

Микроволновая радиометрия атмосферного пограничного слоя — метод, аппаратура, результаты измерений

Е.Н. Кадыгров*

ГУ «Центральная аэрологическая обсерватория»
141700, г. Долгопрудный Московской обл., ул. Первомайская, 3

Поступила в редакцию 21.01.2009 г.

Представлены результаты, полученные в период с 1993 по 2008 г. по разработке метода и аппаратуры для исследования термического режима атмосферного пограничного слоя (АПС). Метод основан на применении собственного теплового излучения молекулярного кислорода на частоте 60 ГГц (длина волны 5 мм) с помощью микроволнового сканирующего радиометра. Метод реализован в автоматизированных температурных профиломерах МТП-5, прошедших международные сравнения, сертифицированных Росгидрометом и Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии и внесенных в Государственный реестр средств измерений. Приводятся примеры использования микроволновых профиломеров в комплексных экспериментах по исследованию атмосферного аэрозоля, включая аридные районы и случаи задымленности крупных городов, по исследованию городского острова тепла, по использованию особенностей термического режима АПС в горной местности, над водными поверхностями, во время двух полных солнечных затмений (2006 и 2008 г.), на Антарктическом плато. Сделан анализ преимуществ и недостатков метода исследования АПС с помощью микроволновых радиометров по сравнению с другими методами, как дистанционными, так и контактными.

Ключевые слова: микроволновый радиометр, атмосферный пограничный слой, температурная стратификация.

Введение

Наряду с развитием в последние десятилетия оптических и акустических методов исследования атмосферы все более широкое применение находят радиофизические методы, связанные с возможностями оперативного и непрерывного получения информации в любое время суток и практически при любых метеорологических условиях. Радиофизические методы по принципу действия подразделяются на активные (радиолокационные) и пассивные (радиометрические или радиотеплолокационные) [1]. Радиометрические методы зондирования атмосферы основаны на приеме ее собственного (теплового) излучения и на связи радиохарактеристик этого излучения (интенсивность, ослабление, поляризация и т.д.) с физическими параметрами среды [2, 3].

В последние годы вместо используемого ранее термина «СВЧ-радиометрия» более общим стал термин «микроволновая радиометрия». Под микроволновым диапазоном обычно понимают диапазон радиоволн с частотами от 3 до 300 ГГц (что соответствует длинам волн от 100 до 1 мм, или волновым числам от 10 до $0,1 \text{ см}^{-1}$).

Особенностью микроволнового излучения атмосферы является чувствительность его радиохарактеристик к большому числу физико-химических параметров: температуре, влажности, водности облаков,

давлению, газовому составу, турбулентности [2, 4]. В микроволновом диапазоне волн поглощение в чистой (безоблачной) атмосфере обусловлено лишь молекулами, которые имеют дипольные моменты [5]. Из основных газов атмосферы электрический дипольный момент имеет молекула водяного пара H_2O и магнитный — молекула кислорода O_2 [2, 5].

Преимущественная роль этих газовых компонентов в поглощении (излучении) микроволнового излучения связана также с их высоким содержанием в атмосфере — относительная концентрация молекулярного кислорода в тропосфере и стратосфере составляет 20,95%, а относительная концентрация водяного пара в приземном слое может достигать 4%. В микроволновом диапазоне имеются две вращательные линии H_2O , центрированные к длинам волн 1,35 см и 1,64 мм, 49 линий O_2 , центрированных к длине волны 5 мм, и одиночная линия O_2 , центрированная к длине волны 2,53 мм [2, 5, 6] (рис. 1).

Для дистанционного зондирования профилей температуры атмосферы было предложено использовать прием собственного теплового излучения атмосферы на частотах вблизи 60 ГГц (длина волны 5 мм) [3, 5, 7–9]. При этом возможно использование трех способов измерений: частотный способ (измерение теплового радиоизлучения на ряде длин волн, расположенных на склоне полосы $\lambda = 5 \text{ мм}$ при фиксированном угле наблюдений); угловой способ (на одной частоте при различных зенитных углах); комбинированный способ (на ряде длин волн и углов) [5, 8, 10, 11].

* Евгений Николаевич Кадыгров (src_attex@mtu-net.ru).

