

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ,  
ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.501.795, 551.510.52

**Сравнение радиозондовых и наземных дистанционных  
микроволновых измерений профилей температуры  
в тропосфере**

**Н.А. Зайцев, Ю.М. Тимофеев, В.С. Косцов\***

*Санкт-Петербургский государственный университет  
198504, г. Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Ульяновская, 1*

Поступила в редакцию 6.11.2013 г.

Описан наземный эксперимент по микроволновому температурному зондированию тропосферы с помощью аппаратуры RPG-HATPRO, который проводится на физическом факультете Санкт-Петербургского государственного университета с июня 2012 г. На основе сопоставления результатов с данными радиозондирования получены оценки погрешностей определения профилей температуры с помощью алгоритма, разработанного изготовителем аппаратуры. Проведено сравнение погрешностей с соответствующими величинами, полученными для аналогичной аппаратуры, функционирующей за рубежом. Сделан вывод о необходимости разработки специализированных алгоритмов и процедур обработки, включающих настройку и коррекцию алгоритмов с учетом особенностей конкретного прибора и условий эксперимента.

*Ключевые слова:* наземное микроволновое дистанционное зондирование, температура в тропосфере; ground-based microwave remote sensing, tropospheric temperature.

**Введение**

Методы дистанционного зондирования атмосферы на основе измерений микроволнового (МКВ) излучения, в том числе и методы термического зондирования с использованием измерений в полосе кислорода 50–60 ГГц, развиваются с середины прошлого века. Достигнуты значительные успехи как в теоретических исследованиях, включающих усовершенствование алгоритмов решения обратных задач, так и в экспериментальных, направленных на уточнение спектроскопической информации по поглощению МКВ-излучения кислородом и создание современной высокоточной автоматизированной аппаратуры. В частности, в последние годы:

– разрабатывались методы термического зондирования средней атмосферы (стратосфера и мезосфера) по измерениям МКВ-излучения с высоким спектральным разрешением [1–4];

– была создана аппаратура для мониторинга профилей температуры в пограничном слое с высоким вертикальным разрешением, которая дает возможность изучать динамику формирования температурных инверсий и резких скачков концентрации атмосферных загрязнений из-за отсутствия перемешивания [5–7];

– начато серийное производство многоканальных высокоточных автоматизированных комплексов

для одновременного температурно-влажностного зондирования атмосферы [8, 9];

– разработаны оригинальные исследовательские, а также универсальные стандартизованные (унифицированные) алгоритмы для обработки МКВ-измерений, осуществляемых серийно производимой в настоящее время МКВ-аппаратурой, созданы международные измерительные сети, на которых работает МКВ-аппаратура [9–11].

Малые серии аппаратуры (профилемеры МТП-5 и RPG-HATPRO) для тропосферных исследований выпускаются в России [7] и Германии [12]. В 2012 г. на физическом факультете Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ) началась эксплуатация микроволнового радиометра RPG-HATPRO производства немецкой компании Radiometer Physics GmbH [12]. Радиометр имеет 7 каналов в области полосы поглощения кислорода 0,5 см и 7 каналов в области линии поглощения водяного пара 1,35 см и предназначен для определения профилей температуры и влажности в тропосфере, а также водозапаха облаков в автоматическом непрерывном режиме. Следует отметить, что экспериментальные исследования атмосферы с помощью наземной микроволновой аппаратуры начались на физическом факультете СПбГУ в 2007 г.: осуществлялись дистанционные измерения концентрации озона в стратосфере и нижней мезосфере с помощью радиометра, разработанного Институтом прикладной физики РАН (ИПФ РАН, Нижний Новгород) и регистрирующего излучение в области линии поглощения озона 110 ГГц [13].

\* Никита Александрович Зайцев (xxxnike@rambler.ru);  
Юрий Михайлович Тимофеев (tim@troll.phys.spbu.ru);  
Владимир Станиславович Косцов (vlad@troll.phys.spbu.ru).

Определение профилей температуры, влажности и значений водозапаса облаков в СПбГУ осуществлялось с помощью программного обеспечения, предоставляемого изготовителем аппаратуры HATPRO (Humidity And Temperature PROfiler). Цель нашей работы – оценить и проанализировать погрешности определения профилей температуры в тропосфере в различные сезоны этим программным обеспечением на основе сравнения полученных значений температуры с радиозондовыми данными (станция радиозондирования в пос. Воейково Ленинградской области). Важность этих исследований обусловлена следующими причинами:

– необходимо оценить погрешности алгоритма изготовителя (АИ) в различных условиях функционирования аппаратуры, чтобы определить границы применимости АИ;

– сравнение погрешностей АИ со значениями точности определения профилей температуры, достижение которых требуется при решении конкретных научных задач (например, задачи валидации спутниковых данных), позволит дать ответ на вопрос о необходимости создания специализированного усовершенствованного алгоритма.

