

**Эволюция микроволновых приборов для измерения профилей температуры атмосферного пограничного слоя - модификации и результаты использования в научных и практических целях**

А.К. Князев<sup>1</sup>, А.С. Вязанкин<sup>1</sup>, Е.А. Миллер<sup>1</sup>, Е.Н. Кадыгров<sup>1</sup>, А.В. Троицкий<sup>1</sup>,  
А.Н. Шапошников<sup>1</sup>, В.В. Некрасов<sup>1</sup>, Ю.В. Агапов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория», 141700, Московская область, г. Долгопрудный, ул. Первомайская 3,  
E-mail: [enkldz@mail.ru](mailto:enkldz@mail.ru), [ldz@cao-rhms.ru](mailto:ldz@cao-rhms.ru)

*Показано развитие различных модификаций одноканальных микроволновых сканирующих температурных профиломеров и их применение в фундаментальных и прикладных задачах для мониторинга термической стратификации атмосферного пограничного слоя.*

*Ключевые слова: микроволновые измерители профилей температуры, модификации, профиль температуры АПС*

Evolution of microwave devices for measuring atmospheric boundary layer temperature profiles - modifications and results of using for scientific and practical purposes

А.К. Knyazev<sup>1</sup>, А.С. Vyazankin<sup>1</sup>, Е.А. Miller<sup>1</sup>, Е.Н. Kadygrov<sup>1</sup>, А.В. Troitsky<sup>1</sup>,  
А.Н. Shaposhnikov<sup>1</sup>, V.V. Nekrasov<sup>1</sup>, Yu.V. Agapov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Central Aerological Observatory

*Study of the Atmospheric Boundary Layer thermal regime by different types of an angular-scanning single-channel microwave radiometers are presented.*

*Keywords: microwave temperature profile meters, modifications, APS temperature profile*

**Введение.**

Нижняя часть тропосферы, или атмосферный пограничный слой (АПС), или как его еще называют планетарный пограничный слой (ППС), имеет высоту от земной поверхности до порядка 100-300 м в полярных районах и до 1600-2000 м в средних широтах и тропиках. В АПС происходит обмен импульсом, теплом и влагой между подстилающей поверхностью и атмосферой. В отличие от более высоких слоев атмосферы (тропосферы, стратосферы) в этом слое резко выражены суточные изменения температуры и турбулентного обмена [1-4]. Поэтому одной из основных задач исследований АПС является определение законов вертикального распределения профилей температуры и характеристик турбулентности. С точки зрения экологии распространение загрязняющих веществ в АПС по вертикали зависит от степени устойчивости воздуха, т.е. от вида термической стратификации. Характерным для АПС является возникновение температурных инверсий, т.е. ситуаций, когда с высотой температура не уменьшается, а увеличивается. В приборном плане получать регулярные данные о термической стратификации АПС оказалось не простой задачей. Это во многом связано с разнообразием вида температурных инверсий-адиабатических, приземных, приподнятых- подробно они описаны в [5]. В основном для этого использовались данные радиозондов. Но они не обеспечивали непрерывности измерений, особенно когда аэрологическая сеть перешла на зондирование два раза в сутки [3]. Данные поступали также с исследовательских

