

# Анализ измерений профиля температуры микроволновым радиометром RPG-NATPRO на станции дистанционного зондирования СПБГУ

Зайцев Н. А.

Санкт-Петербургский государственный университет,  
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб. 7/9, Россия  
E-mail: zaitsev.n.spb@gmail.com

## Аннотация

По данным измерений на станции дистанционного зондирования СПБГУ за период 2013–2021 гг. были получены средние значения профилей температуры в тропосфере до высоты 10 км. Используя метод наименьших квадратов (МНК) для первичной интерполяции исследуемых рядов, были получены линейные тренды и составлены таблицы для оценки изменения профиля температуры в тропосфере. Также были обнаружены периоды, где наблюдалось минимальное и максимальное изменение годовой температуры.

**Ключевые слова:** наземное микроволновое дистанционное зондирование, профиль температуры в тропосфере.

## Введение

Методы дистанционного зондирования атмосферы на основе измерений микроволнового (МКВ) излучения развиваются с середины прошлого века, в том числе методы термического зондирования с использованием измерений в полосе кислорода 50–60 ГГц [1–3]. Достигнуты значительные успехи как в теоретических исследованиях, включающих усовершенствование алгоритмов решения обратных задач, так и в экспериментальных исследованиях, направленных на уточнение спектроскопической информации по поглощению МКВ излучения кислородом и создание современной высокоточной автоматизированной аппаратуры.

С августа 2012 года на базе Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета (СПБГУ) в Ресурсном центре «Геомодель» [4] началась эксплуатация микроволнового радиометра RPGNATPRO производства немецкой компании Radiometer Physics GmbH [5]. 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 водозапаса облаков в автоматическом непрерывном режиме.

## Краткое описание оборудования

Технические характеристики микроволнового прибора RPG-NATPRO представлены со всей полнотой на сайте разработчика, там же доступны для загрузки руководства по установке, эксплуатации и проведению измерений [5]. Центральные частоты и значения полуширины каналов радиометра RPGNATPRO представлены в Таблице 1. Форму типичных спектральных аппаратных функций для этих каналов можно найти в работе [6].

Таблица 1

Центральные частоты  $f$  и полуширина  $\Delta f$  каналов аппаратуры RPGNATPRO.

№ канала	1	2	3	4	5	6	7
$f$ [GHz]	22.24	23.04	23.84	25.44	26.24	27.84	31.4
$\Delta f$ [MHz]	230	230	230	230	230	23	230
№ канала	8	9	10	11	12	13	14
$f$ [GHz]	51.26	52.28	53.86	54.94	56.66	57.30	58.00
$\Delta f$ [MHz]	230	230	230	230	600	1000	2000

Прибор установлен на наблюдательной платформе на крыше здания НИИФ СПБГУ на базе Научного парка СПБГУ в ресурсном центре «Геомодель». Географические координаты

59.88107°N, 29.82597°E. Высота установки прибора над уровнем моря 56 метров. Угловое вертикальное сканирование осуществляется в плоскости север-юг в направлении на север. Прибор работает непрерывно, измерения осуществляются в двух режимах. В основном режиме измеряется интенсивность нисходящего МКВ излучения в зенитном направлении — выдача данных 1 раз в 2 секунды. Дополнительный режим включается периодически (1 раз в 20 минут), в этом режиме производится угловое сканирование. Дополнительный режим предназначен для повышения точности определения температуры и влажности в пограничном слое атмосферы. Такая комбинация режимов работы рекомендована изготовителем прибора и позволяет заметно увеличить информативность МКВ измерений относительно профилей температуры и влажности. Алгоритм изготовителя прибора RPG-HATPRO, который реализован в аппаратуре, основан на методе квадратичной регрессии.

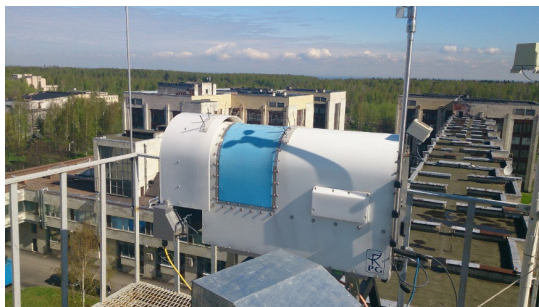


Рис. 1. Внешний вид аппаратуры *RPG-HATPRO*, установленной на крыше здания

### Результаты измерений

По данным измерений на станции дистанционного зондирования СПБГУ за период 2013–2021 гг. были получены средние значения профилей температуры в тропосфере до высоты 10 км. На Рис. 2 представлен временной ряд изменения температуры на некоторых высотах.