Исследования подобного рода выполнялись ранее в Западной Европе: в работе [14] получены оценки погрешностей определения профилей температуры в тропосфере по измерениям МКВ-излучения аппаратурой HATPRO на измерительной станции Paererne в Швейцарии. Эти оценки основывались на сравнении с радиозондовыми значениями температуры в течение примерно 3,5 лет наблюдений. В указанной работе использовался алгоритм, подобный АИ, но уточненный авторами работы и адаптированный к конкретному экземпляру радиометра.

## Описание эксперимента и детали расчетов

Технические характеристики микроволнового прибора RPG-HATPRO представлены со всей полнотой на сайте разработчика, там же доступны для загрузки руководства по установке, эксплуатации и проведению измерений [12]. Центральные частоты и значения полуширины так называемых «температурных» каналов радиометра RPG-HATPRO представлены в табл. 1. Форму типичных спектральных аппаратных функций для этих каналов можно найти в работе [14].

Таблица 1

Центральные частоты $f$ и полуширина $\Delta f$ «температурных» каналов аппаратуры RPG-HATPRO							
$f$ , ГГц	51,26	52,28	53,86	54,94	56,66	57,30	58,00
$\Delta f$ , МГц	230	230	230	230	600	1000	2000

Прибор установлен на вышке на крыше здания НИИ физики СПбГУ. Географические координаты 59,88107° с.ш., 29,82597° в.д. Высота установки прибора над уровнем моря 56 м. Угловое вертикальное сканирование осуществляется в плоскости «север–юг» в направлении на север. Прибор работает непрерывно, измерения осуществляются в двух режи-

мах. В основном режиме измеряется интенсивность нисходящего МКВ-излучения в зенитном направлении – выдача данных 1 раз в 2 с. Дополнительный режим включается периодически (1 раз в 20 мин), в этом режиме производится угловое сканирование. Дополнительный режим предназначен для повышения точности определения температуры в пограничном слое атмосферы. Такая комбинация режимов работы рекомендована изготовителем прибора и позволяет заметно увеличить информативность МКВ-измерений относительно профиля температуры.

Алгоритм изготовителя прибора RPG-HATPRO, который реализован в аппаратуре, работающей в СПбГУ, основан на методе квадратичной регрессии (в принципе, изготовителем предусмотрены также алгоритмы на основе линейной регрессии и нейронных сетей, но в нашем случае они отсутствуют). Настройка алгоритма осуществляется изготовителем в следующей последовательности.

1) Создается банк данных радиозондирования, включающий измерения в течение нескольких лет на станции радиозондирования, ближайшей к планируемой точке установки аппаратуры заказчиком.

2) Для различных состояний атмосферы, описываемых данными радиозондирования, а также модельными значениями водности облаков, рассчитываются значения яркостной температуры в каналах прибора.

3) Вычисляются коэффициенты квадратичной регрессии.

Алгоритм для аппаратуры, закупленной СПбГУ, был настроен изготовителем на основе результатов радиозондирования в пос. Воейково (Ленинградская область, 50 км от точки описываемых МКВ-измерений) в период, предшествующий 2012 г.

В настоящей работе для сравнения с результатами МКВ-зондирования были взяты данные радиозондирования с метеорологической станции в пос. Воейково для периода времени начиная с июня 2012 г., с момента запуска в эксплуатацию прибора. Данные радиозондирования загружались из банка данных университета штата Вайоминг [15].

В настоящей работе мы используем три величины для количественного описания расхождений между МКВ- и радиозондовыми данными о температуре на заданной высоте. Среднее рассогласование:

$$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i),$$

среднеквадратическое рассогласование:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}$$

и стандартное отклонение от среднего рассогласования:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i - M)^2},$$

где  $N$  – количество пар сопоставляемых значений температуры;  $x$  и  $y$  – МКВ- и радиозондовые значения температуры на заданной высоте соответственно.

Если принять радиозондовые данные в качестве «эталонных», то величина  $M$  характеризует систематическую погрешность МКВ-измерений профиля температуры,  $S$  характеризует полную погрешность, а  $\sigma$  – погрешность без систематической составляющей.

