9	6.5	10.2	6.4
июнь	17.4	4.4	16.1	4.3	15.2	4.3	14.4	4.3	13.8	4.3	13.1	4.3	12.4	4.2
июль	19.0	3.8	17.9	3.7	17.2	3.6	16.5	3.6	16.0	3.7	15.3	3.7	14.6	3.6
август	18.6	5.1	17.7	5.1	17.1	5.1	16.5	5.2	16.0	5.3	15.4	5.3	14.8	5.3
сентябрь	13.3	4.9	12.5	4.9	11.8	4.9	11.2	5.0	10.6	5.1	10.1	5.0	9.5	4.9
октябрь	7.8	4.1	6.8	4.2	6.1	4.3	5.7	4.3	5.1	4.4	4.6	4.4	4.2	4.4
ноябрь	1.1	3.8	-0.1	3.9	-0.9	4.0	-1.4	4.2	-1.8	4.1	-2.3	4.1	-2.8	4.1
декабрь	-3.2	6.3	-4.5	6.4	-5.3	6.3	-5.5	6.2	-5.6	5.9	-5.8	5.6	-6.2	5.5

Не менее уникальными являются количественные оценки температурных различий между центром мегаполиса и ближним северным пригородом (г.Долгопрудный). В таблице 2 представлены величины различий одноуровневых измерений температуры в этих двух удаленных друг от друга почти на 20 км пунктах

Таблица 2. Средняя разность температуры (°C) центр-пригород на высотах 0, 100, 200 и 300 м

высота (м)	0	100	200	300
январь	1.06	0.46	0.28	0.30
февраль	1.37	0.43	0.12	0.07

март	1.00	0.31	0.16	0.22
апрель	1.00	0.47	0.46	0.68
май	0.98	0.38	0.27	0.39
июнь	1.39	0.70	0.38	0.26
июль	1.26	0.57	0.27	0.20
август	1.38	0.72	0.48	0.44
сентябрь	0.92	0.03	0.01	0.01
октябрь	0.90	0.37	0.20	0.19
ноябрь	0.92	0.54	0.38	0.40
декабрь	1.04	0.75	0.76	0.87
средняя за год	1.10	0.48	0.31	0.3

Результаты сравнений синхронизированных измерений температурных профилей в центре мегаполиса и в ближнем пригороде являются основой для установления степени антропогенного влияния на термическое поле городского АПС, выявления сезонных и внутрисуточных особенностей этого влияния. В таблице 3 представлены усредненные за месяц вертикальные градиенты температуры в двух разнесенных пунктах

Таблица 3. Средний за месяц вертикальный градиент температуры в слое 0-100, 0-200, 0-300 и 0-600 м в центре и пригороде

Слой (м)	0-	0-200	0-300	0-600	0-100	0-200	0-300	0-600	0-100	0-200	0-300	0-600
ЗИМА	<i>декабрь</i>				<i>январь</i>				<i>февраль</i>			
центр	1.2	1.1	0.7	0.6	1.4	1.2	1.0	0.8	1.8	1.3	1.0	0.5
пригород	0.7	0.7	0.6	0.5	0.7	0.7	0.7	0.6	0.5	0.5	0.4	0.2
ВЕСНА	<i>март</i>				<i>апрель</i>				<i>май</i>			
центр	1.3	1.0	0.9	0.7	1.1	0.9	0.8	0.8	1.1	1.0	0.9	0.7
пригород	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.5	0.6	0.7	0.7
ЛЕТО	<i>июнь</i>				<i>июль</i>				<i>август</i>			
центр	1.1	1.0	0.9	0.8	1.1	1.0	0.9	0.7	1.1	1.0	1.0	0.8
пригород	0.5	0.5	0.6	0.6	0.4	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.5	0.6
ОСЕНЬ	<i>сентябрь</i>				<i>октябрь</i>				<i>ноябрь</i>			
центр	1.0	0.8	0.8	0.6	0.8	0.7	0.6	0.5	1.1	0.8	0.6	0.5
пригород	0.4	0.4	0.4	0.5	0.2	0.3	0.3	0.4	0.7	0.6	0.5	0.5

Произошедшие в последние десятилетия в Московском регионе значительные изменения количества и структуры выбросов в атмосферу, существенное изменение свойств подстилающей поверхности из-за стремительного расширения границ города с сопутствующими изменениями плотности и высотности застройки, уменьшением площадей естественной растительности и пр. указывают на объективные предпосылки формирования специфического метеорологического режима в большом городе. Одним из важных результатов анализа данных измерений МТР-5 стал вывод о преобладании термической неустойчивости в центральной части мегаполиса. На рис. 3 показаны