самолетов, привязных аэростатов, и высотных метеорологических мачт. Но это были не мобильные и весьма дорогостоящие измерения. Появились и дистанционные методы и приборы: оптические (лидары), радиоакустические (системы RASS), а также многоканальные СВЧ радиометры, обеспечивающие непрерывные измерения вплоть до высоты 10 км., но они имели недостаточно высокое вертикальное разрешение профилей температуры в АПС, требовали весьма сложных калибровок и достаточно высокую стоимость для рутинных сетевых измерений [4,5-8]. Поэтому с 1993 года в ЦАО были разработаны специализированные микроволновые измерители профилей температуры АПС, в которых использовались одноканальные высокочувствительные сканирующие по углу места микроволновые (СВЧ) радиометры на частотах вблизи частоты 60 ГГц [5]. Эволюции их развития и основным результатам их использования посвящен данный доклад. Физические основы создания таких устройств были изложены в работах [6,7,8]. Непрерывные измерения профиля температуры АПС позволяют получать данные, необходимые для прогноза распространения загрязнений в атмосфере городов и крупных промышленных объектов; исследований вертикальной структуры городского острова тепла; прогноза условий распространения радиоволн; повышения качества сверхкраткосрочного и краткосрочного прогноза погоды, прогноза опасных метеорологических явлений. Особенности измерений термической стратификации АПС с помощью СВЧ радиометра были описаны в 1978 году в работе [9]. Практически они были реализованы А.В. Троицким с участием Е.Н. Кадыгрова и А.Н. Шапошникова в 1989 году. Первый прибор был сделан на основе доработки СВЧ-радиометра для измерения профилей температуры стратосферы с высотных аэростатов, разработанного в 1986-1989 г.г. в Центральной аэрологической обсерватории (руководитель проекта - Е.Н.Кадыгров) совместно со специалистами Института космических исследований АН СССР (д.ф.-м. н. И.А. Струков с сотрудниками) (Рис.1) [10]. С помощью этого прибора впервые Кадыгровым Е.Н., Троицким А.В. и Шапошниковым А.Н. на полевой экспериментальной базе ЦАО (г. Рыльск Курской области) в 1989 г были проведены дистанционные измерения профилей температуры АПС и сравнения с данными привязного аэростата (Шифрин Д.М.) [11].



**Рис.1. СВЧ радиометр 60 ГГц производства ИКИ РАН**

Были успешно разработаны основные научно-методические вопросы таких измерений [5,10,12,13]. Впервые результаты разработки нового метода и успешных

натурных испытаний экспериментального образца профилемера были опубликованы в 1990 г. в Трудах Всесоюзной конференции [11], а затем в 1992 г. в Трудах международного симпозиума в Англии [12] и в журнале Известия ВУЗов, Радиофизика [13], а в 1993 г. опубликованы в США с защитой авторских прав в журнале Международного союза инженеров «IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing» [14]. Впервые первая версия профилемера была использована практически в научном проекте ИФА РАН им.А.М.Обухова- в экологическом эксперименте «Тройка» (руководитель - чл. корреспондент РАН профессор Н.Ф. Еланский (Рис.2), затем в Англии [15].



**Рис.2. Первая версия профилемера МТР-5 в эксперименте ИФА РАН им.А.М.Обухова «Тройка»**

Специально для этой версии профилемера был разработан одноканальный СВЧ радиометр с центральной частотой 60 ГГц, система сканирования по углу места и метеозащита, обеспечивающая непрерывную круглосуточную работу прибора в любых метеоусловиях кроме ливневых жидких осадков. Работа специалистов Центральной аэрологической обсерватории по разработке нового метода и аппаратуры для дистанционного измерения профилей температуры АПС была отмечена в 2002 г. ведомственной премией Росгидромета за лучшие научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы. Позднее были разработаны различные варианты микроволновых температурных профиломеров для АПС: стандартный (МТР5), мобильный (МТР5М), полярный (МТР5Р) [5,16-18]. Первые версии имели рабочую частоту 60 ГГц, полосу пропускания 2 ГГц, приведенную чувствительность 0.1 К, что обеспечивало измерение профилей температуры от земной поверхности до высоты 600 м. Более подробно технические характеристики приборов изложены в [16]. В течение ряда лет проводились различные усовершенствования этих профиломеров. Форма корпуса в виде цилиндра, предложенная А.Мироновым, обеспечила удобный режим прибора в любых метеорологических условиях (Рис.3). Полярная версия прибора имела более высокое вертикальное разрешение на нижних 100 м, а также сохраняла работоспособность при внешней температуре минус 70<sup>0</sup>С [17]. Были также разработаны несколько мобильных вариантов приборов для установки на различных автомобилях[18] (Рис.4).