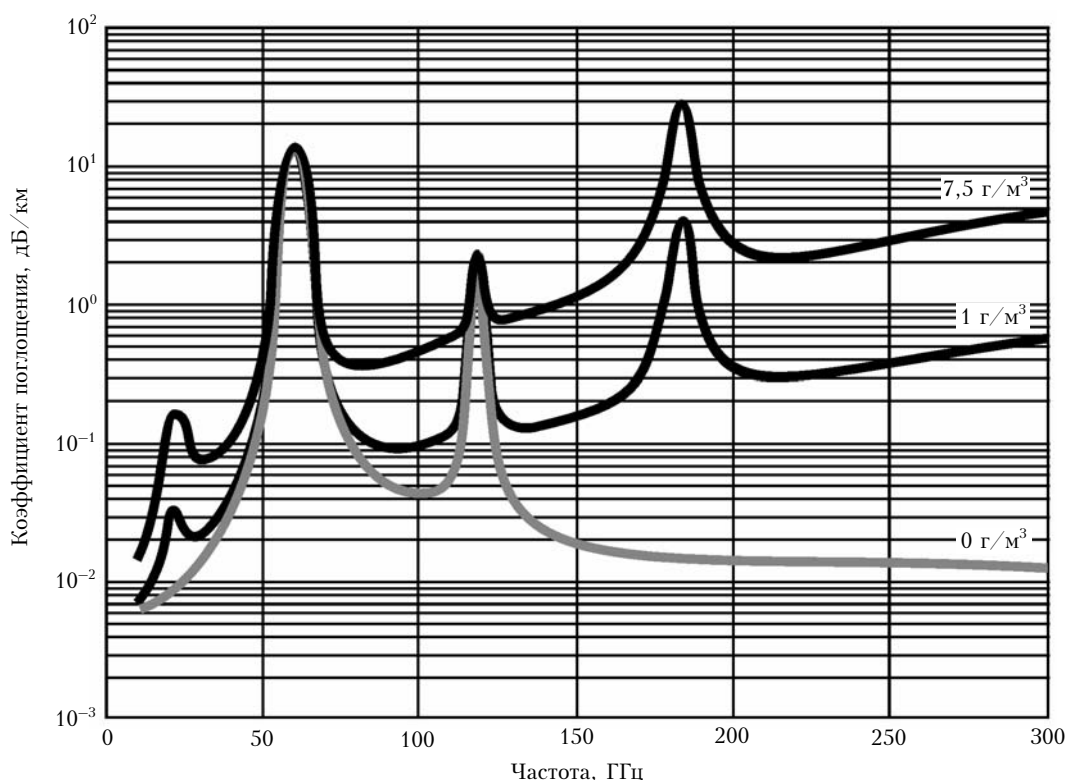


Рис. 1. Поглощение радиоволн микроволнового диапазона в молекулярном кислороде и водяном паре (при различных концентрациях водяного пара)

Исторически первоначально большее развитие получили частотный способ, который использовался для наземного и спутникового измерений профилей температуры тропосферы, и комбинированный – в основном для спутниковых измерений [1, 9, 11–14]. Однако если измерения профилей температуры тропосферы развивались успешно, то измерения профилей температуры атмосферного пограничного слоя (АПС) были невозможны со спутников и вызывали большие сложности при наземном зондировании с использованием частотного способа измерений из-за плохого вертикального разрешения и сложности учета влияния изменчивости концентрации водяного пара [14]. При этом АПС играет важнейшую роль во взаимодействии атмосферы с земной поверхностью, близость которой обуславливает исключительное разнообразие типов профилей температуры: адиабатический, приземные инверсии, приподнятые инверсии. Их мониторинг способствует решению целого ряда прикладных задач: исследованию эмиссии газов с земной поверхности, исследованию аэрозолей, городского острова тепла, кроме того повышает точность прогнозирования опасных метеорологических явлений, загрязнений в городах и крупных промышленных объектах, а также прогнозирования распространения радиоволн.

Стандартные методы измерений с помощью контактных датчиков (радиозонды, привязные аэростаты) не обеспечивают непрерывности измерений, ра-

бота лидара ограничена метеорологическими условиями, высотные метеорологические мачты имеют очень высокую стоимость, в связи с этим в конце XX в. весьма актуальным стал вопрос создания компактной, всепогодной и желательно автоматически работающей аппаратуры для измерения профилей АПС. Хотя в ряде работ и были сделаны теоретические оценки возможности использования микроволновой радиометрии для измерения профилей температуры АПС [15, 16], но практическая реализация этого метода вызывала большие сложности в силу некоторых особенностей зондирования АПС: вариации интенсивности излучения на разных слоях АПС очень малы по сравнению с тропосферой и поэтому чувствительность радиометрического приемника должна быть очень высокой (менее чем 0,1 К при постоянной времени интегрирования 1 с); антенная система должна иметь низкий уровень боковых лепестков (примерно –30 дБ); сложности решения обратной задачи (восстановления профилей температуры по измеренным радиационным характеристикам) возникали из-за сильной изменчивости и большого разнообразия типов температурных профилей в АПС; измерительный прибор должен быть компактным, переносным, легко калибруемым и всепогодным. Преодолению этих трудностей при разработке метода, измерительной аппаратуры, сравнении, сертификации и использовании данных в различных приложениях исследования АПС и посвящена данная статья.

Особенности термического зондирования АПС методом микроволновой радиометрии

Использование дистанционных радиофизических методов зондирования земной атмосферы по ее собственному (тепловому) излучению основано на решении интегрального уравнения переноса энергии радиоизлучения в поглощающей среде с конкретной геометрией и на знании условий взаимодействия микроволнового излучения с атмосферой. Известно, что поле излучения характеризуется рядом величин, основной из которых является интенсивность излучения. Для атмосферы, находящейся в состоянии термодинамического равновесия (до высот $h < 90$ км), при отсутствии рассеяния в микроволновом диапазоне, где $h\nu \ll kT$ и справедливо приближение Рэлея–Джинса для функции Планка, уравнение переноса излучения имеет вид [1, 2]:

$$\frac{dI_\nu}{dl} = -\gamma_\nu I_\nu + \frac{2k\nu^2}{c^2} \gamma_\nu T, \quad (1)$$

где I_ν – интенсивность излучения; γ_ν – коэффициент поглощения; ν – частота; dl – элемент пути. Проводя интегрирование (1) по траектории распространения волны при граничных условиях $I_\nu(0) = 0$ и $I_\nu(\infty) = I_\phi$, получаем выражение для спектральной интенсивности нисходящего радиоизлучения атмосферы при наблюдении с поверхности Земли в данном направлении [5, 9, 11]:

$$I_\nu = \frac{2k\nu^2}{c^2} \int_0^\infty T(l) \gamma_\nu(l) \exp\left[-\int_0^l \gamma_\nu(l') dl'\right] dl + I_\phi \exp\left[-\int_0^\infty \gamma_\nu(l) dl\right]. \quad (2)$$