## Обсуждение результатов

Обратимся к табл. 2, в которой представлены периоды измерений, для которых выполнялись сопоставления с радиозондовыми данными, даты калибровок с использованием жидкого азота в качестве «холодной нагрузки» и значения среднеквадратического рассогласования  $S$  на различных высотах. Калибровки с использованием жидкого азота в качестве «холодной нагрузки» выполнялись 3 раза: перед запуском прибора в эксплуатацию и затем через 8 и 12 мес. В течение анализируемого периода работы прибора значения среднеквадратического отклонения температуры от радиозондовых данных находились в пределах 1,1–2,0 К на высоте 0,5 км, 1,2–2,0 К на высоте 1,5 км и 1,8–2,4 К на высоте 2,5 км. Из табл. 2 видно, что погрешности заметно уменьшились после калибровки в конце зимы 2012 г. Влияние калибровки иллюстрируют две последние строки таблицы, в которых даны погрешности, по-

лученные непосредственно перед калибровкой и после нее (февраль и март 2013 г.). После проведения калибровки погрешности на высоте 0,5 км уменьшились на 0,4 К, а на высотах 1,5 и 2,5 км на 0,7 и 1,0 К соответственно.

Рис. 1, *a* демонстрирует зависимость от высоты различных характеристик рассогласований между МКВ- и радиозондовыми измерениями для периода «весна-2013». Показан высотный диапазон 0–10 км, поскольку такой диапазон определения профилей температуры заявлен изготовителем аппаратуры. Показанная зависимость является типичной для всех периодов проведения МКВ-измерений в СПбГУ с июня 2012 г. Величина среднего рассогласования  $M$  близка к нулю и не превышает 1 К до высоты ~1,2 км, затем  $M$  достаточно быстро растет по абсолютной величине и достигает ~5 К на высоте 4 км и ~8 К на высоте 8–9 км. Среднеквадратическое рассогласование  $S$  составляет 1–2 К примерно до высоты 2 км, затем постоянно растет, достигая 8,5 К на высоте 9 км. Погрешность без систематической составляющей ( $\sigma$ ) близка к полной погрешности  $S$  до высоты 2 км. Для высот, превышающих 2 км, как видно из рис. 1, *a*, наблюдается незначительное увеличение  $\sigma$  по сравнению с увеличением  $S$ , что свидетельствует о существенном вкладе систематической составляющей погрешности.

Таблица 2

Периоды измерений, для которых выполнялись сопоставления с радиозондовыми данными, даты калибровок и значения среднеквадратического рассогласования  $S$  на различных высотах

Период	Время	Даты калибровки с использованием жидкого азота	Среднеквадратическое рассогласование $S$ (К) на высоте (км):		
			0,5	1,5	2,5
Лето-2012	1 июня – 31 августа 2012	31.05.2012	1,2	1,5	1,8
Осень-2012	1 сентября – 30 ноября 2012	–	1,1	1,6	2,4
Зима-2012	1 декабря 2012 – 28 февраля 2013	18.02.2013	2,0	2,0	2,0
Весна-2013	1 марта – 31 мая 2013	–	1,2	1,2	2,0
Лето-2013	1 июня – 31 августа 2013	03.06.2013	2,0	1,5	2,3
Февраль-2013	15 января – 13 февраля 2013	18.02.2013	1,2	1,9	3,0
Март-2013	1–31 марта 2013	–	0,8	1,2	2,0

