

УДК 551.501.8

## Наземные микроволновые температурные профилемеры: потенциал и реальность

Е.Н. Кадыгров, Е.В. Ганьшин, Е.А. Миллер, Т.А. Точилкина\*

*Центральная аэрологическая обсерватория  
141700, г. Долгопрудный Московской обл., ул. Первомайская, 3*

Поступила в редакцию 20.01.2015 г.

Дан анализ расчетных (потенциальных) и реальных (экспериментально подтвержденных) характеристик наземных микроволновых температурных профилемеров: точностные характеристики, вертикальное разрешение, калибровки. Показано, что в настоящее время наиболее широко используются сканирующие одноканальные профилемеры для измерения профилей температуры атмосферного пограничного слоя (например, МТР-5), а также многочастотные профилемеры для измерения профилей температуры тропосферы вплоть до высот 10 км (например, МР-3000А, РРG-НАТPRO, «Микрорадком»). Более подробно показаны результаты, полученные во время непрерывной работы комплекса «Микрорадком» с 1 января 2014 г. по 1 января 2015 г. в г. Долгопрудный Московской области.

*Ключевые слова:* микроволновая радиометрия, профили температуры, тропосфера, атмосферный пограничный слой; microwave remote sensing, temperature profiles, troposphere, atmospheric boundary layer.

### Введение

Температура является важнейшим параметром при описании ряда процессов, происходящих в атмосфере: термического режима, циркуляции, различных волн и т.д. Неслучайно наиболее распространена стратификация атмосферы по температурному признаку: тропосфера (0–15 км), стратосфера (15–55 км), мезосфера (55–85 км), термосфера (85–400 км), экзосфера (выше 400 км). Нижний слой тропосферы, высота которого в зависимости от широты изменяется от 100 до 1600 м, имеет специальное название – атмосферный пограничный слой (АПС) [1]. Традиционно для измерения профилей температуры использовались данные контактных температурных датчиков радиозондов, привязанных аэростатов, самолетов, высотных метеорологических мачт, а также данные дистанционных приборов: оптических (лидары), систем радиоакустического зондирования (RASS) [2]. В конце 50–60-х гг. начали развиваться дистанционные сверхвысокочастотные (СВЧ) радиометрические методы исследования атмосферы, в последние годы их чаще называют микроволновыми радиометрическими методами [3–7].

Радиометрические методы зондирования основаны на приеме собственного (теплого) излучения атмосферы в диапазоне миллиметровых волн и на взаимосвязи радиохарактеристик этого излучения (ослабления, интенсивности, поляризации и т.д.)

с физическими параметрами атмосферы. Использование нескольких (наиболее чувствительных) спектральных участков микроволнового диапазона дает возможность определения целого ряда физико-химических параметров атмосферы и, в частности, высотного распределения температуры, общего содержания водяного пара, интегрального содержания жидкой воды в облаках и ее температуры, содержания некоторых примесных газов [3].

В данной статье речь идет о радиометрических методах измерения профилей температуры тропосферы, основанных на приеме собственного теплового излучения молекулярного кислорода атмосферы Земли, имеющего ряд спектральных линий в области длин волн 5 мм (частота 60 ГГц), достаточно высокую относительную концентрацию (20,95%) и ее стабильность вплоть до высот 80 км. Собственное излучение молекулярного кислорода меняется с высотой в зависимости от температуры, что и дает возможность измерять температурные профили [3–8]. В связи с появлением искусственных спутников Земли в 60–70-е гг. XX в. начали разрабатываться различные спутниковые радиометрические приборы для измерения профилей температуры тропосферы, достаточно бурное развитие которых продолжается и в настоящее время [9–12]. В частности, были созданы надирные спутниковые микроволновые радиометры NEMS, SCAMS, MSU, SSM/T, AMSU, а также лимбовые микроволновые радиометры MLS, MAS, AMAS [9]. Появились в различных лабораториях и университетах мира и наземные микроволновые температурные профилемеры (например, швейцарский профилемер ASMUWARA), особенно для измерений в нижней тропосфере (ниже 3 км), где спутниковые

\* Евгений Николаевич Кадыгров (enkadygrov@gmail.com); Евгений Викторович Ганьшин; Евгений Алланович Миллер (tissary@gambler.ru); Татьяна Алексеевна Точилкина.

данные о профилях температуры получить не удавалось либо они имели очень низкую точность (в основном из-за влияния излучения земной поверхности и облачности) [6, 8]. Однако это были единичные экспериментальные экземпляры, и только в конце XX в. стали появляться серийные, коммерческие приборы. Так, в 1993 г. в России был создан серийный микроволновый радиометрический прибор МТП-5 для измерения профилей температуры АПС (в настоящее время более 80 таких профиломеров используются в разных странах мира), в США — прибор MP-3000A, обеспечивающий измерение профилей температуры тропосферы до высот 10 км, в Германии — примерно аналогичный профиломер RPG-HATPRO ([www.attex.net](http://www.attex.net), [www.radiometrics.com](http://www.radiometrics.com), [www.radiometers-physics.de](http://www.radiometers-physics.de)). В 2013 г. в России также был изготовлен серийный экземпляр многоканального микроволнового профиломера для измерения профилей температуры тропосферы и общего содержания водяного пара, получивший название «Микрорадком» [13]. Создаются в разных странах наблюдательные сети из этих приборов, накоплен достаточно большой опыт эксплуатации микроволновых температурных профиломеров, который показал, что не всегда совпадают реальные и паспортные (в рекламе) характеристики этих приборов, что и явилось одним из мотивов для написания данной статьи. Другой мотив — желание привлечь внимание специалистов, занимающихся исследованием различных аспектов фундаментальных и прикладных задач физики атмосферы (аэрозоль, перенос излучения в атмосфере, моделирование радиационных процессов в атмосфере, создание прогностических моделей и т.д.), к возможностям этого нового класса приборов, которые рекомендованы к широкому использованию Всемирной метеорологической организацией [2].