В качестве исходной величины для получения физической информации в радиодиапазоне обычно используется радиояркостная температура исследуемого тела (атмосферы) T_ν , под которой понимается температура гипотетического абсолютно черного тела, излучение которого интенсивностью I_ν в данном направлении равно излучению атмосферы, т.е.

$$T_\nu = c^2 I_\nu / (2k\nu^2). \quad (3)$$

Для плоскостной модели атмосферы $dl = dh/\cos\theta$ выражение (2) в терминах яркостной температуры принимает вид:

$$T_\nu = \frac{1}{\cos\theta} \int_0^\infty T(h) \gamma_\nu(h) \exp\left[-\frac{1}{\cos\theta} \int_0^h \gamma_\nu(h') dh'\right] dh + T_\phi \exp\left[-\frac{\tau_0}{\cos\theta}\right], \quad (4)$$

где $\tau_0 = \int_0^\infty \gamma_\nu(h) dh$ – полное вертикальное поглощение

в атмосфере; θ – зенитный угол. В окнах прозрачности атмосферы плоскостное приближение выполняется для интервала углов $\theta = 0 \div 85^\circ$, а в областях резонансов поглощения атмосферных газов справедливо во всем диапазоне зенитных углов [2, 9, 11].

Для практических расчетов интегрирование (4) выполняется до высоты H , при которой значение интеграла (4) практически не отличается от его значения для случая бесконечного верхнего предела. При зондировании пограничного слоя атмосферы $H = 3$ км [16]. Вклад фонового члена $T_\phi \exp(-\tau_0/\cos\theta)$ в (4) в резонансных областях поглощения из-за большого τ_0 пренебрежимо мал и может не учитываться, тогда

$$T_\nu = \frac{1}{\cos\theta} \int_0^H T(h) \gamma_\nu(h) \exp\left[-\frac{1}{\cos\theta} \int_0^h \gamma_\nu(h') dh'\right] dh. \quad (5)$$

Расчет коэффициента поглощения молекулярного кислорода проводится по различным методикам [6, 7, 19], но наиболее широко используется формула Розенкранца с учетом интерференции спектральных линий в полосе O_2 , центрированной к длине волны 5 мм:

$$\gamma_{O_2} = 0,1820\nu \left(S_0 F_0'' + \sum_n S_n F_n'' \right), \quad (6)$$

где γ_{O_2} – в дБ/км; n – порядковый номер резонансных частот O_2 (подробно метод описан в [18]).

Количественный вклад температуры различных высотных слоев в радиоизлучение характеризуется ядром уравнения (5), имеющим вид:

$$K(\nu, \theta, h) = \frac{1}{\cos\theta} \gamma_\nu(h) \exp\left[-\frac{1}{\cos\theta} \int_0^h \gamma_\nu(h') dh'\right]. \quad (7)$$

При зондировании профилей температуры атмосферы в микроволновых полосах поглощения кислорода функция (5) имеет вид интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода и в общем виде записывается как

$$T_\nu(\theta, \nu) = \int_0^H K(h, \nu) T(h) dh, \quad (8)$$

где $K(h, \nu)$ – ядро интегрального уравнения; $T(h)$ – искомое решение. Некорректность решаемой задачи ведет к неустойчивости решения. Построение устойчивого решения (8) основывается на использовании дополнительной априорной информации об искомом решении, т.е. о профиле температуры $T(h)$. Наиболее широкое распространение из методов решения обратных задач дистанционного зондирования атмосферы получили метод статистической регуляризации [11], метод регуляризации Тихонова [14, 16], регрессионный метод [8, 11]. Как показали результаты численных экспериментов, в случае измерения профилей температуры АПС для устойчивого восстановления $T(h)$ необходимо иметь приведенную чувствительность радиометра не хуже 0,1 К [4, 9, 16, 17].

Чувствительность микроволнового радиометра определяется формулой [7]:

$$\Delta T = k \frac{T_{\text{ш}} + T_{\text{АТМ}}}{\sqrt{\Delta f \tau}}, \quad (9)$$

где k — коэффициент, зависящий от типа схемы радиометра ($k = 0,7 \div 1,0$); $T_{\text{ш}}$ — собственная шумовая температура радиометра; $T_{\text{АТМ}}$ — температура окружающей среды ($T \approx 300$ К); Δf — ширина полосы пропускания радиометра; τ — постоянная времени интегрирования. Из этой простой формулы видны пути создания сверхчувствительного микроволнового радиометра: оптимизация схемы радиометра, улучшение его шумовых характеристик, увеличение ширины полосы пропускания и времени наблюдений.

Для создания профиломера АПС принципиальным было решение о резком увеличении полосы пропускания: если в тропосферных профиломерах использовались частоты на склоне линии поглощения, то нами был выбран угломестный метод с использованием одной частоты в центре поглощения (частота 60 ГГц) [16, 17]. Это позволило увеличить полосу поглощения с 250 МГц до 4 ГГц (так как в районе 58–62 ГГц коэффициент поглощения молекулярного кислорода практически не зависит от частоты) [8, 10]. При этом толщина слоя атмосферы, формирующего излучение («скин-слой»), $H_{\text{в}} \approx 300$ м (в этом слое формируется 63% интенсивности излучения, а в двойном «скин-слое», равном 600 м, — уже 87% излучения).