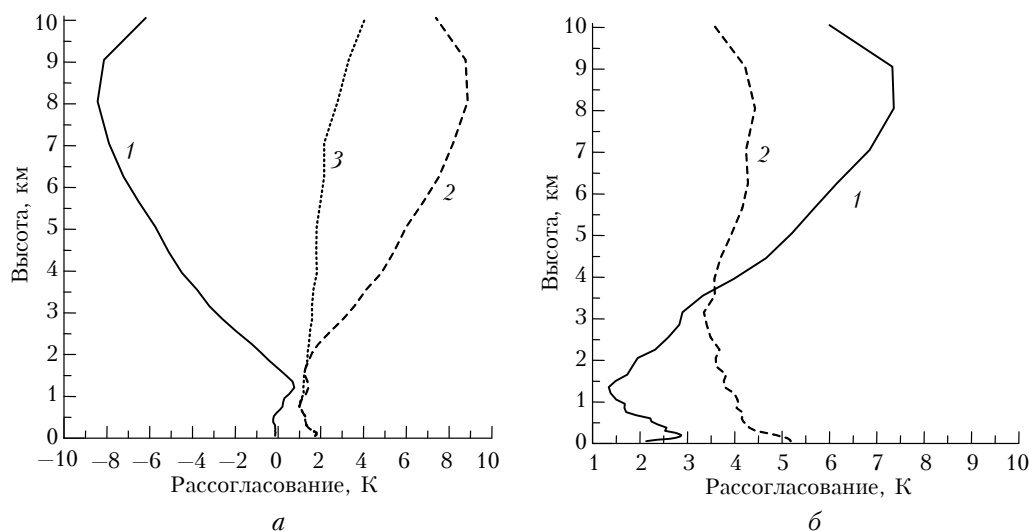


Рис. 1. Сравнение МКВ- и радиозондовых значений температуры в период «весна-2013» (1 –  $M$ , 2 –  $S$ , 3 –  $\sigma$ ) (а); сравнение рассогласования  $S$  (1) с величиной естественной изменчивости температуры (2) в период «лето-2013» (б)

Хорошо известно, что наземные измерения нисходящего МКВ-излучения атмосферы в полосе кислорода в каналах, характеризующихся невысоким спектральным разрешением (см. табл. 1), которое не позволяет регистрировать контуры отдельных линий, несут информацию только о нижних слоях тропосферы (см., например, [16]). Рис. 1, б иллюстрирует реальную информативность МКВ-измерений на различных высотах. С учетом высокой точности измерений температуры в тропосфере радиозондом (менее 0,5 К) сравниваются естественные средне-квадратические вариации температуры в период «лето-2013», рассчитанные по радиозондовым данным на различных высотах, с величиной СКО ( $S$ ) МКВ-измерений температуры. На уровне около 3,5 км они становятся равными, а выше 3,5 км погрешности определения температуры с помощью МКВ-измерений больше естественной изменчивости температуры. Отметим, что в этот сезон естественные вариации температуры составляли примерно 4 К. Поскольку величины среднего рассогласования  $M$  на высотах, превышающих 2–3 км, очень существенны (см. рис. 1, а) и погрешность практически полностью определяется систематической составляющей, представляется необходимым подробнее проанализировать возможные причины этого факта. В качестве основных возможных источников систематической составляющей погрешности АИ можно указать следующие:

- несоответствие статистического ансамбля, использованного для расчета регрессионного оператора, конкретным атмосферным ситуациям в период измерений;
- погрешности методики расчета коэффициентов поглощения при вычислении яркостной температуры в спектральных каналах прибора;
- несоответствие моделирования характеристик аппаратуры при вычислении яркостной температуры (частота, ширина полосы, спектральная передаточная функция каналов, диаграмма направленности и т.п.) конкретному экземпляру прибора;
- неконтролируемые ошибки при абсолютной калибровке аппаратуры.

Представляется маловероятным, что причиной существенных систематических ошибок является первый из вышеназванных источников, поскольку и знак, и величина среднего рассогласования одинаковы для всех проанализированных периодов измерений (всех сезонов). Мы оценили в первом приближении влияние неадекватности статистического ансамбля на результаты определения температуры, построив оператор линейной регрессии на основе радиометрических и радиозондовых измерений весной 2013 г. и применив его для радиометрических измерений летом 2013 г. Среднее рассогласование с радиозондовыми данными для лета 2013 г. при этом не превышало 1 К до высоты 7 км и 2 К до высоты 8 км. Выше 8 км наблюдался рост среднего рассогласования до 5,5 К на высоте 10 км. Таким образом, первый источник не может являться главной причиной систематической погрешности. Второй источник также маловероятен, так как его влияние проявлялось бы для всех высот. Кроме того, следует подчеркнуть, что современные методики расчета коэффициентов поглощения обладают

достаточной точностью, это проверено практикой радиометрических измерений. Для оценки влияния третьего источника мы применили построенный нами по данным для весны 2013 г. оператор линейной регрессии к обработке измерений в этот же период (весна 2013 г.), моделируя систематическую ошибку в различных спектральных каналах прибора НАТPRO. Сравнение с радиозондовыми данными показало, что систематические ошибки в значении радиояркостной температуры 1 К в 3-м «температурном» канале 53,86 ГГц дают величину среднего рассогласования 1,7; 2,2; 2,5; 2,7; 2,6 К на высотах соответственно 3, 4, 5, 6 и 7 км. Систематические ошибки в других спектральных каналах мало влияют на результаты определения температуры выше 3 км. Наконец, для исследования четвертого источника мы моделировали систематические ошибки во всех «температурных» каналах одновременно. Расчеты показали в этом случае одинаковую для всех высот незначительную (в пределах 1 К) величину среднего рассогласования МКВ и радиозондовых измерений.