**Рис.3. Варианты микроволновых профиломеров-для средних широт (слева) и первая полярная версия (справа).**



**Рис.4. Различные варианты микроволновых температурных профиломеров АПС.**

В последних версиях микроволновых профиломеров МТР5 частота принимаемого излучения была изменена с 60 на 56 ГГц, полоса пропускания уменьшена вдвое. Это позволило увеличить высоту зондирования до 1-2 км. Используется один из двух типов СВЧ радиометра-либо модуляционный радиометр супергетеродинного типа с СВЧ усилителем на входе, либо модуляционный СВЧ радиометр прямого усиления. Принцип действия профиломера показан на Рис.5., а основные технические характеристики представлены в Таблице 1.



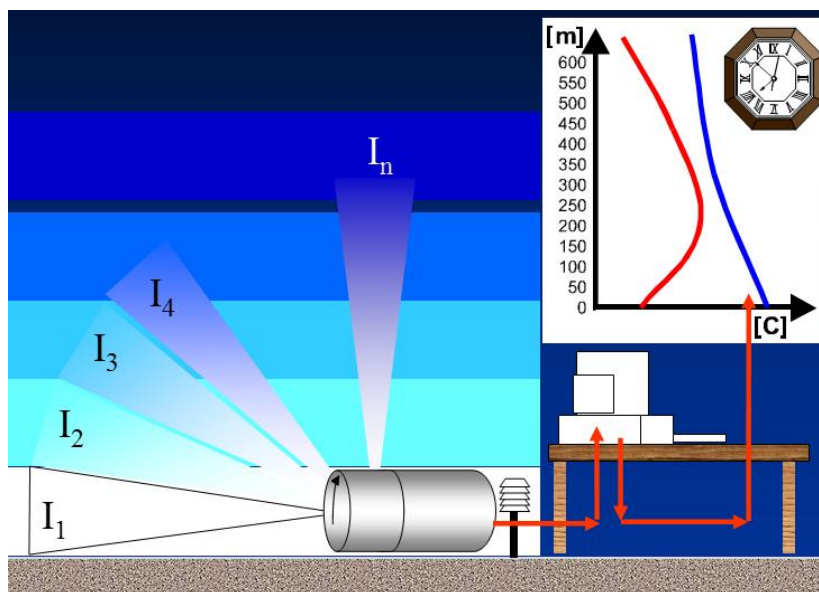


Рис.5. Принцип действия микроволнового температурного профилера для АПС.

Таблица 1. Основные технические характеристики базовой модели прибора

Диапазон высот измерения профиля температуры	0-1000 м
Представление данных в слое 0-100 метров с шагом	25 м
Представление данных в слое 100-1000 метров с шагом	50 м
Чувствительность (при постоянной времени измерений 1 сек)	не более 0,1 К
Доверительные границы погрешности результата измерений термодинамической температуры атмосферы при доверительной вероятности P=0.95	1,2°C
Доверительные границы погрешности определения высоты измеряемых слоев атмосферы при доверительной вероятности P=0.95	25%
Рабочий диапазон температур	-40°C - +40°C
Стандартный интервал измерений	5 минут
Вес	не более 25 кг
Питание	220 В, 2 А, 50-60Гц;
Мощность потребления	120 Вт (максимальная) 60 Вт (средняя)

### Примеры использования данных микроволновых температурных профилеров АПС

Микроволновые температурные профилеры АПС создавались в первую очередь для наблюдательной сети метеослужбы – простые в эксплуатации, всепогодные, компактные. Но они были востребованы и для уникальных научных исследований: академик Г.С. Голицын анализировал их данные в части исследования городского пограничного слоя атмосферы; член-корреспондент РАН Н.Ф. Еланский – в международном эксперименте «TROICA» и при исследовании вариаций приземного озона на высокогорной научной станции ; д.ф.-м.н, профессор Б.М. Копров – для исследования конвекции в АПС [19,20,22]; д.г.н. Кузнецова И.Н. – для исследования городского острова тепла [5]; д.ф.-м.н. профессор Горчаков – для исследования влияния солнечных затмений на термическую стратификацию АПС [21]; д.ф.-м.н. И.Г. Гранберг, д.ф.-м.н. О.Г Чхетиани, и к.ф.-м.н. Князев А.К. – для исследования особенностей