Таким образом, можно считать, что в принимаемом на различных углах излучении на частоте 60 ГГц содержится информация о температуре $T(h)$ в слое $0 \div 600$ м [16]. Отпала также необходимость в синхронных измерениях поглощения в водяном паре и облаках, так как поглощение молекулярного кислорода на этой частоте на порядки выше.

Для оценки возможностей разработанного метода измерения профилей температуры АПС по высотному разрешению и минимально обнаруживаемым вариациям температуры на разных высотах служат весовые функции исходного интегрального уравне-

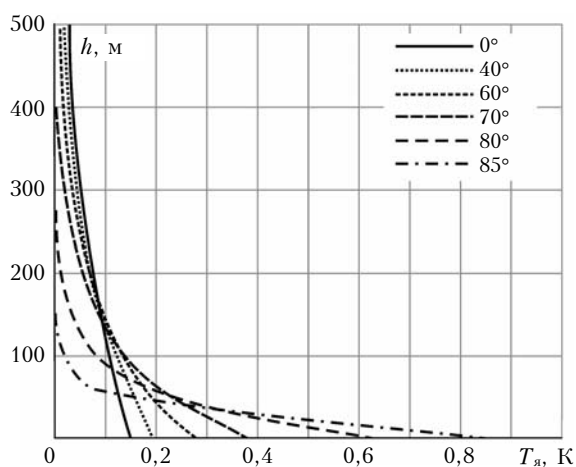


Рис. 2. Весовые функции при угловом методе зондирования с поверхности Земли

ния (5). На рис. 2 приведен пример таких весовых функций, рассчитанных для изменений температуры на $\Delta T = 1$ К для слоя атмосферы толщиной 100 м [16, 17].

Микроволновый температурный профиломер и результаты сравнений рассматриваемого метода с другими методами

Первый экспериментальный образец микроволнового измерителя профилей температуры АПС (названный МТП-5) был сделан в 1989 г. на основе созданного в ИКИ РАН компактного твердотельного радиометра, используемого в Центральной аэрологической обсерватории (ГУ «ЦАО») в экспериментах по измерению профилей температуры стратосферы с борта высотных аэростатов [16, 17]. К обработке данных и анализу были также привлечены специалисты Научно-исследовательского радиофизического института (НИРФИ) [16, 17].

Первые измерения были проведены летом 1989 г. на полевой экспериментальной базе ЦАО (г. Рыльск Курской области) с использованием привязного аэростата с датчиками температуры для сравнений. В 1992 г. был создан первый опытный образец профиломера, который прошел успешные испытания как в ЦАО, так и в полевых условиях (Кольский п-ов, оз. Имандра; Якутия, алмазный карьер Удачный) [4]. В ноябре–декабре 1993 г. были проведены первые международные сравнения (Кардингтон, Великобритания) с радиозондами и привязными аэростатами [17]. В 1994–2000 гг. был проведен цикл международных сравнений с высотными мачтами (Цукуба, Япония; Боулдер, США; Обнинск, Россия), привязными аэростатами (ст. Покер-Флат, США; Рим, Италия), радиозондами (п. Кларо, Швейцария; ст. Конкордия, Антарктида), лидарами (Цукуба, Япония) [4, 14, 17, 20, 29]. Некоторые результаты сравнений приведены в таблице.

Результаты сравнений данных микроволновых профиломеров с данными радиозондов и высотных метеорологических мачт

Год	Город, страна	Число профилей	СКО, °С
1993	Кардингтон, Великобритания	13	0,6
1994	Долгопрудный, Россия	71	0,6
2004	Пайерне, Швейцария	63	0,85
1996	Боулдер, США	100	0,7
1999	Обнинск, Россия	453	0,7
2005	Цукуба, Япония	1871	0,77

Профиломер МТП-5 был сертифицирован Росгидрометом и Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии и внесен в Государственный реестр средств измерений. Были созданы несколько модификаций прибора: стационарный, полярный, мобильный, морской (рис. 4).