## Особенности микроволновых радиометрических измерений профилей температуры атмосферы

Использование методов пассивной радиолокации 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 [3]. Перенос микроволнового излучения в атмосфере Земли сопровождается его поглощением и рассеянием за счет взаимодействия с атмосферными газами и гидрометеорами (снег, дождь, облака).

При зондировании профилей температуры атмосферы в микроволновых полосах поглощения молекулярного кислорода выражение для измеренных радиоярких температур представляет собой интегральное уравнение Фредгольма I рода и в общем виде записывается как [3, 14]:

$$T_{\text{я}}(\theta, \nu) = \int_0^H K(h, \nu) T(h) dh + \Delta(\theta, \nu), \quad (1)$$

где  $\theta$  — зенитный угол наблюдения;  $\nu$  — частота принимаемого излучения;  $H$  — высота исследуемого слоя атмосферы;  $K(h, \nu)$  — ядро интегрального уравнения;  $T(h)$  — искомое решение;  $\Delta(\theta, \nu)$  — ошибка измерений. Некорректность решаемой задачи ведет к неустойчивости решения. Построение устойчивого решения (1) основывается на использовании дополнительной априорной информации об искомом решении, т.е. о профиле температуры  $T(h)$  [7, 14, 15]. Наиболее широкое распространение из методов решения обратных задач дистанционного зондирования атмосферы получили метод статистической регуляризации, итерационный метод, метод регуляризации Тихонова, регрессионный метод, метод нейронных сетей [8, 12, 15, 16]. Коэффициент поглощения молекулярного кислорода обычно рассчитывается по методике, изложенной в [16].

В профиломерах МТП-5 (Россия) и RPG-HATPRO (Германия) в основном используется метод статистической регуляризации с применением в качестве априорной информации автокорреляционных матриц температуры, построенных для соответствующих районов по данным радиозондирования, а в MP-3000A (США) — метод нейронных сетей. Метод нейронных сетей дает очень неплохие точности в случае его постоянной «подстройки» с помощью данных близко расположенной аэрологической станции и регулярных данных радиозондирования. При этом также появляется возможность контроля качества абсолютных калибровок, для этого берутся значения измеренных зондом температур атмосферы на разных высотах, по ним с использованием приближения Рэлея—Джинса рассчитываются радиояркие температуры и затем сравниваются с реально измеренными радиометром радиояркими температурами. Существуют три основных метода получения профилей температуры из наземных микроволновых радиометрических измерений [7]:

1) по измерениям теплового радиоизлучения на одной частоте при различных зенитных углах (угловой способ, используется в МТП-5);

2) по измерениям теплового радиоизлучения на ряде длин волн, расположенных на склоне полосы поглощения в диапазоне 5 мм при фиксированном угле (частотный способ);

3) по измерениям теплового радиоизлучения на ряде длин волн и углов (комбинированный способ, используется в RPG-HARPRO, MP-3000A и в «Микрорадком»).

Все перечисленные способы идентичны в смысле принципиальных возможностей и дают близкие результаты по точностным характеристикам. Угловой способ обладает наименьшей оперативностью, так как сканирование осуществляется последовательно, однако обеспечивает более высокое вертикальное разрешение в АПС атмосферы. Наиболее оперативен частотный способ при параллельном приеме на всех частотных каналах. Исходя из сказанного считаем, что комбинированный способ является компромиссным вариантом, позволяющим осуществить зондирование тропосферы [7].

Как всегда, любой метод измерений обладает своими достоинствами и недостатками. Метод микроволновой радиометрии – пассивный метод, т.е. прибор сам ничего не излучает, что позволяет использовать его внутри городов. Аппаратура является компактной, что предполагает возможность мобильных измерений. Измерения могут проводиться при наличии облачности, а микроволновый профилемер для АПС (например, МТП-5) обеспечивает измерения практически в любых метеорологических условиях. А вот главным недостатком является плохое вертикальное разрешение по сравнению с активными методами (лидар, RASS) и контактными датчиками радиозондов [2]. Еще один недостаток микроволновых температурных профилемеров – необходимость проведения абсолютных калибровок. Под этим понимается снятие зависимости значений радиоярких температур в градусах Кельвина на разных углах (или разных частотах) от измеренных значений антенных температур в милливольтгах [3, 7, 17, 18]. Хотя зависимость эта линейная, получить ее с необходимой точностью очень непросто, это в настоящее время одна из главных проблем в технике радиометрических измерений. Для этого применяют различные микроволновые мишени с использованием жидкого азота, внутренние шумовые генераторы [7, 17]. Берутся мишень или мишени, на которые направляется антенна радиометра, с двумя разными температурами, дающими «холодную» (обычно имеющую температуру жидкого азота  $T_1 = 77$  К) и «теплую» (например,  $T_2 = 293$  К) точки [7, 17]. Примерные оценки такие: при чувствительности современных радиометров в сотые доли градуса точность абсолютной калибровки должна быть не хуже  $1-2^\circ$ . При этом одно из главных требований к современным радиометрам – высокая стабильность калибровок [17, 18]. Рассмотрим особенности радиометров с применением угломестного и комбинированного методов измерений.