распределения вертикальных градиентов в приземном слое; видно, что неустойчивое состояние (градиенты больше величины сухоадиабатического) в пригороде намного реже

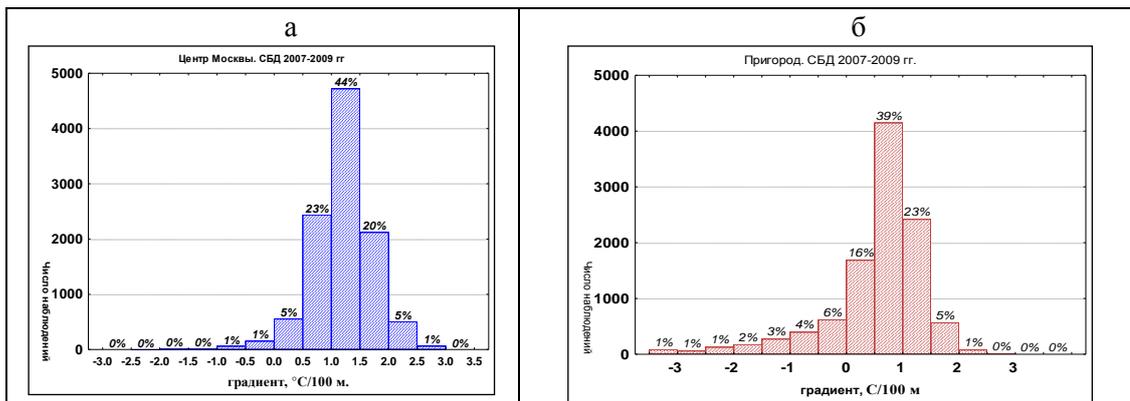


Рис.3. Повторяемость величин вертикального градиента температуры (в градусах) в слое 0-100 м а) в центре города, б) в пригороде

Большую практическую ценность имеет информация о сезонных и внутрисуточных изменениях температурных различий между пригородной частью мегаполиса и его центральной частью. На рис. 4, представлены внутрисуточные разности температуры в разнесенных пунктах.

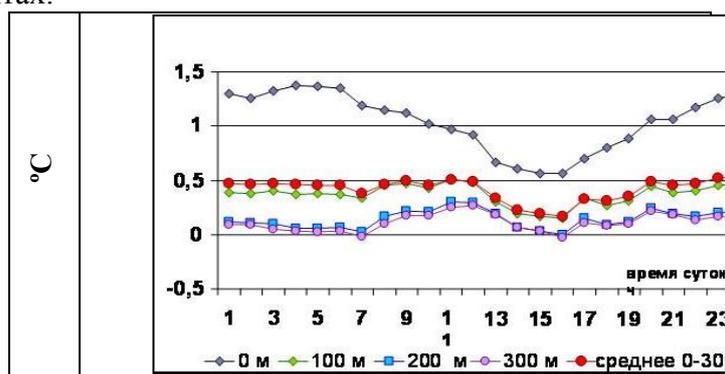


Рис.4. Средняя годовая разность T между центром и пригородом в слое 0-300 м

Хорошо видно, что даже при годовом усреднении данных наибольшие контрасты температуры приходятся на ночное время и становятся менее 1°C во всем 300-метровом слое в послеполуденное время.

