

УДК 551.501.8:551.50

Современный опыт использования данных наземных микроволновых радиометрических систем для измерения параметров атмосферы

Е.Н. Кадыгров¹, И.Н. Кузнецова², Е.В. Ганьшин¹,
А.Г. Горелик¹, А.К. Князев¹, Е.А. Миллер¹, В.В. Некрасов¹,
Т.А. Точилкина¹, А.Н. Шапошников^{1*}

¹Центральная аэрологическая обсерватория
141700, г. Долгопрудный, ул. Первомайская, 3

²Гидрометцентр России
123242, г. Москва, Большой Предтеченский пер., 11–13

Поступила в редакцию 25.01.2017 г.

Анализируются возможности современных зарубежных и отечественных наземных радиометрических систем для измерения структурных параметров атмосферы: профилей температуры, содержания водяного пара и жидкой воды. Приводятся примеры использования данных отечественных микроволновых профиломеров МТР-5 в задачах исследования вертикальной структуры городского острова тепла, совершенствования прогноза неблагоприятных метеорологических явлений, мониторинга термической стратификации атмосферного пограничного слоя в полярных регионах во время солнечных затмений. Представлены некоторые результаты исследования различных видов облачности с помощью многоканального СВЧ-комплекса «Микрорадаком».

Ключевые слова: микроволновая радиометрия, профили температуры атмосферы, водозапас облаков, влагозапас атмосферы, микроволновые профиломеры; microwave remote sensing, atmospheric temperature profiles, integral water vapour, integral liquid water, microwave profilers.

Введение

В настоящее время мониторинг состояния атмосферы невозможно представить без наземных дистанционных методов и технических средств микроволнового радиометрического зондирования атмосферы. Главным преимуществом дистанционных методов является возможность проведения непрерывных и мобильных измерений, чего лишены традиционные методы — периодические выпуски одноразовых радиозондов и датчики на высотных метеорологических мачтах. Спутниковые микроволновые радиометры широко используются для указанных выше целей, но фактически не обеспечивают измерение профилей метеопараметров в атмосферном пограничном слое (АПС) и имеют ограничения по точности в слое от поверхности Земли до высот 3–4 км [1, 2].

В связи с этим в Лаборатории дистанционного зондирования Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) в начале XXI в. с учетом последних достижений в области техники СВЧ миллиметрового диапазона радиоволн были разработаны наземные микроволновые радиометрические приборы для исследования атмосферы, обладающие высокой чувствительностью и стабильными характеристиками.

Получение информации о профилях температуры и влагозапасе атмосферы основано на использовании особенностей поглощения радиоволн в атмосфере: для измерения профилей температуры используется резонансное поглощение молекулярного кислорода с максимумом на длине волны 0,5 см, водяной пар имеет резонансное поглощение на длине волны 1,35 см, а наличие жидкой воды в облаках измеряется в так называемом окне прозрачности на длине волны 0,8 см [1–5]. Наиболее известными приборами являются сканирующий одноканальный радиометр МТР-5 для измерения профилей температуры пограничного слоя атмосферы и многоканальный микроволновый комплекс «Микрорадаком» для измерения профилей температуры тропосферы, общего содержания водяного пара и жидкой воды в столбе атмосферы [3, 4]. Данные этих приборов используются в оперативной работе по прогнозированию загрязнений воздуха

* Евгений Николаевич Кадыгров (enkadygrov@gmail.com); Ирина Николаевна Кузнецова (muza@mekom.ru); Евгений Викторович Ганьшин (evgeny.ganshin@gmail.com); Андрей Габриэлович Горелик (ldz@cao-rhms.ru); Александр Константинович Князев (ldz@cao-rhms.ru); Евгений Алланович Миллер (tissary@gmail.com); Владимир Васильевич Некрасов (ldz@cao-rhms.ru); Татьяна Алексеевна Точилкина; Александр Николаевич Шапошников (ldz@cao-rhms.ru).