### Сканирующий угломестный микроволновый профилемер

Данный тип профилемеров в основном используется для измерения профилей температуры АПС [8, 18, 19]. При измерениях в АПС возникает ряд специфических сложностей. Во-первых, температурные контрасты невелики, контраст радиоярких температур от горизонта до зенита при измерениях на длине волны вблизи 5 мм не превышает обычно 2 К, что требует для получения профиля температуры чувствительности радиометра не хуже 0,1 К при постоянной времени интегрирования 1 с. Антенна должна иметь узкий луч, ширина диаграммы направленности антенны по уровню половинной мощности не должна быть более  $3^\circ$  и иметь сильное подавление боковых лепестков (не хуже  $-30$  дБ) [8, 19, 20]. В АПС существует гораздо большее разнообразие типов температурных профилей, чем в более высоких слоях тропосферы. Помимо адиа-

батических профилей здесь часто наблюдаются профили с инверсиями температуры – приземными, поднятыми, двойными [1]. Это вызывает значительные сложности при решении обратной задачи – восстановления профилей температуры в соответствии с уравнением (1).

Информацию о локальном профиле температуры АПС можно получить из климатической модели, немного уточнив ее за счет знания текущей приземной температуры и данных локального краткосрочного прогноза. Поэтому интерес к данным дистанционного зондирования может быть проявлен, если они будут существенно точнее моделируемой информации. Климатическая модель в основном базируется на данных радиозондирования. На практике выпуски радиозондов производятся в России каждые 12 ч. Этого явно недостаточно, чтобы обеспечить мониторинг температурных инверсий (в то время как микроволновый температурный профилемер может надежно измерять температурные профили каждые 2 мин и давать полную картину развития температурных инверсий).

Матричный подход к оценкам ошибок измерений с использованием ковариационных матриц для оптимальной схемы восстановления профилей температуры был рассмотрен для данных наземных радиометрических измерений в [19]. При этом априорное первое приближение – это могут быть данные климатической модели, данные прогноза или любые другие данные, точностные характеристики которых известны. Выражение для ковариационной матрицы ошибок  $S$  можно записать в виде

$$S(x) = C - CK(x)^T \{K(x)CK(x)^T + E + F\}^{-1} K(x)C, \quad (2)$$

где  $x$  – профиль температуры атмосферы;  $C$  – ожидаемая ковариация предварительно известных ошибок;  $K$  – градиент из модели (весовая функция);  $E$  – ожидаемая ковариация измеренных ошибок;  $F$  – ожидаемая ковариация ошибок модели. Предполагается, что как  $S$ , так и  $K$  не зависят от текущего температурного профиля.

На рис. 1 представлены результаты расчета погрешности измерений по слоям давлений до 900 гПа (примерно это соответствует высоте 1 км) [19].

Проведенный в [4, 6, 18, 19] анализ показал, что в задаче мониторинга термического режима атмосферы применение наземных радиометров дает существенный выигрыш по точности по сравнению с использованием данных климатических моделей и данных прогноза. Перейдем теперь к анализу наиболее слабой позиции рассматриваемого метода – оценке вертикального разрешения. В [18] предложено для оценки вертикального разрешения использовать дельта-функции Дирака. Расчетные значения вертикального разрешения приведены в табл. 1.

Видно, что разрешение порядка 65 м и менее (до 7,5 м) можно реализовать на нижних 100 м, в то же время разрешение существенно ухудшается с повышением высоты. На высотах более 400 м вертикальное разрешение начинает ухудшаться просто драматически. Однако в реальных измерениях при

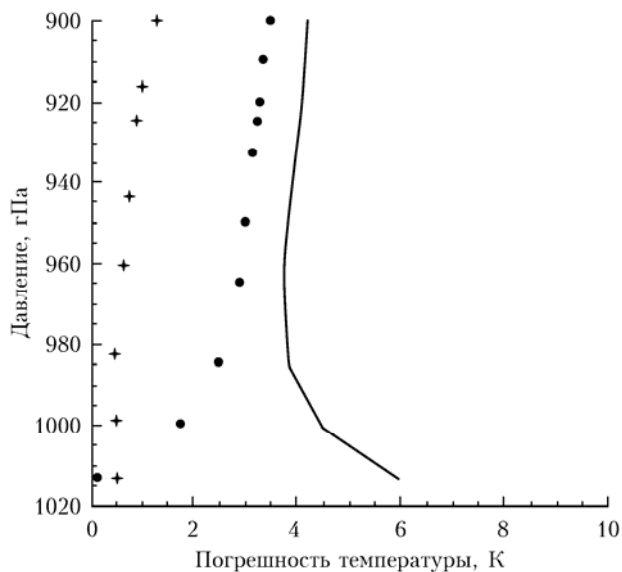


Рис. 1. Результаты расчета погрешностей оценки профилей температуры (сплошная линия — климатическая модель, точки — при привлечении информации о текущей приземной температуре, крестики — на основе данных микроволнового радиометра МТП-5)