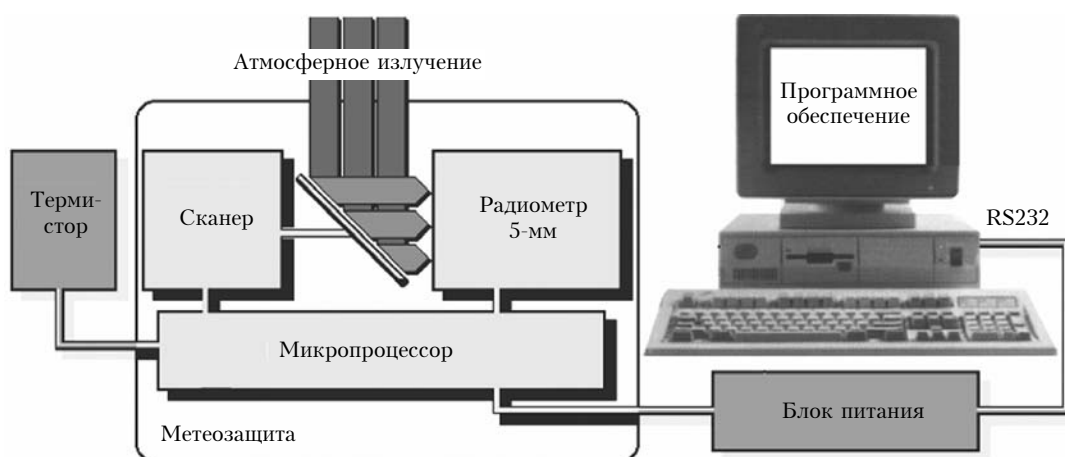


Рис. 3. Структурная схема микроволнового температурного профилера МТП-5

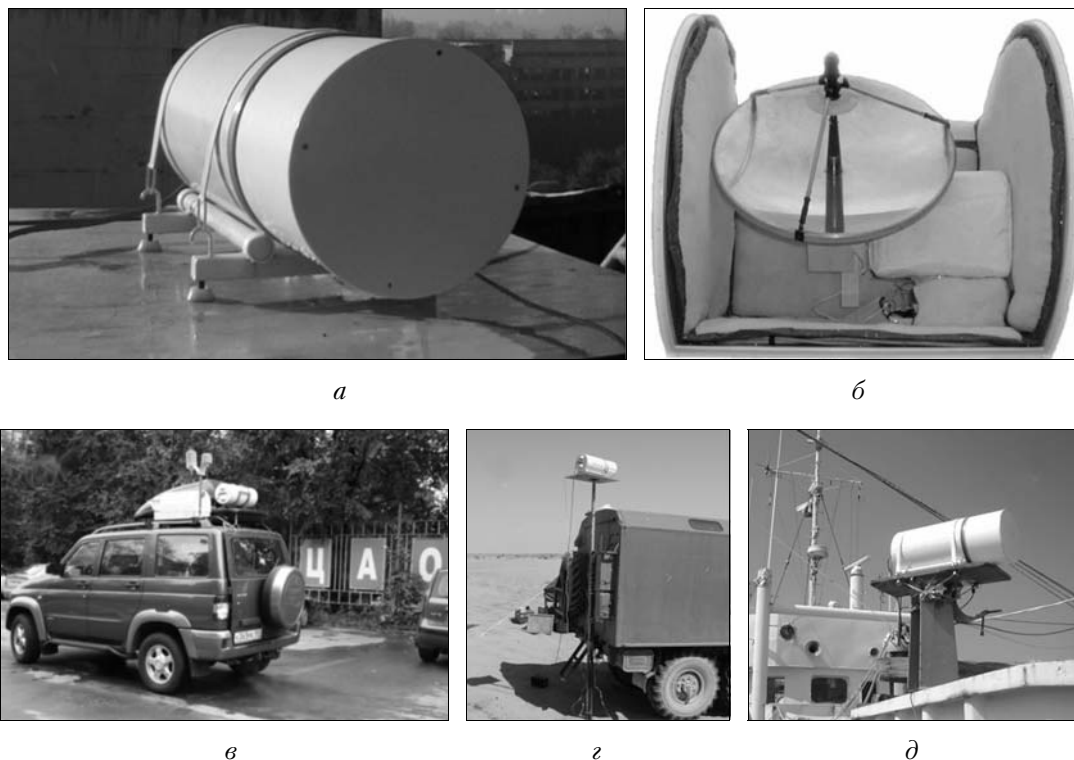


Рис. 4. Разновидности микроволновых температурных профилеров МТП-5: *а* – стационарный вариант; *б* – полярная версия; *в* – мобильная версия; *г* – версия для работы в аридных районах; *д* – морская версия

Основными частями прибора являются радиометрический приемник, сканирующая антенная система с использованием специальной антенны с низким уровнем боковых лепестков (скалярный рупор Томсона или двухмодовый облучатель Томсона с параболическим зеркалом), микропроцессор, управляющий компьютер с программами приема, калибровок, контроля параметров и обработки информации, система метеозащиты (рис. 3). Ниже приведены основные технические характеристики стационарного профилера МТП-5.

Диапазон высот измерения профиля температуры	0–600 м
Приведенная чувствительность	0,05 К
Темп измерений	300 с
Время измерения профиля	120 с
Шкала выдачи данных о температуре по высоте	50 м
Точность измерений	0,2–0,7 °С
Масса аппаратуры	20 кг
Температурный диапазон	–40 ... +40 °С
Потребляемая мощность	40 Вт

Всего на момент декабря 2008 г. было изготовлено более 50 профиломеров МТП-5, которые используются как в России (Москва, С.-Петербург, Нижний Новгород, Оренбург, Челябинск, Красноярск, Новосибирск, Самара, Астрахань, Уфа, Норильск), так и в других странах (США, Италия, Япония, Испания, Швейцария, Нидерланды, Франция, Китай, Тайвань).

Использование данных микроволновых профиломеров

Благодаря своим высоким эксплуатационным качествам (полностью автоматический режим работы, включая калибровки; компактность, мобильность, всепогодность, непрерывность измерений) микроволновые профиломеры МТП-5 нашли в последние годы (2000–2008) весьма широкое применение. Прежде всего, они используются специалистами Росгидромета для улучшения краткосрочного прогноза погоды, прогноза опасных метеорологических явлений (туман, гололед), прогноза загрязнений [4, 19, 21, 23].