термической стратификации АПС в аридных регионах в жаркий период времени, д.ф.м.н. профессор И.А. Репина - для исследования взаимодействия океана и атмосферы. Полярные версии микроволновых профиломеров МТР5П использовались на Аляске и в Антарктиде. С помощью профиломеров МТР5 были проведены исследования термической стратификации атмосферы в горной местности, в фиордах Норвегии, на севере острова Сахалин в рамках российско-японского проекта. Используются микроволновые температурные профиломеры и в аэропортах [22-31]. Была сделана оценка возможности применения микроволновых температурных профиломеров для измерения ветра [24]. Уникальные совместные измерения с помощью содаров и МТР-5 проводились в г. Томске под руководством к.ф.м.н. С.Л. Одинцова и в Московском государственном университете под руководством к.ф.м.н. В.П.Юшкова (Кафедра физики атмосферы МГУ). Сотрудники Гидрометцентра РФ под руководством д.г.н. Кузнецовой И.Н. в ежедневном режиме используют данные микроволновых профиломеров Москвы и пригорода для прогноза распространения загрязнений и исследования городского острова тепла. Дистанционные аэрологические измерения, проводимые с помощью наземных микроволновых профиломеров, в отличие от радиозондов позволяют проводить практически непрерывные измерения профилей температуры в городском атмосферном пограничном слое атмосферы. Эти пионерские по своей сути работы в области метеорологии, проводимые с начала 2000-х годов, (что является достаточно редким явлением для современной России) подхвачены и в других государствах. Так, в настоящее время в 11 ведущих европейских странах создана сеть из более 50 пунктов зондирования, оснащенных микроволновыми профиломерами - **MWRnet, An International Network of Ground-based Microwave Radiometers** (из них около 30 - российскими МТП-5) ([http://cetemps.aquila.inf.it/mwrnet/main\\_files/MWRnet.htm](http://cetemps.aquila.inf.it/mwrnet/main_files/MWRnet.htm), [www.radiometer-physics.de](http://www.radiometer-physics.de)). В США с 2014 г. начато развертывание сети по контролю термодинамических характеристик пограничного слоя атмосферы на основе использования микроволновых температурных профиломеров (**Boundary Layer Network**, [www.radiometrics.com](http://www.radiometrics.com)). Аналогичные сети создаются в Китае, Тайване, Японии. Принципиально новые дистанционные непрерывные наблюдения дают возможность проведения мониторинга температурных инверсий в городском атмосферном пограничном слое (АПС) и осуществить оценку влияния большого города на атмосферу как экологического и климатического фактора, осуществить сравнения экспериментальных данных с моделированием. Накопленные непрерывные данные дистанционных измерений МТР-5 в разнесенных пунктах московского региона (синхронные измерения профилей температуры с помощью дистанционных температурных профиломеров МТР-5, установленных в центральной части города и в пригороде) представляют собой редкий натуральный материал для получения статистических характеристик и исследований малоизученных атмосферных процессов в городском пограничном слое. Используются микроволновые температурные профиломеры и на крупных промышленных предприятиях. Уникальные данные о вертикальной структуре городского острова тепла удалось получить с помощью профиломеров МТР-5, установленных в центре Москвы и в пригороде. В целом в Москве установлено 4 профиломера МТР-5, информацией которых пользуется Мосэкомониторинг, Гидрометцентр РФ и ФГБУ ЦАО. Разнесённые измерения МТР-5 дали возможность установить неоднородность пространственной структуры поля температуры в мегаполисе, обусловленной различающимся сезонно вкладом антропогенных источников. На основании данных МТР5 создан постоянно пополняемый цифровой банк данных о температурных инверсиях в московском регионе (Рис.6).



Рис. 6. Структурная схема микроволновой системы ЦАО для мониторинга термического режима АПС.

### Заключение.

Одноканальные сканирующие по углу места микроволновые температурные профилемеры являются уникальными средствами измерений, открывшими новую эру в научных и практических задачах мониторинга термической стратификации атмосферного пограничного слоя.