Таблица 1

**Вертикальное разрешение  $\Delta$  сканирующего радиометра, расположенного на высоте 10 м от поверхности Земли, в функции от высоты исследуемого слоя атмосферы  $H$**

$H$ , м	10	50	100	200	300	400
$\Delta$ , м	7,5	25	65	130	225	300

использовании в априорной информации различных типов профилей довольно часто вертикальное разрешение не падает так резко (пример — адиабатический профиль, при его измерениях реально разрешения на 100 и на 1000 м не сильно различаются). Обычно в микроволновых температурных профилимерах при обработке данные аппроксимируются по слоям и в их паспорте указывается не вертикальное разрешение, а темп выдачи аппроксимированных данных (например, 50 м).

Приведем кратко реальные характеристики микроволновых профилимеров для АПС на примере серийно выпускаемого прибора МТП-5 [18, 20]. Зондирование осуществляется на одной частоте (56,6 ГГц) на 11 углах, от горизонта до зенита сканирование

производится за 2 мин. Приведенная чувствительность (т.е. при постоянной интегрирования 1 с) радиометрического приемника равна 0,07 К при полосе пропускания 400 МГц, используются модуляционный радиометр прямого усиления с СВЧ-усилителем на входе и цифровая низкочастотная часть. Диапазон высот составляет 0–1000 м, темп выдачи данных 25 м на нижних 100 и 50 м в остальном диапазоне. Погрешность измерения температуры во всем диапазоне высот 0,2–1,2 °С (в зависимости от типа профиля). Потребляемая мощность в рабочем режиме — 60 Вт, вес — 20 кг. Ширина диаграммы направленности антенны по уровню половинной мощности 2,2°. Система метеозащиты обеспечивает работу в диапазоне внешних температур от –80 до +50 °С практически при любых метеорологических условиях, кроме ливневых осадков. Одним из основных достоинств этого профилимера является полностью автоматический режим работы, включая автоматическую подкалибровку по излучению атмосферы в направлении на горизонт. В табл. 2 приведен пример сравнений данных МТП-5 с данными 113 выпусков радиозондов аэрологической станции «Долгопрудный», проведенных в период с 01.06 по 03.09.2013.

Следует заметить, что сравнение с радиозондом надо проводить аккуратно, понимая, что зонд измеряет контактным датчиком температуру в локальной точке, а радиометр — интегральную в слое и зонд в процессе полета удаляется достаточно далеко от места установки микроволнового профилимера. Таким образом, более корректными являются сравнения с датчиками специальных мачт и привязными аэростатами, такие сравнения были также успешно проведены [18, 19]. В настоящее время появляется новое, на наш взгляд оптимальное, средство для сравнений — беспилотные летательные аппараты с контактными датчиками и вертикальным полетом до высот порядка 5 км.

Профилимеры МТП-5 нашли достаточно широкое применение в системах экологического мониторинга, регионального прогнозирования погоды и распространения загрязнений, экологической безопасности атомных электростанций, в аэропортах, в научных исследованиях по физике атмосферы, в полярных исследованиях (в частности, использовались на дрейфующих полярных станциях СП-39 и СП-40, а также на континентальной антарктической станции «Конкордия») [21–27].

Таблица 2

**Сравнение данных МТП-5 с данными радиозондов**

$H$ , м	0	50	100	150	200	250	300	400	500	600	800	1000
$dA_v$	0,33	0,42	0,28	0,14	–0,02	–0,12	–0,18	–0,25	–0,23	–0,18	–0,04	–0,19
RMSD	1,10	1,10	0,91	0,76	0,74	0,71	0,70	0,69	0,72	0,78	0,90	0,91

Примечание.  $dA_v$  — среднее значение разности ( $T_{\text{зонд}} - T_{\text{радиометр}}$ ), град; RMSD — среднеквадратическое отклонение разности.

## Многоканальные наземные микроволновые температурные профилемеры

Многоканальные наземные микроволновые температурные профилимеры предназначены для измерения профилей температуры тропосферы вплоть до высот 10 км. Обычно для этого используются измерения на 6–7 частотах на склоне полосы поглощения молекулярного кислорода (из диапазона частот 51–58 ГГц) [3, 5, 7, 28–32]. При этом уже нельзя пренебрегать вариациями излучения водяного пара и жидкокапельной влаги в облаках, поэтому в состав таких профиломеров обязательно входят каналы в районе резонансной частоты излучения водяного пара (22,235 ГГц) и так называемого окна прозрачности (где суммарное излучение молекулярного кислорода и водяного пара минимально (35–38 ГГц)) [7, 14].

При расчетах по уравнению (1) необходимо использовать суммарный коэффициент поглощения – от молекулярного кислорода, от водяного пара и от облачной жидкокапельной влаги [7, 14]. Это существенно усложняет измерительный комплекс по сравнению с одноканальным сканирующим профиломером для АПС. Кроме того, автоматическая калибровка по собственному излучению атмосферы в направлении на горизонт здесь невозможна, необходимо использовать внешнюю микроволновую мишень с функцией ее охлаждения жидким азотом [29–31]. Желательно также иметь дополнительное оборудование для измерения нижней кромки облаков (например, ИК-радиометр) [31]. При этом, как показано в [28], вертикальное разрешение в АПС при многочастотном методе получается не лучше 400 м даже в нижних слоях. Поэтому необходимо предусмотреть сканирование хотя бы одного частотного канала, максимально близкого к резонансной частоте излучения молекулярного кислорода [29, 31].