и опасных метеорологических явлений, изучению вертикальной структуры городского острова тепла, в научных исследованиях атмосферного аэрозоля, процессов взаимодействия океана и атмосферы, создании атласа радиационных характеристик облаков. Физические принципы, лежащие в основе работы данных приборов, подробно описаны в [2, 3, 5, 6, 21, 22, 24], точностные характеристики проанализированы в [3, 8, 14, 21–26], результаты испытаний и сравнений с другими методами измерений наиболее подробно описаны в [3, 7, 13, 14, 22, 23], результаты использования данных наземной микроволновой радиометрической аппаратуры приводятся в [1, 3, 10–12, 14, 15, 18–20, 27–29, 32].

Цель нашей работы – обзор различных областей исследования атмосферы, где использование современных наземных микроволновых радиометрических комплексов способствует как получению новых научных результатов, так и повышению эффективности существующих классических методов наблюдения и прогнозирования состояния атмосферы.

Краткое описание измерительной аппаратуры

Вслед за развитием спутниковых микроволновых приборов в 60–80-х гг. прошлого века стали появляться отдельные экспериментальные образцы наземных микроволновых радиометров для измерения профилей температуры атмосферы, а также общего содержания водяного пара и жидкой воды в столбе атмосферы [2, 5, 16, 17, 21]. Однако это были штучные приборы, в основном используемые в исследовательских лабораториях. И только в конце XX в. появились серийные коммерческие образцы таких приборов, выпускаемые частными компаниями. Это уже были полноценные измерительные комплексы, прошедшие международные сравнения и имеющие все необходимые сертификаты метрологической аттестации.

Первыми на мировом рынке метеорологического оборудования появились 2-канальные радиометры MP-1500 компании Radiometrics, США, обеспечивающие измерение общего содержания водяного пара и жидкой воды в атмосфере (с длинами волн 1,35 и 0,8 см соответственно) [1, 3, 27, 30]. В основном их появление было обусловлено необходимостью валидации спутниковых приборов и создаваемой на основе использования GPS-приемников наземной сети для мониторинга общего содержания водяного пара. Позднее эти приборы были модернизированы и появились многоканальные радиометры MP-3000, состоящие из двух блоков: первый с длинами волн в диапазоне 0,80–1,35 см – для измерения профилей водяного пара и жидкой воды, второй с длинами волн в диапазоне 0,500–0,566 см – для измерения профилей температуры тропосферы [3, 30]. В начале XXI в. появились приборы RPG-NATPRO компании Radiometer-Physics, Германия, внешне и по характеристикам близкие к MP-3000 [1, 3, 26, 31].

В России отечественные серийные микроволновые приборы для измерения профилей температуры атмосферы (МТР-5) появились в начале 90-х гг. Первый экспериментальный образец, разработанный в ЦАО, прошел успешные испытания и сравнения с данными радиозондов и привязных аэростатов в 1989 г. [3]. Он представлял собой одноканальный сканирующий по углу места от горизонта до зенита радиометр с длиной волны 5 мм и чувствительностью 0,05 К при постоянной времени интегрирования 1 с и обеспечивал измерение профилей температуры атмосферы от поверхности Земли до высоты 600 м. Главными его достоинствами являются полностью автоматический режим работы (включая автоматическую калибровку), всепогодность, практически непрерывный режим выдачи измерительной информации, малые габариты и энергопотребление. К недостаткам следует отнести ограничение высоты зондирования (до 1 км) и плохое вертикальное разрешение по сравнению с данными радиозондов [3].

Тиражирование данного прибора частными компаниями обеспечило его широкое внедрение как в России, так и во многих зарубежных странах. Модификациями прибора стали модели МТР-5Н с высотой зондирования до 1 км и полярная версия МТР-5 РЕ с более высоким вертикальным разрешением [3, 32]. В ЦАО был также разработан в 2008–2012 гг. многоканальный комплекс с патентованным названием «Микрорадком», работающий на длинах волн 1,35 и 0,8 см и на шести каналах с длинами волн в диапазоне 0,500–0,566 см. Этот наземный микроволновый комплекс обеспечивает измерение общего содержания водяного пара и жидкой воды в атмосфере, а также измерение профилей температуры в диапазоне высот до 3–4 км (а при безоблачных условиях и до 10 км) [4, 9].