Подводя итог описанным исследованиям, можно сделать вывод, что нам пока не удалось точно идентифицировать источник систематической погрешности алгоритма изготовителя на высотах более 3 км. Однако наиболее вероятным источником этой погрешности представляется несоответствие моделирования характеристик аппаратуры имеющемуся экземпляру прибора. В качестве примера можно указать на то, что частоты каналов конкретного экземпляра прибора могут отличаться от «стандартных». В этом случае, как указывает изготовитель, предусмотрена специальная процедура коррекции. Поскольку существенное систематическое рассогласование наблюдалось для высот более 3 км, далее будем рассматривать только атмосферный слой 0–3 км.

Рис. 2 иллюстрирует вариации величин среднего рассогласования  $M$  в зависимости от периода измерений.

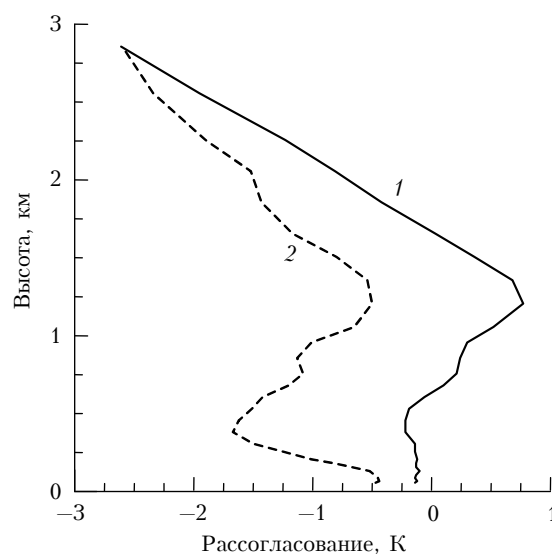


Рис. 2. Зависимость от высоты величины среднего рассогласования ( $M$ ) для периодов «весна-2013» (1) и «лето-2013» (2)

Необходимо отметить, что высотный ход величин среднего рассогласования для всех проанализированных периодов времени, указанных в табл. 2, качественно один и тот же, разница заключается в сдвиге кривых вдоль горизонтальной оси. Как следствие, меняются величина и знак среднего отклонения. Из рис. 2 видно, что в период «весна-2013» на высоте 0–1 км среднее рассогласование не превышает 1 К по абсолютной величине и является знакопеременным, а для периода «лето-2013» значения температур, полученные МКВ-методом, систематически меньше радиозондовых, при этом по абсолютной величине среднее отклонение достигает 1,7 К.

Рис. 3 демонстрирует важность периодической калибровки прибора.

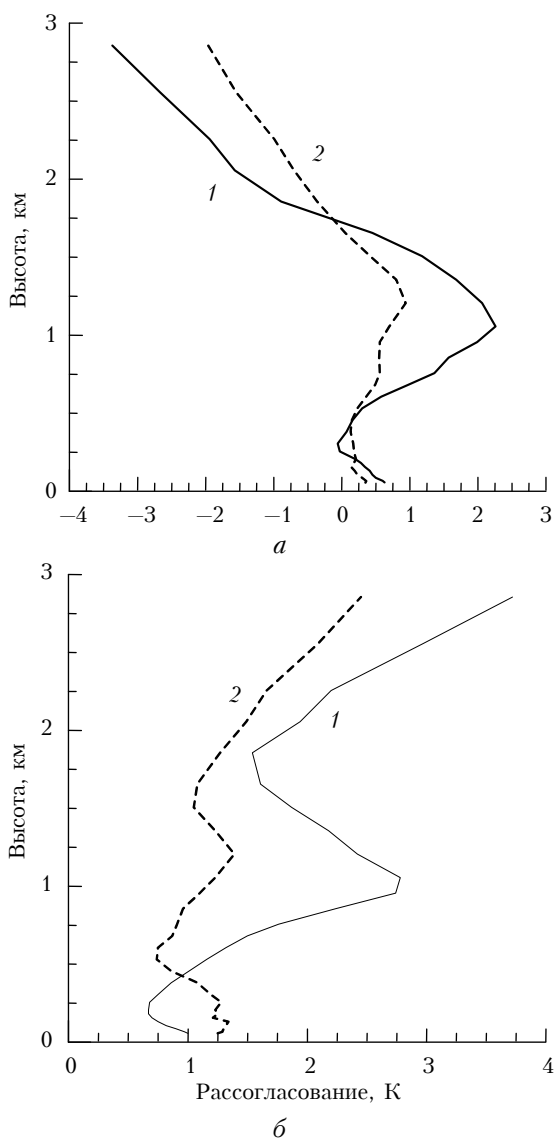


Рис. 3. Зависимость от высоты величины среднего рассогласования  $M$  (а) и среднеквадратичного рассогласования  $S$  (б) для периодов до и после калибровки: «февраль-2013» (1) и «март-2013» (2)