### Литература

1. Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели). Под ред. Седунова Ю.С., Авдюшина С.И., Борисенкова Е.П., Волковицкого О.А., Петрова Н.Н., Рейтенбаха Р.Г., Смирнова В.И., Черникова А.А. Ленинград: Гидрометеиздат. 1991. 509 с.
2. Орленко Л.Р. Строение планетарного пограничного слоя атмосферы. Ленинград.: Гидрометеиздат. 1979. 270 с.
3. Зайцева Н.А., Балагуров А.М., Крестьянникова Н.Н., Николаев А.В. Современное состояние и перспективы развития аэрологической сети России // Метеорология и гидрология. 2021. № 9, С. 5-20.
4. 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 No 89. WMO/TD No 1309, Geneva, Switzerland: 34 p.
5. Кадыгров Е. Н., Кузнецова И. Н. Методические рекомендации по использованию данных дистанционных измерений профилей температуры в атмосферном пограничном

- слое микроволновыми профилемерами: теория и практика. Долгопрудный, Изд. «Физматкнига», 2015, 171 с.
6. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты. //Москва: Наука, 1974, 188 с.
  7. Meeks M.L., Lilley A.E. The microwave spectrum of oxygen in the Earth's atmosphere // J. Geoph. Res. 1963. V. 68. No1. P. 1683.
  8. Караваев Д.М., Щукин Г.Г.. Современное состояние и перспективы применения микроволновой радиометрии атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 12. С. 1122-1127.
  9. Schonwald B. Determination of vertical temperature profiles for the atmospheric boundary layer by ground based microwave radiometry // Boundary-Layer Meteorology.No 15. 1978. P.453-464.
  10. Власов А.А., Кадыгров Е.Н., Косов А.С., Струков И.А., Троицкий А.В. Аэростатный эксперимент по измерению радиоизлучения атмосферы на волне 5 мм//Исследование Земли из космоса. 1990. № 5. С. 11-17.
  11. Гайкович К.П., Кадыгров Е.Н., Троицкий А.В., Шапошников А.Н. Термическое зондирование пограничного слоя атмосферы на частоте 60 ГГц // В кн.: Применение дистанционных радиофизических методов в исследованиях природной среды. Тез. докл. Всес. конференции. Ереван: ИРФЭ АН Ар. ССР. 1990. С. 28-29.
  12. Gromov V.D., Kadygrov E.N., Kosov A.S. Remote sensing of atmospheric boundary layer at 5 mm wavelength// Open symposium "Wave propagation and remote sensing".Ravenscar.UK: 8-12 June 1992. P. 3.4.1-3.4.5.
  13. Гайкович К. П., Кадыгров Е. Н., Косов А. С., Троицкий А. В. Термическое зондирование пограничного слоя атмосферы в центре линий поглощения кислорода // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1992 . Т. 35. № 2. С. 130-136.
  14. Troitsky A.V., Gaikovich K.P., Gromov V.D., Kadygrov E.N., Kosov A.S. Thermal sounding of atmospheric boundary layer in the oxygen absorption band center at 60 GHz // IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing. 1993. V. 31. No 1. P. 116-120.
  15. 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.//Oxford Press. Meteorological Applications, 1998, V. 5, Issue 4, P. 393-404.
  16. Кадыгров Е. Н. Микроволновая радиометрия термической стратификации атмосферы. Москва.: П.С. ООО «Шанс», 2020. 271 с.
  17. Вязанкин А.С., Вязанкин С.А., Кадыгров Е.Н., Колдаев А.В., Лыков А.Д., Миронов А.Ф., Троицкий А.В., Шапошников А.Н. Новый дистанционный микроволновый измеритель профилей температуры пограничного слоя атмосферы полярных районов (МТП-5П). //Труды XX Всероссийской конференции по распространению радиоволн. Нижний Новгород: 2-4 июля 2002. С. 348-349.
  18. 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 // Метеорология и гидрология. 2007. № 2. С. 54-66.
  19. Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н., академик Голицын Г.С. Остров тепла в пограничном слое атмосферы над большим городом: новые результаты на основе дистанционных данных // Доклады Академии Наук. 2002. Т. 385, № 4. С.541-548.
  20. Копров Б.М., Копров В.М., Кадыгров Е.Н., Макарова Т.И. Экспериментальные исследования конвекции в пограничном слое атмосферы: когерентные структуры при ясном небе и при кучевой облачности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004, Т. 40. № 4. С. 470-484.