Некоторые примеры использования данных отечественных микроволновых профиломеров

В 2000–2016 гг. с помощью отечественных профиломеров МТР-5 и «Микрорадком» получены новые научные результаты в области исследования нижней тропосферы и в оперативной работе по прогнозированию различных синоптических процессов [3, 10, 11, 14, 15, 20, 28, 32]. В частности, впервые исследована вертикальная структура динамики городского острова тепла (ГОТ) над мегаполисом и динамики термической стратификации атмосферного пограничного слоя (АПС) во время полных солнечных затмений, проведен мониторинг термической структуры АПС в аридном регионе в жаркий период времени, в задачах исследования взаимодействия океана и атмосферы получены данные о профилях температуры АПС над морской поверхностью, проведен мониторинг термической структуры АПС в районе Северного и Южного полюсов Земли, получены данные о характеристиках

различного вида облаков в разных метеорологических ситуациях, предложены новые прогнозы обледенения самолетов в районе аэропортов, усовершенствованы прогнозы возникновения и диссипации туманов, возникновения опасных метеорологических явлений [1, 3, 6, 9, 10, 12, 15, 24, 29]. Получены оценки связи термической устойчивости атмосферы с уровнем загрязнения городской среды. Использование высокочувствительных каналов комплекса «Микроаэром» позволило получить характеристики обводненного аэрозоля (тумана, дымки), исследовать фазовые переходы воды в облаках, а также начать создание атласа радиационных характеристик различных типов облаков [4, 9]. Приведем несколько конкретных примеров.

В настоящее время большое внимание практически во всех мегаполисах мира уделяют исследованию ГОТ как наиболее явному примеру влияния деятельности человека на изменения климата. Как правило, исследуется разность температур город–пригород на уровне поверхности Земли, в приземном слое. Российским ученым за счет использования отечественных профиломеров МТР-5, один из которых был установлен в центре Москвы (Пресня), а второй – в северном пригороде (Долгопрудный), удалось провести пионерские работы по исследованию вертикальной структуры ГОТ над Москвой [3, 10, 11, 14].

В табл. 1 представлены результаты сравнения температуры атмосферы в слое 0–300 м в центре города и в пригороде для различных сезонов. Как правило, сильнее всего влияние города сказывается именно в слое до ~300 м.

Таблица 1
Средняя за месяц разность температур (°С) в центре Москвы (Пресня) и в ближнем пригороде (Долгопрудный) на высотах 0, 100, 200 и 300 м (по данным профиломера МТР-5)

Высота, м	0	100	200	300
Январь	1,06	0,46	0,28	0,30
Февраль	1,37	0,43	0,12	0,07
Март	1,00	0,31	0,16	0,22
Апрель	1,00	0,47	0,46	0,68
Май	0,98	0,38	0,27	0,39
Июнь	1,39	0,70	0,38	0,26
Июль	1,26	0,57	0,27	0,20
Август	1,38	0,72	0,48	0,44
Сентябрь	0,92	0,03	0,01	0,01
Октябрь	0,90	0,37	0,20	0,19
Ноябрь	0,92	0,54	0,38	0,40
Декабрь	1,04	0,75	0,76	0,87
Средняя за год	1,10	0,48	0,31	0,30

На рис. 1 представлен рассчитанный по данным измерений МТР-5 вертикальный профиль среднегодовой температуры в центре Москвы. Он отражает ранее не известную особенность городского АПС, а именно наблюдающийся при осреднении

за год термически неустойчивый нижний 200-метровый слой [3].