Тот факт, что приборы являются приемниками излучения и сами ничего не излучают, позволил с их помощью впервые подробно исследовать вертикальную структуру городского острова тепла,

получить количественные характеристики температурных инверсий над крупными городами – суточные, сезонные, межгодовые [19, 21, 23, 24]. Были получены уникальные данные об особенностях термического режима городского АПС во время лесных пожаров под Москвой, при этом проводились синхронные измерения аэрозоля [25]. Использовались температурные профиломеры и во время комплексных экспедиций по исследованию аэрозолей и термического режима АПС в горной местности [28–30]. В 2007–2008 гг. температурные профиломеры впервые стали использоваться во время комплексных экспедиций в аридные регионы в жаркий период времени, были получены непрерывные данные об изменчивости термического режима АПС аридных регионов в различных синоптических ситуациях [23]. Специальные версии профиломеров использовались на вагоне-лаборатории во время международного эксперимента TROICA, а также в прибрежных зонах Черного моря и оз. Байкал [4].

Полярная версия прибора (МТП-5П) более года работала на франко-итальянской станции Конкордия, расположенной на Антарктическом плато. Были получены уникальные данные в экстремально низких температурах, используемые при исследованиях кататических ветров в Антарктиде [20]. Пример температурного профиля над Антарктическим плато приведен на рис. 5, а.

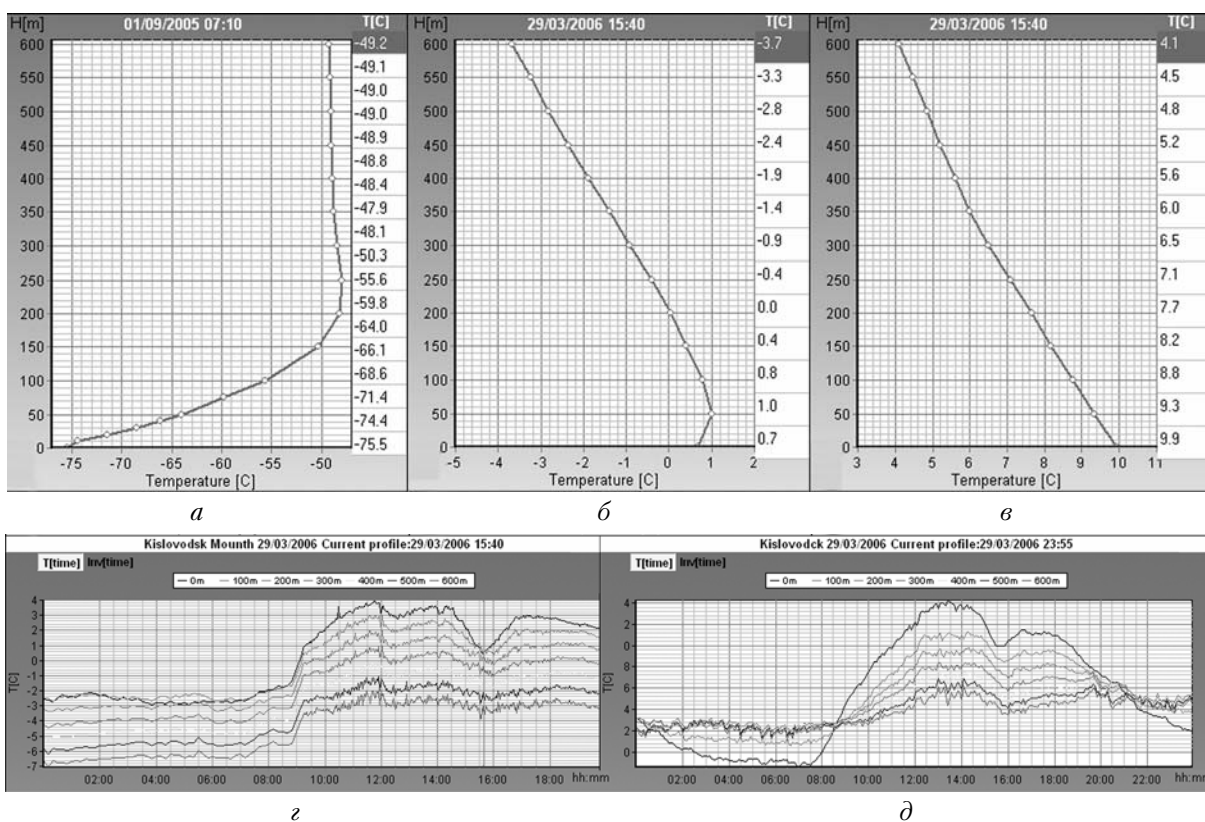


Рис. 5. Примеры данных о термическом режиме АПС, полученных с помощью микроволновых температурных профиломеров: а – типичный профиль температуры над Антарктическим плато; б – профиль температуры в момент полного солнечного затмения 2006 г. на высокогорной станции в 18 км севернее г. Kislovodsk (2100 м над уровнем моря); в – профиль температуры в момент полного солнечного затмения в г. Kislovodsk (900 м над уровнем моря); г – ход температуры на разных высотах; д – ход температуры на разных высотах над г. Kislovodском

Впервые микроволновые профиломеры были использованы во время солнечного затмения в гг. Кисловодске (2006 г.) и Новосибирске (2008 г.) [25]. На рис. 5, б представлен ход температур на разных высотах АПС во время полного солнечного затмения, полученный с помощью синхронных измерений двумя профиломерами МТП-5, один из которых был установлен на высокогорной станции (2100 м над уровнем моря), а второй в Кисловодске (900 м над уровнем моря) [26]. В 2008 г. профиломер МТП-5 был модернизирован: в связи с использованием новейших СВЧ-усилителей вместо супергетеродинного приемника был создан приемник прямого усиления, что увеличило высоту зондирования до 1000 м и повысило надежность прибора [30].