В [29] выполнен расчет для многоканального (7 каналов) микроволнового радиометра со сканированием на трех частотах для измерения профилей температуры тропосферы, результаты представлены в табл. 3.

Оценки вертикального разрешения наземных микроволновых профиломеров проведены в [28] с использованием вейвлет-анализа, и даны сравнения

расчета этого параметра по технологии Backus–Gilbert [33]. Показано, что для высот диапазона 0–1 км более высокое вертикальное разрешение имеет сканирующий одноканальный радиометр с длиной волны в районе максимума поглощения молекулярного кислорода (5 мм), в диапазоне высот от 1 до 2 км более высоким разрешением обладают многоканальные радиометры с зондированием в зенит, а выше 2 км вертикальное разрешение как сканирующего, так и многоканального радиометров драматически уменьшается. Имеются результаты сравнений вертикальных разрешений многоканального профиломера и спутниковых приборов, они представлены в табл. 4 [12].

Как видно из таблицы, в нижней тропосфере спутниковые приборы не могут конкурировать с наземными профиломерами, а вот с высот более 4 км ситуация с вертикальным разрешением меняется на противоположную.

Рассмотрим краткие характеристики реальных приборов, возьмем для примера наиболее простой профиломер «Микрорадком» [13]. В отличие от приборов MP-3000A и RPG-HATPRO он монтируется на базе тонара (фургона-прицепа). Внутри тонара поддерживается круглогодично температура в диапазоне от 20 до 22 °С, там расположено место оператора с управляющим компьютером, 6-канальный микроволновый радиометр с частотами 53,3; 53,95; 54,48; 55,01; 55,74; 56,72 ГГц, одноканальный радиометр с частотой 22,235 ГГц для измерения концентрации водяного пара в столбе атмосферы, одноканальный радиометр с частотой 37 ГГц для измерения интегральной концентрации жидкой воды в облаке (в кг/м<sup>2</sup>), навигационный приемник GPS/ГЛОНАСС и блоки питания всей аппаратуры. На крыше тонара установлен одноканальный сканирующий микроволновый радиометр с частотой 56,6 ГГц (МТР-5), автоматическая метеостанция (измерение приземных значений температуры, давления, ветра и наличия жидких осадков), видеокамера для фиксации облачности [13]. С 1 декабря 2013 г. с помощью комплекса «Микрорадком» проводятся непрерывные измерения профилей температуры атмосферы и общего содержания водяного пара, а также сравнения с данными радиозондов находящейся в непосредственной близости аэрологической станции «Долгопрудный». На рис. 2 представлен пример выходных сигналов комплекса «Микрорадком», а на рис. 3 – пример сравнения

Таблица 3

**Расчетные значения вертикального разрешения для 7-канального сканирующего радиометра**

<i>H</i> , м	25	50	100	150	250	500	750	1000	1500	2000	2500
$\Delta$ , м	20	46	97	151	232	469	789	953	1651	1770	3544

Таблица 4

**Сравнение вертикального разрешения наземного многоканального профиломера и спутникового радиометра**

<i>H</i> , м	100	500	2100	4000	6000	8000	10000
$\Delta$ , м (наземный профиломер)	25	300	1500	2800	6000	6000	8000
$\Delta$ , м (спутниковый профиломер)	–	–	1500	2000	2000	2000	2000