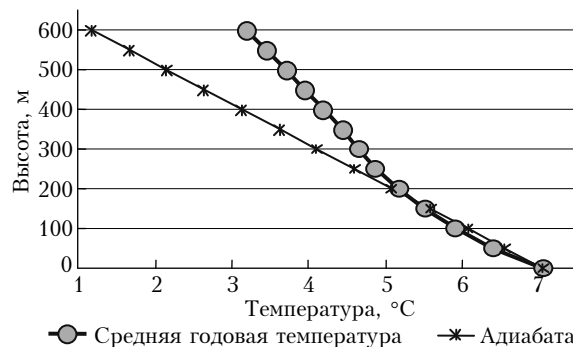


Рис. 1. Вертикальный профиль средней годово́й температуры в центре г. Москвы (Пресня)

Кроме различных характеристик вертикальной структуры ГОТ, профиломер МТР-5 позволяет синоптику на основе измеренных в реальном времени данных оценивать синоптическую ситуацию, более уверенно прогнозировать возможность появления неблагоприятных метеорологических условий (гололед, ледяной дождь, туман) [3]. При сравнении повторяемости температурных инверсий любого вида, установленных с использованием данных измерений приборами МТР-5 и наблюдений на высотной мачте на фоновой удаленной на 100 км от Москвы территории (Обнинск), обнаружено, что в центре Москвы инверсии температуры формируются в 3 раза реже, чем в ближнем пригороде, и в 4 раза реже, чем в невозмущенной мегаполисом местности. То есть среднее отношение частоты образования инверсии на территории вне влияния Московского мегаполиса (Обнинск), пригороде (Долгопрудный) и в центре Москвы (Пресня) равно 4 : 3 : 1 [3, 11].

В 2012–2016 гг. в Москве начали работать еще два прибора МТР-5 в районах Косино и Останкино. В табл. 2 представлена повторяемость приземных температурных инверсий в четырех пунктах измерений МТР-5 в 2016 г. и в двух пунктах в 2007–2009 гг. Повторяемость инверсий рассчитана по средней часовой температуре от общего числа часовых данных. Видно, что в центре и в северном пригороде в последние годы частота приземных инверсий статистически стабильна.

Таблица 2
Повторяемость (%) приземной инверсии в слое 0–100 м в центре Москвы (Пресня), в пригороде (Долгопрудный) и в районах Москвы Косино и Останкино по данным четырех синхронно работающих профиломеров МТР-5

	2016			2007–2009	
	Пресня	ЦАО	Косино	Останкино	Пресня
4–5%	18–19%	20–21%	26–27%	3%	16–18%

С помощью профиломеров МТР-5 впервые удалось наблюдать динамику термической стратификации АПС во время солнечных затмений (табл. 3) [12].

Таблица 3

Абсолютные значения градиентов температуры (охлаждение во время полной фазы солнечного затмения) на различных высотах по данным профиломеров МТР-5

Высота над поверхностью Земли, м	0	100	300	600
Кисловодск, 29 марта 2006 г.	3,9	2,8	2,6	2,0
Плато Шат-Жатмаз, 29 марта 2006 г.	2,8	2,4	1,6	0,7
Новосибирск, 1 августа 2008 г.	2,5	1,2	1,0	0,9
Академгородок (25 км от Новосибирска), 1 августа 2008 г.	1,7	1,0	0,7	0,7
Москва, 1 апреля 2011 г.	0,9	0,7	0,6	0,6

В районе Кисловодска (высота 850 м над уровнем моря) и рядом с ним на плато Шат-Жатмаз (высота 2100 м) полное солнечное затмение проходило в безоблачных условиях, в Новосибирске — при наличии облачности, а в Москве солнечное затмение было частичным. Профиломеры МТР-5 использовались также во время нескольких экспедиций в Черные Земли Калмыкии для исследования процессов опустынивания и особенностей аэрозолей в аридном регионе [18]. Для Калмыкии характерна большая суточная разность температур: от 0 °С ночью до 45 °С днем. Измерения начались в 11:00

20 июля 2007 г., закончились в 14:00 31 июля 2007 г. Изучалось термодинамическое состояние атмосферы. За время экспедиции было получено 252 профиля температуры, из них 103 инверсионных. Велось наблюдение образования инверсий и их распада. Зависимость частоты инверсий от времени суток за время экспедиции представлена на рис. 2.