Величина среднего рассогласования в диапазоне высот 0–1,5 км уменьшилась после калибровки

на 0,6–1,0 К. Значения среднеквадратического рассогласования в слое 0–3 км до калибровки («февраль-2013») равнялись 1–3 К, а после калибровки («март-2013») на высотах 0–2 км не превышали 1,5 К и только на высоте 3 км достигали 2,5 К. Особенно большие отличия погрешностей МКВ-измерений температуры до и после периодической калибровки наблюдались в слое 0–2 км и составляли 0,5–2,5 К.

Для демонстрации возможностей АИ непосредственно после плановой калибровки аппаратуры приведем рис. 4, где изображены все характеристики рассогласований МКВ и радиозондовых измерений в период «март-2013». Показано, что на высотах 0–3 км МКВ-измерения позволяют определять профиль температуры с систематическими 0–2 К и среднеквадратическими погрешностями 1–2,5 К. Исключение систематической составляющей рассогласований, как видно из высотной зависимости величины  $\sigma$ , приводит к отличиям от радиозондов в 0,5–1,5 К.

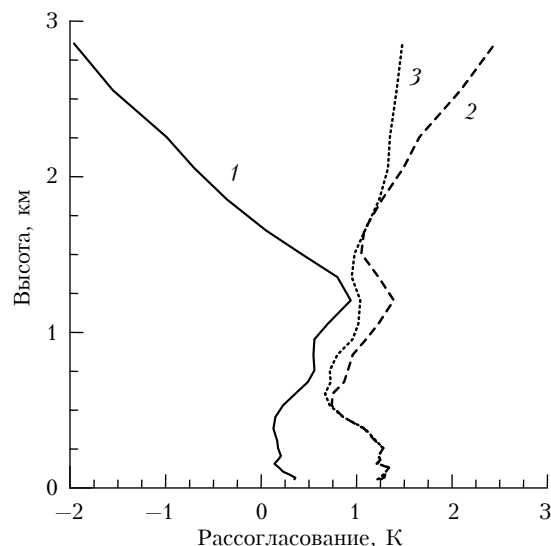


Рис. 4. Зависимость от высоты величин  $M$  (1),  $S$  (2) и  $\sigma$  (3) для периода «март-2013»

Проведем сравнение полученных оценок погрешности определения профиля температуры с результатами, опубликованными другими авторами. В работе [16] на основе анализа 18-месячных сопоставлений МКВ-восстановлений температуры с радиозондовыми данными показано, что два метода отличаются на 0,6 К у поверхности и не более чем на 1,6 К на высоте 7 км летом и 4 км зимой. Профили температуры и влажности определялись с помощью множественной линейной регрессии, которая оказалась точнее, чем методика искусственных нейронных сетей, особенно для влажности. Сами регрессии строились на основе использования одновременных радиозондовых и МКВ-измерений нисходящего излучения.

Такой подход имеет определенные преимущества в том, что не требуется использовать радиационную модель атмосферы, а сам обратный оператор

методики может периодически уточняться. Подробный анализ характеристик МКВ-зондирования вертикального профиля температуры с помощью спектрометра HATPRO приведен в работе [14]. Авторы этой работы на первом этапе определили и скорректировали систематические отклонения между измеренными и рассчитанными спектрами радиоярких температур для случаев безоблачной атмосферы. Затем эти же измерения были использованы для решения обратной задачи и сравнения с измерениями радиозондирования. Исследования показали, что случайные отличия между МКВ- и радиозондированием составляли 0,5 К в нижнем пограничном слое и увеличивались до 1,7 К на высоте 4 км. Систематические отличия локальных и дистанционных измерений температуры достигали  $\pm 0,5$  К. С декабря 2003 г. по февраль 2004 г. в рамках кампании TUC (Temperature, hUmidity, and Cloud), проводившейся на метеостанции Paucorne (Швейцария), были выполнены сопоставления МКВ- и радиозондовых измерений профилей температуры [17]. Определение профилей температуры по МКВ-измерениям осуществлялось несколькими различными методами. Результаты сопоставлений показали, что случайные погрешности МКВ-метода составляют около 1,5 К до высоты 3,5 км, а систематические – 1,0 К. В работе [5] на основе 80 сопоставлений с радиозондовыми данными были получены следующие погрешности МКВ-метода: в диапазоне высот 0–3 км случайная составляющая погрешности равна 1,0–1,5 К, систематическая  $\pm 1,0$  К. Эти оценки соответствовали комбинированному режиму наблюдений (зенит + угловое сканирование).