21. Горчаков Г.И., Кадыгров Е.Н., Картунова А.В., Исаков А.А., Карпов А.В., Копейкин В.М., Миллер Е.А. Затменные эффекты в пограничном слое атмосферы//Изв.РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 1. С. 104-115.
22. Kadygrov E.N., Zak B., Stamnes K., Alkezweeny A., Simmons J., Storvold R. A microwave Temperature Profiler and a Tethersonde: A Comparative Study in Interior Alaska // 7-th Atmospheric Radiation Measurement Science Team Meeting. San-Antonio. USA. 3-7 March. 1997. P. 18-19.
23. Argentini S., Conidi A., Kadygrov E.N. Temperature measurements at Dome C using a new microwave temperature profiler // Confer. Proc., Italian Physical Society. Ed. M. Colacino. SIF. Bologna: 2004. V. 89. P. 215-227.
24. Kadygrov E.N., Shur G.N., and Viazankin A.S. Investigation of atmospheric boundary layer temperature, turbulence, and wind parameters on the basis of passive microwave remote sensing // Radio Science. 2003. V. 38. No 3. P. Mar 13-1÷13-12.
25. Kadygrov E., Miller E., Fujiyoshi Y., Wakatsuchi M. Investigation of atmospheric boundary layer thermodynamics at the Sakhalin Island by using a microwave temperature profiler // In: Proc. of Int. Symp. "Remote sensing of the Atmosphere, Environment II". 9-12 October 2000. Sendai. Japan. SPIE T. 4152. P. 310÷318.
26. Rotach M.W. Kadygrov E.N., Kadygrov V.N., Miller E.A., et al. Turbulence structure and exchange processes in an alpine valley: The Riviera Project // Bulletin of the American Meteorological Society. 2004. V. 85. No 9. P. 1367-1385.
27. Kadygrov E.N., Agapov Yu.V., Folomeev V.V., Granberg I.G., Shaposhnikov A.N., Vorobeva E.A. Observations of the feature of the atmospheric boundary layer thermal regime at the arid area in a hot season // Proc. of the WMO Tech. Confer."On meteorological and environmental instruments and methods of observation (TECO-2008)". St. Petersburg. November 2008. Report No 96. WMO/TD N 1462. P. 1-8.
28. Эзау И.Н., Вольф Т., Миллер Е.А., Репина И.А., Троицкая Ю.И., Зилитинкевич С.С. Анализ результатов дистанционного мониторинга профиля температуры в нижних слоях атмосферы долины г.Берген (Норвегия) // Метеорология и гидрология. 2013. № 10. С. 93-103.
29. Кузьмин А.В., Горячкин Ю.А., Ермаков Д.М., Ермаков С.А., Комарова Н.Ю., Кузнецов А.С., Репина И.А., Садовский И.Н., Смирнов М.Т., Шарков Е.А., Чухарев А.М. Морская гидрографическая платформа «Кацивели» как подспутниковый полигон на Черном море //Исследование Земли из космоса. 2009. №1.С.31-44.
30. Воробьева Е.А., Шапошников А.Н., Фоломеев В.В., Кадыгров Е.Н. Результаты измерений термической стратификации атмосферного пограничного слоя в каньонах и котловинах Гуамского хребта // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т.23. № 6, .С.505-509.
31. Зуев В.В., Нахтигалова Д.П., Шелехов А.П., Шелехова Е.А., Павлинский А.В., Баранов Н.А., Кижнер Л.И. Применение метеорологического температурного профилемера МТР-5РЕ в аэропорту для определения пространственных зон возможного обледенения воздушного судна // Оптика атмосферы и океана,2015, Т. 28, № 11, С. 1029-1034.