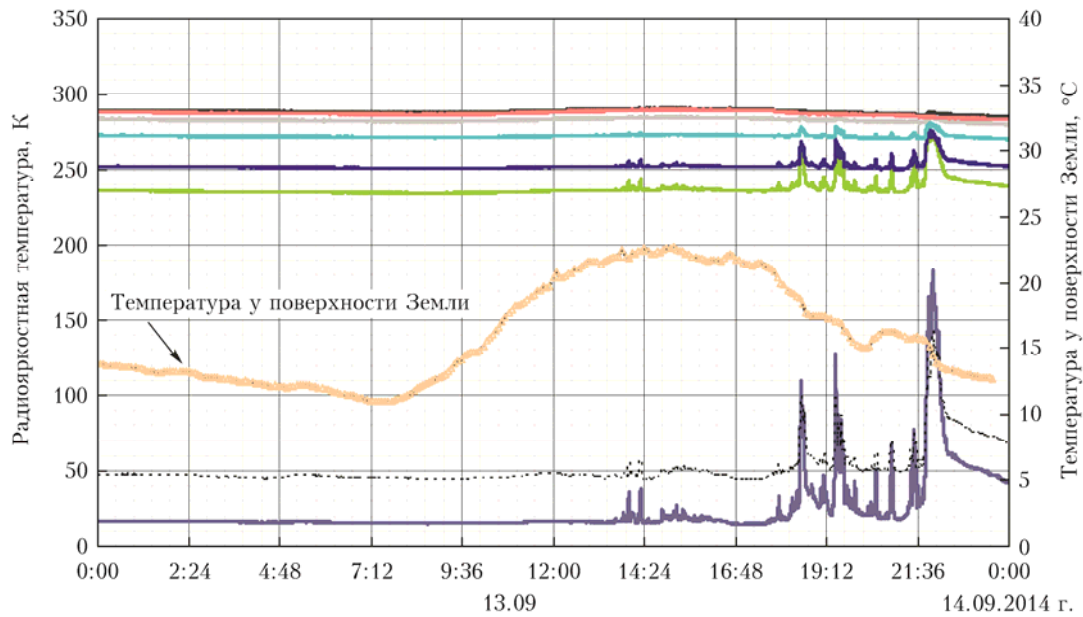


Рис. 2. Пример выходного сигнала комплекса «Микрорадком» на частотах: 22,235; 37; 53,3; 53,95; 54,48; 55,01; 55,74; 56,72 ГГц (обозначения каналов снизу вверх). Температура у поверхности Земли: 10,5–23 °С, относительная влажность – 40–100%, до 11:00 – дымка, редкие перистые облака, после 14:00 – кучевые и слоисто-кучевые, 18:30–22:00 – небольшой дождь

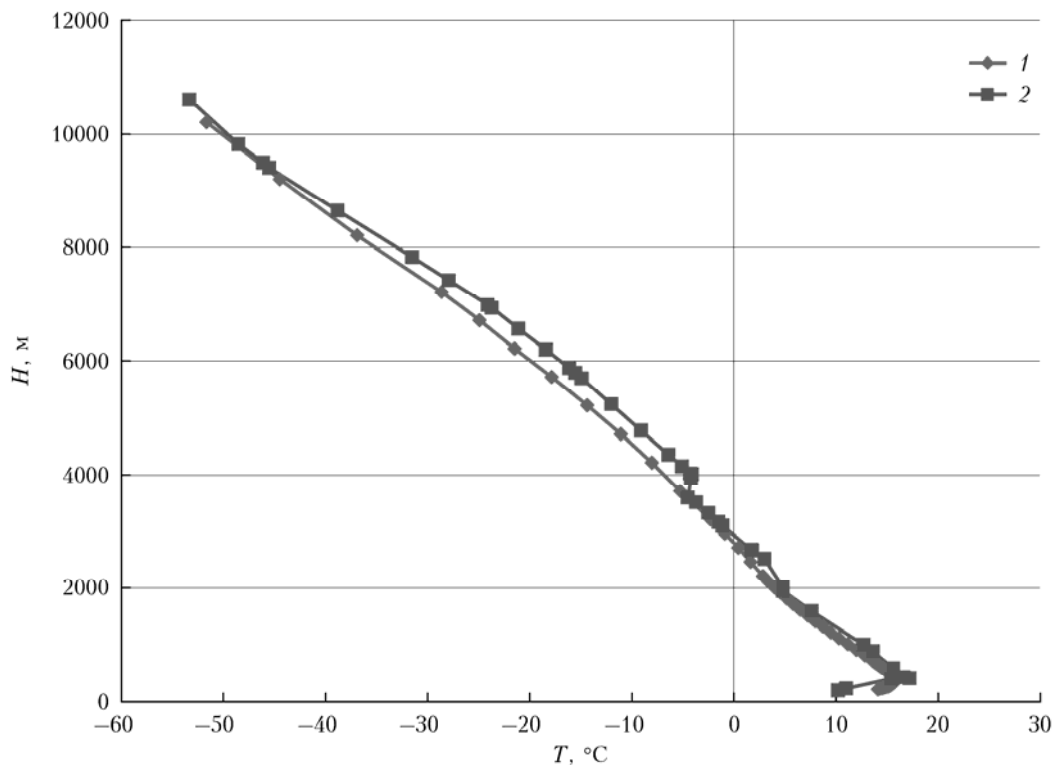


Рис. 3. Сравнение данных радиозондирования (1) и комплекса «Микрорадком» (2) (04:00:00 09.12.2014)

профиля температуры, полученного с помощью микроволнового комплекса «Микрорадком» и радиозонда в условиях безоблачной атмосферы.

Если оценивать массив данных, полученных с помощью «Микрорадкома» более чем за год непрерывных наблюдений, можно сделать следующие вы-

воды. Среднее рассогласование с данными радиозондирования в АПС (высоты в диапазоне 0–1,6 км) составляло 0,3–0,6 К, а на высоте 4 км – 1,6 К при безоблачной атмосфере и 2,3 К при наличии облачности. Выше 4 км удавалось восстанавливать профили температуры с достаточной точностью только

при безоблачной атмосфере, а результаты типа представленного на рис. 3 получались только в 10% случаев [34]. Это несколько лучше, чем результаты, полученные с помощью профилимера RPG-HATPRO в [35], где среднеквадратическое рассогласование в АПС составило 1,0–1,5 К, в слое 2–4 км – 2,0–3,5 К, а на высотах более 4 км – до 8 К. На рис. 4 приведены результаты годовых сравнений профилей температуры АПС (до высоты 1 км), измеренных радиозондом и комплексом «Микроградком».