В табл. 3 для удобства сравнения представлены оценки погрешности, полученные в нами и другими авторами. Как видно из табл. 3, можно выделить две группы оценок погрешности. К первой группе

относятся работы [14, 16], в которых даны малые значения погрешности при «высоком потолке» температурного зондирования приборами RPG-HATPRO и TP/WVP 3001. Например, в работе [16] декларируется погрешность меньше 1,6 К до высоты 7 км в летний сезон. Ко второй группе относятся оценки, характеризующиеся, во-первых, «невысоким потолком» зондирования (до 3,5 км) и, во-вторых, более высокими значениями погрешности в пограничном слое [5, 17]. Наши оценки близки к оценкам второй группы, при этом значения погрешностей сравнимы в пограничном слое, а выше 3 км они больше значений, декларируемых другими авторами. Данный факт свидетельствует о преимуществах специализированных алгоритмов и процедур обработки, включающих настройку и коррекцию алгоритмов с учетом особенностей конкретного прибора и условий эксперимента.

### Заключение

Температурное наземное МКВ-зондирование тропосферы с помощью аппаратуры RPG-HATPRO, функционирующей в Санкт-Петербургском государственном университете, позволяет получить оперативную информацию до высот 3–4 км, если для обработки данных используется алгоритм изготовителя аппаратуры. При этом в пограничном слое погрешности определения температуры составляют 1,0–1,5 К, в слое 2–4 км возрастают до 2,0–3,5 К. На высотах более 4 км погрешности дистанционных измерений становятся больше естественных вариаций температуры. Опыт эксплуатации показал важность периодических калибровок прибора с использованием жидкого азота через период времени, который меньше рекомендованного изготовителем аппаратуры.

Таблица 3

Оценки погрешности определения профилей температуры по измерениям нисходящего МКВ-излучения, полученные на основе сравнения с радиозондовыми данными (высота пограничного слоя 2 км)

Источник	Случайная погрешность	Систематическая погрешность	Полная погрешность	Примечание
Настоящая работа	1,0–1,5 К в пограничном слое	$\pm 1,0$ К	1,0–1,5 К в пограничном слое, 2,5 К на высоте 3 км	Прибор RPG-HATPRO
[16]	–	–	0,6 К у поверхности, <1,6 К до высоты 7 км летом и 4 км зимой	Прибор TP/WVP 3001 (Radiometrics Corporation)
[14]	0,5 К в пограничном слое 1,7 К на высоте 4 км	$\pm 0,5$ К	–	Прибор RPG-HATPRO
[17]	0,5–1,5 К на высоте 0–0,5 км 1,5 К на высоте 0,5–3,5 км	$\pm 1,0$ К в пограничном слое	–	Прибор TP/WVP 3001 (Radiometrics Corporation)
[5]	1,0–1,5 К до высоты 3 км	$\pm 1,0$ К	–	Прибор RPG-HATPRO

Существуют потенциальные возможности увеличения «потолка» температурного зондирования и уменьшения погрешностей за счет разработки специализированных алгоритмов и процедур обработки, включающих настройку и коррекцию алгоритмов с учетом особенностей конкретного прибора и условий эксперимента. (Данный вывод подтверждается и зарубежным опытом использования аналогичной аппаратуры.)

Функционирование аппаратуры обеспечивалось Ресурсным центром «Геомодель» Санкт-Петербургского государственного университета [18].

Работа выполнена при частичном финансировании гранта РФФИ № 12-05-445а и проектов СПбГУ 11.31.547.2010 и 11.37.28.2011.