Кроме пустынь, в последние годы стало больше внимания уделяться климату полярных районов. В 2012 г. в рамках экспедиции «Арктика-2012» полярная версия прибора МТР-5 PE была установлена специалистами Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) на дрейфующей станции «Северный полюс-39» и успешно отработала там весь период дрейфа льдины. Уникальные измерения были продолжены в 2013 г. на станции «Северный полюс-40». В 2015 г. Институтом физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН была организована полярная экспедиция на борту НИС «Академик Тreshников», в которой также использовался прибор МТР-5. А с 2016 г. на о. Большевик архипелага Северная Земля, на котором расположен научно-исследовательский стационар «Ледовая база “Мыс Баранова”» ААНИИ Росгидромета, был установлен и введен в эксплуатацию микроволновый профиломер МТР-5PE [20, 32]. С 2012 г. МТР-5Н непрерывно работает в северных условиях в Нансеновском исследовательском центре (г. Берген, Норвегия) [15]. Надо отметить, что

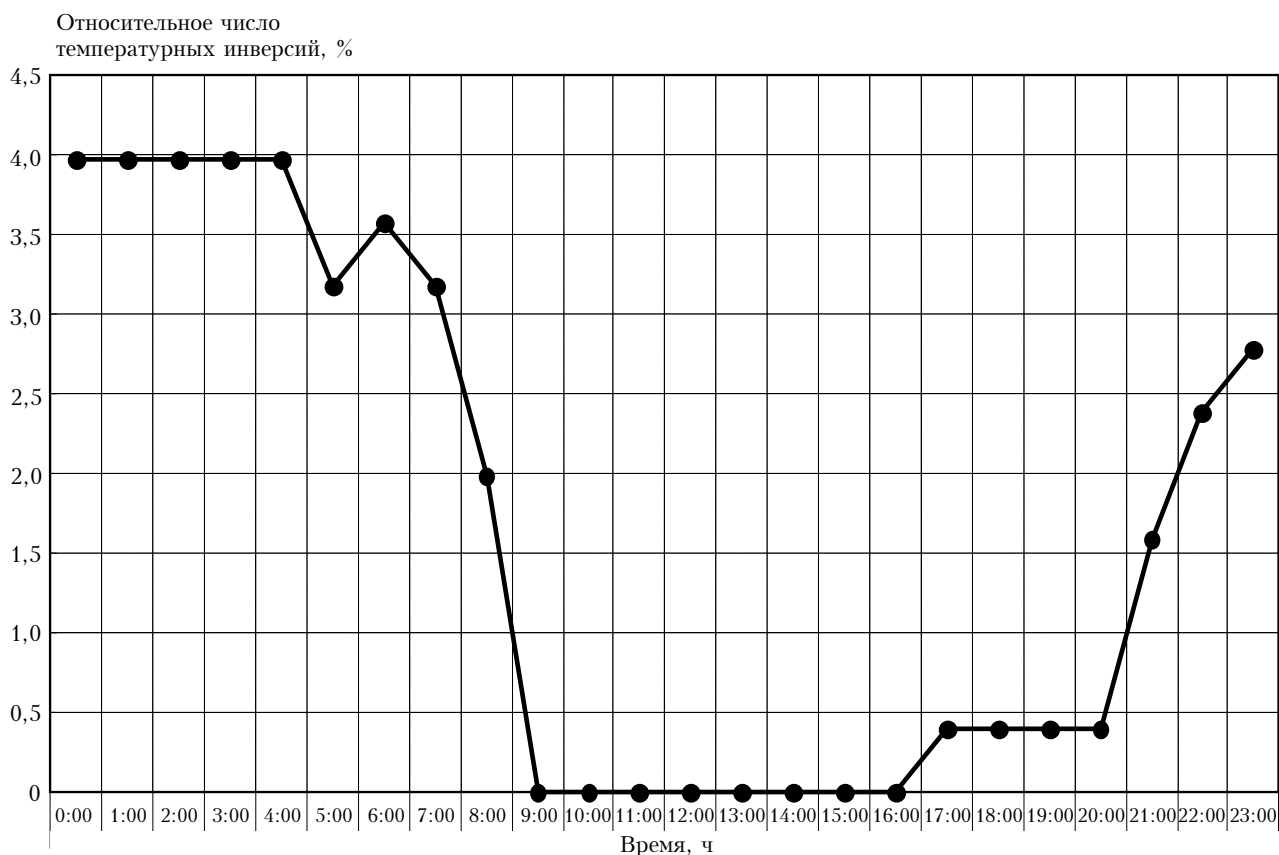


Рис. 2. Процент температурных инверсий от общего числа профилей в течение суток, измеренных с помощью профиломера МТР-5 во время экспедиции в Черные Земли Калмыкии (июль 2007 г.)

более ранняя версия прибора МТР-5PE успешно отработала более года в Антарктиде, на франко-итальянской антарктической станции «Конкордия», на высоте более 3 тыс. м при температурах от -50 до -78 °С [20, 32]. Профилемеры МТР-5 используются также в аэропортах Нью-Йорка, Рима, Сан-Франциско, Цюриха, Казани, Томска в основном в задачах прогноза возникновения и диссипации туманов и в системе прогнозирования возможного обледенения самолетов [19, 32].