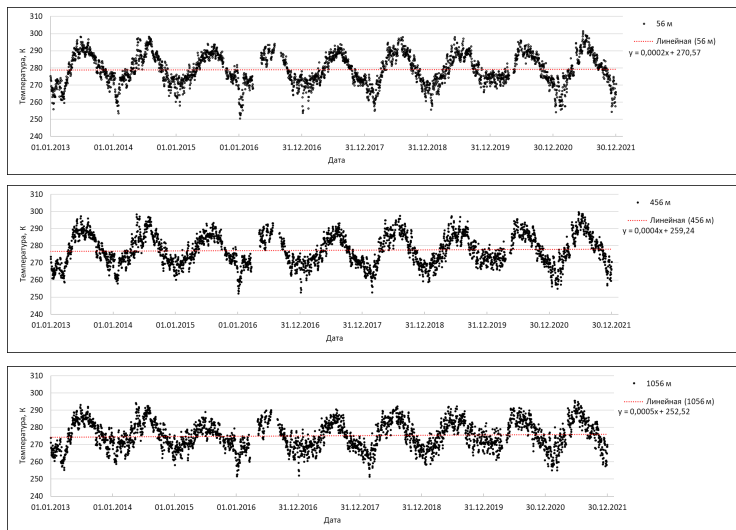


Рис. 2. Временной ряд изменения температуры на высотах 56 м, 456 м и 1056 м

Принимая во внимание тот факт, что аппаратура RPG-HATPRO позволяет получить оперативную информацию о восстановленных температурных профилях до высот 3–4 км, но при этом наименьшая погрешность определения профиля температуры характерна для слоя до 2 км [7]. По этой причине ограничимся рассмотрением только слоя до 2 км.

Анализируя полученные результаты, можно обратить внимание на характерные периоды, где наблюдалось минимальное изменение годовой температуры (2015 г.—, 2020 г.—) и максимальное изменение годовой температуры (2021 г.—). На Рис. 3 представлена гистограмма изменения годовой разности температуры в приземном слое до высоты 200 м.

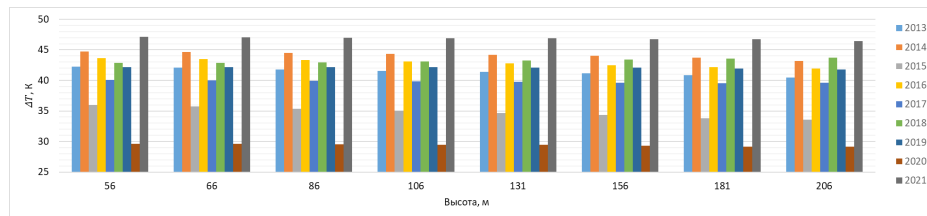


Рис. 3. Гистограмма изменения годовой разности температуры в приземном слое

На основе первичного анализа временных рядов изменения температуры (период 2013–2021 гг.) была составлена Таблица 2, в которой представлены скорости изменения температуры, рассчитанные по методу наименьших квадратов (МНК).

Таблица 2. Скорость изменения температуры за рассматриваемый период 2013–2021 гг. в слое до 2км.

Высота, м	56	66	86	106	131	156	181	206	256	306	381	456	531
Скорость, К/день	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0003	0,0003	0,0004	0,0004	0,0005
Скорость, К/год	0,073	0,073	0,073	0,073	0,073	0,073	0,073	0,073	0,1095	0,1095	0,146	0,146	0,1825
Высота, м	606	681	756	856	956	1056	1206	1356	1506	1656	1856	2056	
Скорость, К/день	0,0005	0,0005	0,0006	0,0006	0,0006	0,0005	0,0005	0,0004	0,0003	0,0003	0,0002	0,0001	
Скорость, К/год	0,1825	0,1825	0,219	0,219	0,219	0,1825	0,1825	0,146	0,1095	0,1095	0,073	0,0365	

Исходя из данных Таблицы 2 можно заключить следующее, что скорость роста температуры увеличивается с высотой до ~900 м и достигает значений от ~ 0,07 К/год до ~ 0,22 К/год. В дальнейшем планируется провести более подробный анализ.

Работа выполнена при поддержке СПбГУ НИР 95439487. Для измерений использовалось оборудование РЦ «Геомодель» Научного парка СПбГУ.

### Литература

1. Наумов А. П., Ошарина Н. Н., Троицкий А. В. Наземное термическое зондирование атмосферы в микроволновом диапазоне // Изв. Вузов. Радиофизика. — 1999. — Т. 42. — № 1, С. 45–59.
2. Караитин 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 // Известия ВУЗов. Радиофизика. — 2009. — Т. 52. — № 10. — С. 785–794.
3. Караитин 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 // Известия РАН. Серия физическая. — 2009. — Т. 73. — № 12. — С. 1750–1755.
4. Интернет-ресурс 1: РЦ СПбГУ «Геомодель». [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://http://geomodel.spbu.ru/> свободный. — Загл. с экрана.
5. Интернет-ресурс 2. Radiometer Physics GmbH. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.radiometer-physics.de/rpg/html/Home.html> свободный. — Загл. с экрана.
6. Lohnert U. and Maier O. Operational profiling of temperature using ground-based microwave radiometry

- at Payerne: prospects and challenges // Atmos. Meas. Tech. — 2012. — V.5. — P. 1121–1134.
7. Зайцев Н. А., Тимофеев Ю. М., Косцов В. С. Сравнение радиозондовых и наземных дистанционных микроволновых измерений профилей температуры в тропосфере. // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 05. С. 392–398.

## **Analysis of temperature profile measurements by the microwave radiometer RPG-HATPRO at the remote sensing station of St. Petersburg State University**

Zaitsev N.A.

St. Petersburg State University,  
199034 St. Petersburg, Russia  
E-mail: zaitsev.n.spb@gmail.com

### **Abstract**

According to measurements at the remote sensing station of St. Petersburg State University for the period 2013–2021, average daily values of temperature profiles in the troposphere were obtained up to a height of 10 km. Linear trends were obtained and tables were compiled to assess the change in the temperature profile in the troposphere, using the least squares method (LSM) for the primary interpolation of the studied series. The periods were found where the minimum and maximum changes in annual temperature were observed.

**Keywords:** ground-based microwave remote sensing, temperature profile in the troposphere.