Заключение

В ряду дистанционных метеорологических инструментов появился новый тип приборов — микроволновые температурные профиломеры, дающие возможность осуществлять мониторинг термического режима АПС. Основными достоинствами этих профиломеров являются: всепогодность, непрерывность измерений, автоматический режим работы, автоматические калибровки, компактность и мобильность, отсутствие собственного излучения, к недостаткам следует отнести ограниченную высоту зондирования (1000 м) и недостаточно высокое вертикальное разрешение (по сравнению с лидарами и радиозондами).

Разработка метода, экспериментальной аппаратуры, проведение сравнений, сертификации, обеспечение внедрения невозможны без участия большого количества специалистов самых разных специальностей. В данном случае кроме специалистов лаборатории дистанционного зондирования ГУ ЦАО активное участие в работе принимали также группы специалистов из ИКИ РАН (г. Москва) под руководством И.А. Струкова, из НИРФИ (г. Нижний Новгород) под руководством А.В. Троицкого, из Гидрометеорологического центра РФ (г. Москва) под руководством И.Н. Кузнецовой.

Успеху работы прямо или косвенно способствовали такие известные специалисты в области радиофизики и физики атмосферы, как А.А. Черников, Ю.В. Мельничук, Г.А. Кокин, Г.Н. Шур, А.Г. Горелик, А.А. Иванов (ГУ «ЦАО»); Г.С. Голицын, Г.И. Горчаков, Н.Ф. Еланский, М.А. Калистратова, Б.М. Копров (ИФА РАН); А.П. Наумов, С.А. Жеванкин, К.П. Гайкович (НИРФИ); В.Е. Зуев, М.В. Панченко (ИОА СО РАН); Г.Г. Щукин (ГГО); Б.Г. Кутуза (ИРЭ РАН); А.С. Косов (ИКИ РАН); E. Westwater, B. Zak, H. Liebe, P. Rosenkranz (США); S. Argentini, G. Fiocco (Италия); M. Rotach (Швейцария); G. Inoue (Япония); V. Dieterink (Нидерланды); D. Pick, C. Lee (Великобритания).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 06-05-65288а, 06-05-79001к, 07-05-10003к, 08-05-00213а).

1. *Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K.* Microwave Remote Sensing, Active and Passive. V. 1. Microwave Remote

Sensing. Fundamentals and Radiometry. Reading, M.A.: Addison – Wesley, 1981. 543 p.

2. *Баширинов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т.* Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974. 188 с.
3. *Westwater E.R., Strand O.N.* Statistical information content of radiation measurements used in indirect sensing // *J. Atmos. Sci.* 1968. V. 25. N 6. P. 750–758.
4. *Kadyrov E.N., Shur G.N., Viazankin A.S.* Investigation of atmospheric boundary layer temperature, turbulence, and wind parameters on the basis of passive microwave remote sensing // *Radio Sci.* 2003. V. 38. N 3. P. Mar 13-1+13-12.
5. *Westwater E.R.* Ground-based microwave remote sensing of meteorological variables // *Atmospheric remote sensing by microwave radiometry* / Ed. M. Janssen. N.Y.: Wiley, 1993. 343 p.
6. *Liebe H.J.* MPM – an atmospheric millimeter wave propagation model // *Int. J. Infrared and Millimeter Waves.* 1989. V. 10. N 3. P. 331–350.
7. *Meeks M.L., Lilley A.E.* The microwave spectrum of oxygen in the Earth's atmosphere // *J. Geophys. Res.* 1963. V. 68. N 6. P. 1683–1703.
8. *Snider J.B.* Ground-based sensing of temperature profiles from angular and multi-spectral microwave emission measurements // *J. Appl. Meteorol.* 1972. V. 11. P. 958–967.
9. *Ершов А.Т., Наумов А.П.* К вопросу о восстановлении высотных профилей температуры по наземным наблюдениям атмосферного радиоизлучения в области $\lambda = 5$ мм // *Изв. вузов. Радиофиз.* 1974. Т. XVII. № 11. С. 1610–1625.
10. *Guldner J., Spankuch D.* Remote sensing of the thermodynamic state of the atmospheric boundary layer by ground-based microwave radiometry // *J. Atmos. and Ocean. Technol.* 2001. V. 18. N 9. P. 925–933.
11. *Троицкий А.В.* Дистанционное определение температуры атмосферы из спектральных радиометрических измерений в линии $\lambda = 5$ мм // *Изв. вузов. Радиофиз.* 1986. Т. 29. № 8. С. 878–887.
12. *Кадыров Е.Н., Кокин Г.А., Потанов А.А.* Приборы миллиметрового диапазона волн для исследования озонового слоя Земли // *Зарубеж. радиоэлектрон.* 1989. № 10. С. 52–66.
13. *Westwater E.R.* Ground-based passive probing using microwave spectrum of oxygen // *Radio Sci.* 1965. V. 69D. N 9. С. 1201–1215.
14. *Westwater E.R., Han Y., Irisov V.G., Lenskiy V., Kadyrov E.N., Viazankin A.S.* Remote sensing of boundary layer temperature profiles by a scanning 5-mm microwave radiometer and RASS: Comparison Experiments // *J. Atmos. and Ocean. Technol.* 1999. V. 16. N 7. P. 805–818.
15. *Cadeddu M.P., Peckham G.E., Gaffard C.* The vertical resolution of ground-based microwave radiometers analyzed through a multiresolution wavelet technique // *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.* 2002. V. 40. N 3. P. 531–540.
16. *Troitsky A.V., Gaykovich K.P., Kadyrov E.N., Kosov A.S., Gromov V.A.* Thermal sounding of the atmosphere boundary layer in oxygen absorption band center // *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.* 1993. V. 31. N 1. P. 116–120.
17. *Kadyrov 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 // *Meteorol. Applicat.* 1998. V. 5. Iss. 4. P. 393–404.
18. *Rosenkranz P.W.* Shape of the 5 mm oxygen band in the atmosphere // *IEEE Trans. Antennas and Propag.* 1975. V. AP-23. N 4. P. 498–506.