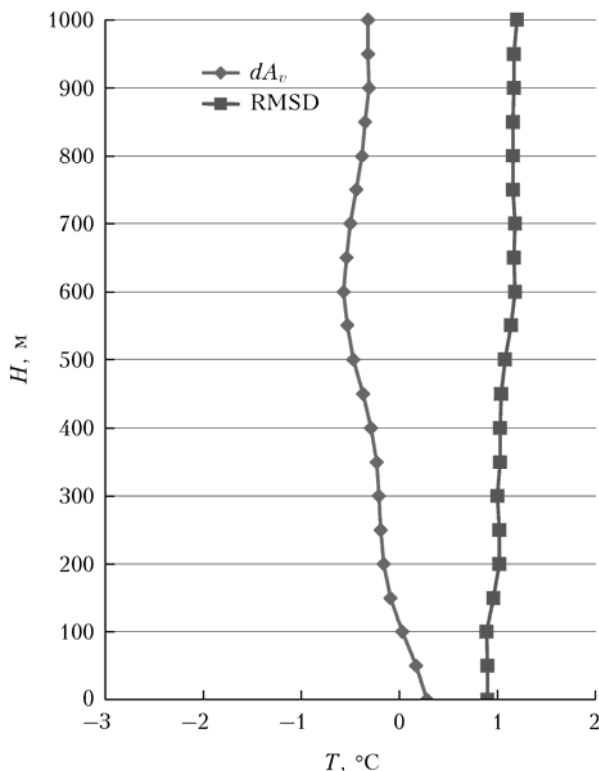


Рис. 4. Результаты сравнений данных о профилях температуры, измеренных радиозондом и комплексом «Микроградком» (режим «погранслои», МТР-5, 496 пар за 2014 г.). Общие результаты по 496 сравнениям:  $dA_v = -0,30$ ,  $RMSD = 1,15$

### Заключение

Проведенный анализ потенциальных и полученных в реальных экспериментах возможностей микроволновых температурных профилимеров позволяет сделать следующие выводы. Появление современных СВЧ-усилителей позволило в XXI в. увеличить чувствительность и стабильность современных микроволновых радиометров миллиметрового диапазона волн почти на порядок. Это дало возможность с их помощью проводить мониторинг термодинамического состояния тропосферы. При этом наибольший прогресс достигнут в измерениях профилей температуры АПС, где полученные точности удовлетворяют многим фундаментальным и прикладным задачам контроля и прогнозирования состояния этого важнейшего для жизни человека слоя атмосферы. Что касается более высоких слоев, то здесь за счет улучшения характеристик калибровок и алгоритмов вос-

становления профилей температуры можно ожидать в ближайшее время аналогичных результатов для слоя 1–4 км. Если же говорить о слое атмосферы на высотах от 4 до 10 км, то здесь скорее всего, по нашему мнению, следует ожидать прогресса в использовании данных спутниковых приборов, так как наземные измерения в этом слое имеют недостаточное вертикальное разрешение и сильно зависят от характеристик облаков нижнего яруса. Для проведения сравнений, на наш взгляд, наиболее перспективным является применение беспилотных летательных аппаратов с контактными датчиками температуры, вертикальными взлетом и посадкой, достигающих высоты полета 5 км.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 14-05-00038).

1. *Атмосфера: Справочник* (справочные данные, модели) / Под ред. Ю.С. Седунова, С.И. Авдюшина, Е.П. Борисенкова, О.А. Волковицкого, Н.Н. Петрова, П.Г. Рейтенбаха, В.И. Смирнова, А.А. Черникова. Л.: Гидрометиздат, 1991. 509 с.
2. *Kadyrov 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.
3. *Баширинов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т.* Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974. 188 с.
4. *Westwater E.R.* Ground-based passive probing using microwave spectrum of oxygen // *Radio Sci. D.* 1965. V. 69, N 9. P. 1201–1211.
5. *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.
6. *Askne J.I., Westwater E.R.* A review of ground-based remote sensing of temperature and moisture by passive microwave radiometers // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1986. GE-24. P. 340–348.
7. *Троицкий А.В.* Дистанционное определение температуры атмосферы из спектральных радиометрических измерений в линии 5 мм // *Изв. вузов. Радиофиз.* 1986. Т. 29, № 8. С. 878–888.
8. *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. Remote Sens.* 1993. V. 31, N 1. P. 116–120.
9. *Кадыров Е.Н., Кокин Г.А., Потапов А.А.* Приборы миллиметрового диапазона волн для исследования озонового слоя Земли // *Зарубеж. радиоэлектрон.* 1989. № 10. С. 52–66.
10. *Власов А.А., Кадыров Е.Н.* Микроволновая термометрия средней атмосферы с аэростата // *Докл. АН СССР.* 1989. Т. 4, № 313. С. 831–834.
11. *Власов А.А., Кадыров Е.Н., Потапов А.А.* Лимбовая радиоспектрометрия атмосферы на миллиметровых волнах // *Зарубеж. радиоэлектрон. Успехи соврем. радиоэлектрон.* 1997. № 3. С. 56–65.
12. *Smith W.L., Feltz W.F., Knuteson R.O., Revercomb H.E., Woolf H.M., Howell H.B.* The retrieval of planetary boundary layer structure using ground-based infrared spectral radiance measurements // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 1999. V. 16. P. 323–333.
13. *Кадыров Е.Н., Горелик А.Г., Миллер Е.А., Некрасов В.В., Троицкий А.В., Тоцкилина Т.А., Шапошиников А.Н.* Результаты мониторинга термодинамического