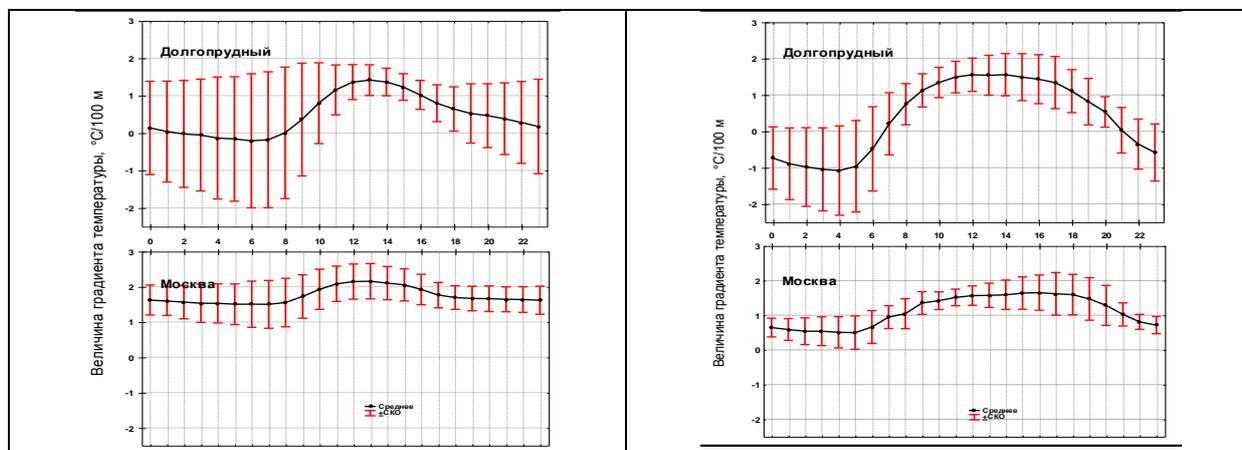


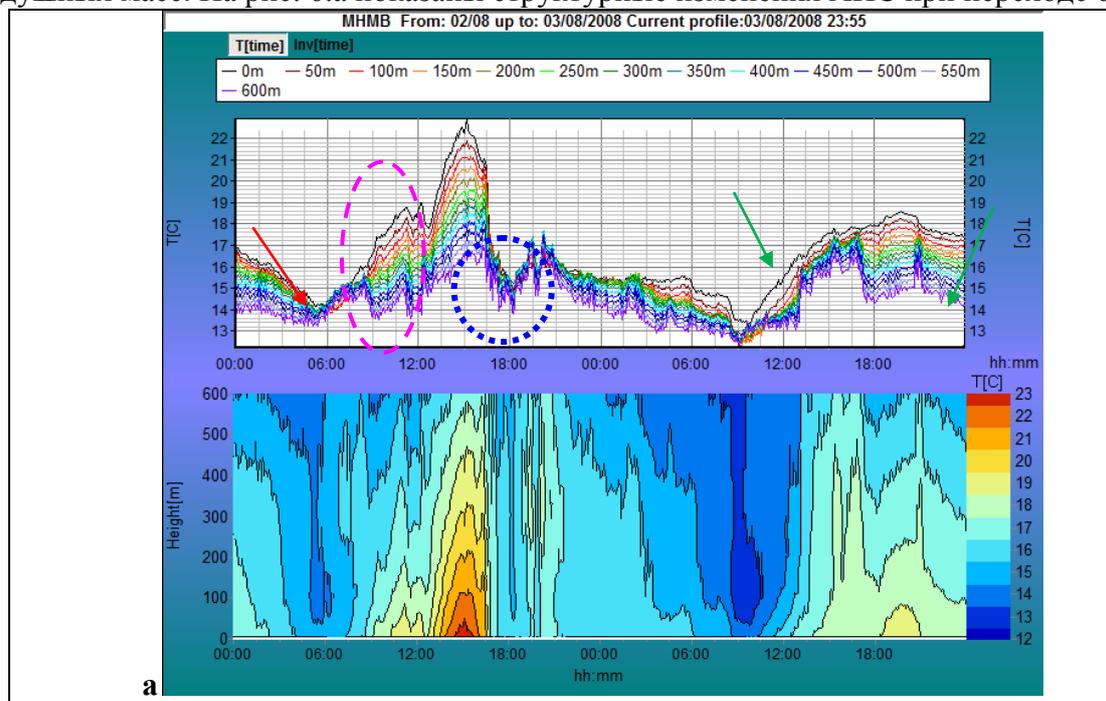
Рис.5. Суточный ход градиента температуры γ_m в слое 0-100 м в пригороде и в центре Москвы зимой (слева) и летом (справа)

Часть визуализированных расчетов среднего суточного хода градиента температуры в слое 0-100 м в пригороде и в центре Москвы представлены на рис. 5, где указаны для каждого часа суток и величины СКО.

Диагностика атмосферных процессов в атмосферном пограничном слое.

При дефиците информации о процессах в нижней атмосфере многолетний опыт использования данных МТП-5 подтверждает эффективность дистанционного мониторинга термического состояния нижних слоев атмосферы как средства контроля самой изменчивой части атмосферы – пограничного слоя. Данные МТП-5 прежде всего дают возможность проводить детализированный анализ процессов в предшествующее время, уточнять не выявленные традиционными способами явления и определить их природу.