19. Власов А.А., Кадыгров Е.Н., Шапошников А.Н. Выбор модели расчета коэффициента поглощения кислорода для определения температурного профиля атмосферы по микроволновым измерениям с ИСЗ // Исслед. Земли из космоса. 1990. № 1. С. 36–39.
20. Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н., Голицын Г.С. Остров тепла в пограничном слое атмосферы над большим городом: новые результаты на основе дистанционных данных // Докл. РАН. 2002. Т. 385. № 4. С. 541–548.
21. Argentini S., Conidi A., Kadygrov E.N. Temperature measurements at Dome C using a new microwave temperature profiler // Proc. Conf. Italian Physical Society / Ed. M. Colacino. SIF, Bologna. 2004. V. 89. P. 215–227.
22. Кадыгров Е.Н., Колдаев А.В., Миллер Е.А., Соколов В.В., Хайкин М.Н. Исследование неоднородности острова тепла в г. Нижний Новгород с помощью мобильного дистанционного измерителя профилей температуры атмосферы // Метеорол. и гидрол. 2007. № 2. С. 54–66.
23. Kadygrov E.N., Agapov Yu.V., Folomeev V.V., Granberg I.G., Shaposhnikov A.N., Vorobyeva E.A. Observations of the feature of the atmospheric boundary layer thermal regime at the arid area in a hot season // Proc. WMO Tech. Confer. «On meteorological and environmental instruments and methods of observation (TECO-2008)». St. Petersburg, November 2008. Report N 96. WMO/TD N 1462. P. 1–8.
24. Khaikine M.N., Kuznetsova I.N., Kadygrov E.N., Miller E.A. Investigation of thermal-spatial parameters of an urban heat island on the basis of passive microwave remote sensing // Theor. and Appl. Climatol. 2006. V. 84. N 1–3. P. 161–169.
25. Хайкин М.Н., Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н. Влияние высокой концентрации аэрозоля на термическую структуру пограничного слоя атмосферы // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2006. Т. 42. № 6. С. 778–784.
26. Kadygrov E.N. Operational aspects of different ground-based remote sensing observing techniques for vertical profiling of temperature, wind, humidity and cloud structure: a review. WMO, 2006. IOM Report N 89. WMO/TD N 1309. Geneva, Switzerland. P. 1–34.
27. Горчаков Г.И., Кадыгров Е.Н., Исаков А.А., Карпов А.В., Миллер Е.А. Влияние солнечного затмения на термическую стратификацию и режим турбулентности // Докл. РАН. 2007. Т. 417. № 1. С. 90–93.
28. Воробьева А.А., Кадыгров Е.Н., Миллер Е.А., Троицкий А.В., Фоломеев В.В. Исследование термодинамических характеристик атмосферного пограничного слоя в горной местности // Тезисы докл. XV рабочей группы «Аэрозоли Сибири». Томск, 2008. С. 73.
29. Кадыгров Е.Н. Микроволновая радиометрия атмосферного пограничного слоя // Тезисы докл. XV рабочей группы «Аэрозоли Сибири». Томск, 2008. С. 72.
30. Rotach M.W., Calanca P., Graziani G., Gurtz J., Steyn D., Vogt R., Andretta M., Christen A., Cieslik S., Connolly R., De Wekker S., Galmarini S., Kadygrov E.N., Kadygrov V.N., Miller E.A., Neininger B., Rucker M., Van Gorsel E., Weber H., Weiss A., Zapra M. Turbulence structure and exchange processes in an alpine valley: The Riviera Project // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2004. V. 85. N 9. P. 1367–1385.
31. Кадыгров Е.Н., Колдаев А.В., Миллер Е.А., Мионов А.Ф., Некрасов В.В., Фоломеев В.В., Шапошников А.Н., Хайкин М.Н. Сканирующий радиометрический комплекс для измерения профилей температуры атмосферного пограничного слоя // Тр. XXII Всерос. научн. конф. «Распространение радиоволн» (РРВ-22). 2008. Ростов-на-Дону, п. Лоо. Т. III. С. 43–45.

E.N. Kadygrov. Microwave radiometry of atmospheric boundary layer: method, equipment, and applications.

Results of development of the microwave remote sensing method and technique for atmospheric boundary layer (ABL) temperature profile measurement conducted from 1993 to 2008 are presented. Method is based on the use of a scanning single wavelength of 5 mm (60 GHz) microwave radiometer to measure vertical temperature profiles up to 1000 m. Theoretical analyses of the scanning radiometer system are conducted, as well as results of comparison with in situ observations are presented. During the last 15 years microwave temperature profilers (MTP-5) were successfully used for identification of Moscow city heat island, for study of the ABL thermal regime in mountains, in arid regions, during total solar eclipses, in Antarctica, in several scientific field expeditions.