- состояния тропосферы многоканальным микроволновым радиометрическим комплексом // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 6. С. 459–465.
14. *Ершов А.Т., Наумов А.П.* К вопросу о восстановлении высотных профилей температуры по наземным наблюдениям атмосферного радиоизлучения в области 5 мм // Изв. вузов. Радиофиз. 1974. Т. XVII, № 11. С. 1610–1625.
  15. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986. 287 с.
  16. *Rosenkranz P.W.* Interference coefficients for overlapping oxygen lines in air // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 1988. V. 39. P. 287–297.
  17. *Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н.* Радиотелескопы и радиометры. М.: Наука, 1973. 415 с.
  18. *Westwater E.R., Han Y., Irisov V.G., Leuvskiy 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 // J. Atmos. Ocean. Technol. 1999. V. 16. P. 805–818.
  19. *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 // Meteorol. Appl. 1998. V. 5, iss. 4. P. 393–404.
  20. *Кадыгров Е.Н.* Микроволновая радиометрия атмосферного пограничного слоя – метод, аппаратура, результаты измерений // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 7. С. 697–704.
  21. *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.
  22. *Rotach M.W., Calanca P., Graziani G., Gurtz J., Steyn D.G., Vogt R., Andretta M., Christen A., Cieslik S., Connolly R., De Wekker S.F.J., Galmarini S., Kadygrov E.N., Kadygrov V.E., Miller E.A., Neininger B., Rucker M., Gorsel E.V., Weber H., Weiss A., Zappa 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.
  23. *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. Appl. Climatol. 2006. V. 84, N 1–3. P. 161–169.
  24. *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.
  25. *Кузнецова И.Н., Кадыгров Е.Н., Миллер Е.А., Нахаев М.И.* Характеристики температуры в нижнем 600-метровом слое по данным дистанционных измерений приборами МТП-5 // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 10. С. 877–883.
  26. *Горчаков Г.И., Кадыгров Е.Н., Куницын В.Е., Захаров В.И., Семутникова Е.Г., Карпов А.В., Курбатов Г.А., Миллер Е.А., Ситанский С.И.* Московский остров тепла в блокирующем антициклоне летом 2010 г. // Докл. РАН. 2014. Т. 456, № 5. С. 591–595.
  27. *Argentini S., Conidi A., Kadygrov E.N.* Temperature measurements at Dome C using a new microwave temperature profiler // Proc. Conf., Italian Physical Society. 2004. V. 89 / Ed. M. Colacino. SIF, Bologna. P. 215–227.
  28. *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. Remote Sens. 2002. V. 40, N 3. P. 531–540.
  29. *Westwater Ed.R., Han Y., Solheim F.* Resolution and accuracy of a multi-frequency scanning radiometer for temperature profiling // Microwave radiometrics remote sensing of Earth surfing and atmosphere / Eds. P. Pampaloni, S. Paloscia. VSP. 2000. P. 129–135.
  30. *Solheim F., Godwin J.R., Westwater E.R., Han Y., Keihm S.J., Marsh K., Ware R.* Radiometric profiling of temperature, water vapor and cloud liquid water using various inversion methods // Radio Sci. 1998. V. 33. P. 393–404.
  31. *Crewell S.* Accuracy of boundary layer temperature profiles retrieved with multifrequency multiangle microwave radiometry // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2007. V. 45, N 7. P. 2195–2301.
  32. *Rodgers C.D.* The vertical resolution of remotely sounded temperature profiles with a priori statistics // J. Atmos. Sci. 1986. V. 33. P. 707–709.
  33. *Backus G.E., Gilbert J.F.* Uniqueness in the inversion of inaccurate gross earth data // Philos. Trans. Roy. Soc. London. A. 1970. V. 266. P. 123–192.
  34. *Кадыгров Е.Н., Ганьшин Е.В., Горелик А.Г., Князев А.К., Миллер Е.А., Некрасов В.В., Точилкина Т.А., Шапошников А.Н.* Экспериментальная оценка эффективности применения многоканального микроволнового радиометрического комплекса для мониторинга термодинамического состояния тропосферы и исследований мезоструктурных параметров облаков // Тез. докл. 21-й Рабочей группы «Аэрозоли Сибири». Томск: Изд-во ИОА им. В.Е. Зуева СО РАН, 2014. С. 71.
  35. *Зайцев Н.А., Тимофеев Ю.М., Косцов В.С.* Сравнение радиозондовых и наземных дистанционных микроволновых измерений профилей температуры в тропосфере // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 5. С. 392–398.

*E.N. Kadygrov, E.V. Ganshin, E.A. Miller, T.A. Tochilkina.* **Ground-based microwave temperature profilers: potential and experimental data.**

Calculated and experimental parameters (accuracy, vertical resolution) of ground-based multi-frequency and scanning microwave temperature profilers were analyzed. At the moment single-channel angular-scanning microwave radiometers (MTP-5) are more widely used for atmospheric boundary layer temperature profile measurements, and multi-frequency microwave radiometers (MP-3000A, RPG-HATPRO, Microradcom) are used for tropospheric temperature profiling. With more details are presented data from the Microradcom profiler, which was in operation from January 1, 2014 to January 1, 2015 in Dolgoprudny, Moscow region.