1. *Наумов А.П., Ошарина Н.Н., Троицкий А.В.* Наземное термическое зондирование атмосферы в микроволновом диапазоне // Изв. вузов. Радиофиз. 1999. Т. 42, № 1. С. 45–59.
2. *Караштин Д.А., Мухин Д.Н., Скалыга Н.К., Фейгин А.М.* Байесов подход к восстановлению вертикального профиля температуры стратосферы по данным наземных измерений солнечного излучения в миллиметровых линиях поглощения молекулярного кислорода // Изв. вузов. Радиофиз. 2009. Т. 52, № 10. С. 785–794.
3. *Караштин Д.А., Мухин Д.Н., Скалыга Н.К., Фейгин А.М.* Восстановление вертикального профиля температуры стратосферы по данным наземных измерений спектра собственного излучения атмосферы в миллиметровых линиях поглощения молекулярного кислорода // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. Т. 73, № 12. С. 1750–1755.
4. *Швецов А.А., Федосеев Л.И., Караштин Д.А., Большаков О.С., Мухин Д.Н., Скалыга Н.К., Фейгин А.М.* Измерение профиля температуры средней атмосферы с помощью наземного спектрорадиометрического комплекса // Изв. вузов. Радиофиз. 2010. Т. 53, № 5–6. С. 356–361.
5. *Crewell S., Lohnert U.* Accuracy of Boundary Layer Temperature Profiles Retrieved with Multifrequency Multiangle Microwave Radiometry // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2007. V. 45, N 7. P. 2195–2201.
6. *Pernigotti D., Rossa A.M., Ferrario M.E., Sansone M., Benassi A.* Influence of ABL stability on the diurnal cycle of PM10 concentration: illustration of the potential of the new Veneto network of MW-radiometers and SODAR // Meteorol. Zeitschrift. 2007. V. 16, N 5. P. 505–511.
7. *Кадыгров Е.Н.* Микроволновая радиометрия атмосферного пограничного слоя – метод, аппаратура, результаты измерений // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 7. С. 697–704.
8. *Кадыгров Е.Н., Горелик А.Г., Миллер Е.А., Некрасов В.В., Троицкий А.В., Тоцилкина Т.А., Шапошников А.Н.* Результаты мониторинга термодинамического состояния тропосферы многоканальным микроволновым радиометрическим комплексом // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 6. С. 459–465.
9. *Rose T., Crewell S., Lohnert U., Simmer C.* A network suitable microwave radiometer for operational monitoring of the cloudy atmosphere // Atmos. Res. 2005. V. 75, N 3. P. 183–200.
10. *MWRnet – An International Network of Ground-Based Microwave Radiometers.* [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://cetemps.aquila.infn.it/mwrnet/> свободный. Загл. с экрана.
11. *Haobo Tan, Jietai Mao, Huanhuan Chen, Chan P.W., Dui Wu, Fei Li, Tao Deng.* A Study of a Retrieval Method for Temperature and Humidity Profiles from Microwave Radiometer Observations Based on Principal Component Analysis and Stepwise Regression // J. Atmos. Ocean. Technol. 2011. V. 28, N 3. P. 378–389.
12. *Radiometer Physics GmbH* [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.radiometer-physics.de/rpg/html/Home.html> свободный. Загл. с экрана.
13. *Косцов В.С., Поберовский А.В., Осипов С.И., Тимофеев Ю.М.* Комплексная методика интерпретации наземных микроволновых спектральных измерений в задаче определения вертикального профиля содержания озона // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 4. С. 354–360.
14. *Lohnert U., Maier O.* Operational profiling of temperature using ground-based microwave radiometry at Payerne: prospects and challenges // Atmos. Meas. Technol. 2012. V. 5, N 5. P. 1121–1134.
15. *University of Wyoming. College of Engineering. Department of Atmospheric Science. Weather* [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> свободный. Загл. с экрана.
16. *Guldner J., Spankuch D.* Remote Sensing of the Thermodynamic State of the Atmospheric Boundary Layer by Ground-Based Microwave Radiometry // J. Atmos. Ocean. Technol. 2001. V. 18, N 6. P. 925–933.
17. *Cimini D., Hewison T.J., Martin L., Guldner J., Gaffard C., Marzano F.S.* Temperature and humidity profile retrievals from ground-based microwave radiometers during TUC // Meteorol. Zeitschrift. 2006. V. 15, N 5. P. 45–56.
18. *РЦ СПбГУ «Геомодель».* [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://geomodel.spbu.ru/> свободный. Загл. с экрана.

***N.A. Zaitsev, Yu.M. Timofeyev, V.S. Kostsov* Intercomparison of radiosonde and ground-based remote measurements of temperature profiles in the troposphere.**

The ground-based experiment on microwave temperature sounding of the troposphere by the RPG-HATPRO instrument performed at the Faculty of Physics, St.Petersburg State University, since June 2012 is described. On the basis of intercomparison of the results with radiosonde data the estimates have been obtained of the temperature retrieval errors for the algorithm which was developed by the manufacturer of the instrument. The errors have been compared with corresponding values for similar instruments functioning abroad. The conclusion has been made about the necessity to develop specialized algorithms and data processing procedures which include adaptation and correction of algorithms accounting for peculiarities of specific instrument and experimental conditions.