На рис.6 приводятся полученные по данным МТП-5 изменения термического состояния в нижних слоях атмосферы, диагностирующие с малой заблаговременностью приближение атмосферного фронта, его прохождение и смену воздушных масс. На рис. 6.а показаны структурные изменения АПС при переходе от



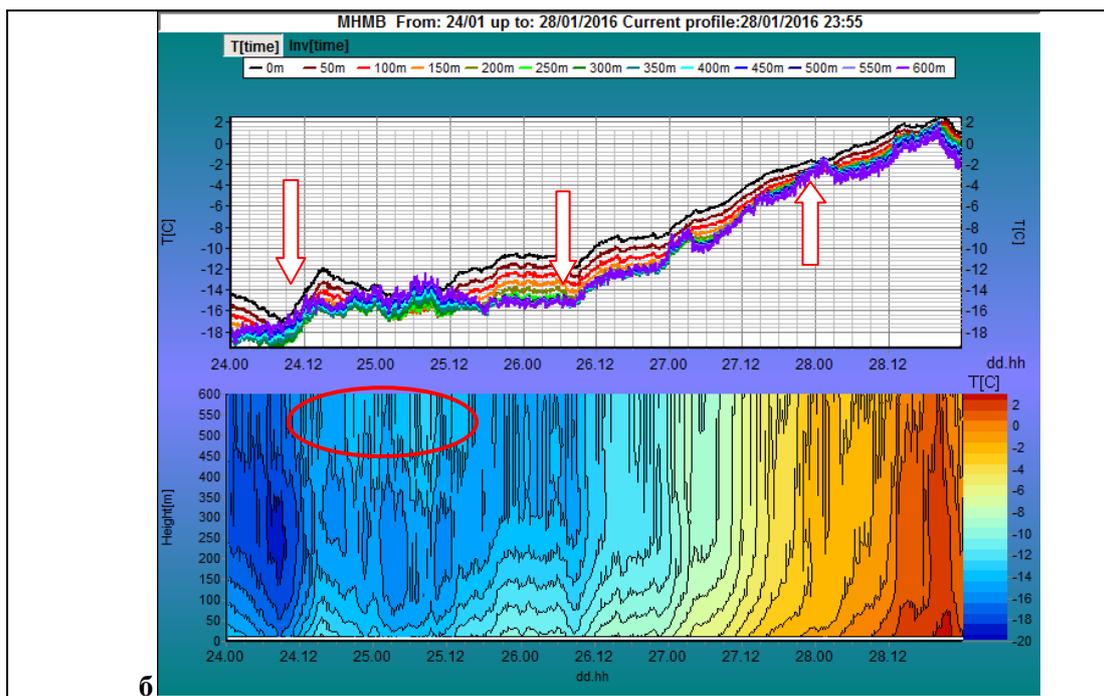


Рис. 6. Два типа синоптического процесса а) стационарный со сменой воздушной массы после прохождения зоны холодного фронта (август), б) смена морозной погоды на оттепель (январь)

стационарного синоптического процесса с ночной инверсией (красная стрелка) и выраженным суточным ходом температуры с максимальным прогревом после полудня всего АПС к адвекции холодного воздуха после прохождения зоны атмосферного фронта (обозначено синим контуром), внутри которой происходит интенсивное перемешивание воздуха, способствующее практически выравниванию температуры. «Скачки» температуры указывают на сложные вертикальные движения внутри зоны атмосферного фронта. Данные МТР-5 отражают и прохождение полосы неустойчивости за 2-3 часа до приближения основного фронта, и трудно различимый с применением стандартных средств мониторинга процесс смены знака адвекции (с холода на вынос тепла), показанный зеленой стрелкой на рис. 6а.

На рис.6.б показан процесс аномального потепления в январе: 15-ти градусные морозы сменились оттепелью; три волны адвекции теплого воздуха показаны белыми стрелками. Особенно ценно то, что начало ослабления морозов было зафиксировано по данным МТР-5 в самом начале процесса, когда в приземном слое еще сохранялся выхолаженный воздух, а в верхних слоях уже фиксировалась адвекция теплого воздуха (красный контур на рис. 6.б).

Примеров идентификации процессов в АПС, указывающих на предстоящие изменения в характере погоды, не отражаемые в данных наземных метеорологических измерениях – много [1]. Приобретение навыков работы с данными МТР-5 позволяет с малой заблаговременностью выявлять признаки изменения погоды и оценивать возможность наступления неблагоприятных для очищения воздуха метеоусловий (НМУ). Инверсии температуры являются ключевой составляющей таких событий. Но под воздействием городской среды образование задерживающего инверсионного слоя в городе – многофакторный процесс.

Термический режим атмосферного пограничного слоя в большом городе формируется под влиянием прямых и скрытых потоков тепла, исходящих от подстилающей городской поверхности (дороги, здания и др. сооружения), потерь промышленного и бытового тепла, прямых выбросов в атмосферу, а также под

влиянием воздействующих на радиационные процессы выбросов в атмосферу загрязняющих веществ. При сравнении повторяемости температурных инверсий любого вида, установленных с использованием данных измерений приборами МТП-5 выявлено, что в центре Москвы инверсии температуры формируются в 3 раза реже, чем в ближнем пригороде. А среднее отношение частоты образования инверсии на территории вне влияния московского мегаполиса (Обнинск), пригороде (Долгопрудный) и в центре Москвы (Красная Пресня): 4:3:1.

Заключение

Более чем десятилетний опыт использования микроволновых температурных профиломеров в московском регионе показал, что их данные являются исключительно полезными и востребованными как в задачах совершенствования прогноза различных метеорологических явлений и прогноза распространения загрязнений в городе, так и в фундаментальных научных задачах физики атмосферы. Организация и многолетние измерения профилей температуры приборами МТП-5 в разнесенных пунктах (центр, пригород) в Московском регионе позволили получить своего рода уникальные данные о термической структуре городского АПС и ее динамики под воздействием процессов синоптического и городского масштаба. Результаты сравнений синхронизированных измерений температурных профилей в центре мегаполиса и в ближнем пригороде являются основой для установления степени антропогенного влияния на термическое поле городского АПС, выявления сезонных и внутрисуточных особенностей этого влияния. Более подробно эти вопросы изложены в новом справочном пособии [1].

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 14-05-0038).

Литература

1. Кадыгров Е.Н., И.Н. Кузнецова. Методические рекомендации по использованию данных дистанционных измерений профилей температуры в атмосферном пограничном слое микроволновыми профиломерами: теория и практика. Долгопрудный, Изд. «Физматкнига», 2015, с. 171.
2. Троицкий А.В. Дистанционное определение температуры атмосферы из спектральных радиометрических измерений в линии λ 5 мм // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1986. Т. 29. № 8. С. 878-887..
3. Кутуза Б.Г., М.В.Данилычев, О.И.Яковлев. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. Москва, Изд.ЛЕНАНД, 2015,с.333.
4. Караваев Д.М., Г.Г.Щукин. Современное состояние и перспективы применения микроволновой радиометрии атмосферы// Оптика атмосферы и океана, 2015, т.28, №12, с.1122-1127.
5. Кадыгров Е.Н., А.Г.Горелик, Е.А.Миллер, В.В.Некрасов, А.В. Троицкий, Т.А.Точилкина, А.Н.Шапошников. Результаты мониторинга термодинамического состояния тропосферы многоканальным микроволновым радиометрическим комплексом //Оптика атмосферы и океана, 2013, т.26, № 6, с.459-465.
6. Kadygrov E.N., Pick D.R. The potential for temperature retrieval from an angular-scanning single-channel microwave radiometer and some comparisons with in situ observations.// Meteorological Applications, 1998, V.5, Issue 4, P. 393-404.
7. Kadygrov E.N., Shur G.N., and Viazankin A.S. Investigation of atmospheric boundary layer temperature, turbulence, and wind parameters on the basis of passive microwave remote sensing.// Radio Science, 2003,V. 38, No 3, P. Mar 13-1÷13-12.

8. Westwater E.R., Han Y., Irisov V.G., Levskiy V., Kadygrov E.N., Viazankin A.S. Remote sensing of boundary layer temperature profiles by a scanning 5-mm microwave radiometer and RASS: Comparison Experiments.// *Journal of Atmosp., and Ocean. Techn.*, 1999, V. 16, July, P. 805-818.9. 9.
9. Кадыгров Е.Н. Микроволновая радиометрия атмосферного пограничного слоя - метод, аппаратура, результаты измерений.// *Оптика атмосферы и океана*, 2009, т.22, № 7, с.697-704.
10. Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н., академик Голицын Г.С. Остров тепла в пограничном слое атмосферы над большим городом: новые результаты на основе дистанционных данных.// *Доклады Академии Наук*, 2002, том 385, № 4, с.541-548.
11. Кузнецова И.Н., Хайкин М.Н., Кадыгров Е.Н. Влияние городской среды на температуру в пограничном слое атмосферы по данным микроволновых измерений в Москве и окрестностях. // *Изв. РАН, ФАО*, 2004, т. 40, № 5, с. 678-688.
12. Khaikine M.N., I.N. Kuznetsova, E.N. Kadygrov, E.A. Miller. Investigation of thermal-spatial parameters of an urban heat island on the basis of passive microwave remote sensing.// *Theoretical and Applied Climatology*, 2006, vol. 84, N 1-3, pp. 161-169.
13. Кузнецова И.Н., Е.Н. Кадыгров, Е.А. Миллер, М.И. Нахаев. Характеристики температуры в нижнем 600-метровом слое по данным дистанционных измерений приборами МТП-5// *Оптика атмосферы и океана*, 2012, т.25, № 10, с. 877-883.