Как уже отмечалось ранее, прибор МТР-5 работает в автоматическом режиме и не требует высокой квалификации обслуживающего персонала при эксплуатации, однако его высотный диапазон ограничен 1 км. Для многоканального комплекса «Микроградком» необходима периодическая ручная калибровка с применением специальных микроволновых мишеней. Зато высота зондирования повышена до 3–4 км, имеются отдельные каналы для измерения общего содержания водяного пара и жидкой воды. Измерения на различных частотах совмещены во времени и пространстве. Путем одновременного измерения общего содержания водяного пара, жидкой воды и температуры можно оценить фазовый состав влаги в облаках. Подобные результаты измерений носят как прикладной (мониторинг термодинамических характеристик тропосферы), так и фундаментальный характер (исследование фазовых переходов влаги в облаках) [4, 5, 9, 16].

Большая работа проведена по изучению облачности. С февраля 2012 г. регулярно измеряется тепловое излучение атмосферы. Из всего массива данных были выбраны дни проведения фотосъемки облачности (всего 58 дней), и по этим снимкам можно было достаточно точно идентифицировать тип облачности. Первоначально было сделано предположение, что определенному типу облачности соответствует определенное значение разности между уровнем излучения ясного неба и уровнем излучения от данного типа облаков. Выбирались наиболее характерные участки. На примере выбранных дней были проанализированы полученные результаты. Облака среднего яруса могут давать повышение радиояркостной температуры: на частоте 35 ГГц от 0,03 до 59,2 К, на частоте 22 ГГц от 0,6 до 27,3 К.

Радиояркостная температура — это не термодинамическая температура атмосферы, а радиационная характеристика, входящая в длинноволновое приближение формулы Планка (приближение Рэлея–Джинса). Это температура гипотетического абсолютно черного тела, излучение которого в заданном направлении по своей интенсивности равно излучению атмосферы [2, 6, 16].

Облака нижнего яруса повышают температуру от 0,1 до 270 К на 0,8 см; от 0,4 до 290 К на 1,35 см. Перистая облачность вызывает изменение радиояркостной температуры на длине волны 0,8 см от 0,04 до 5,66 К и на 1,35 см от 1,1 до 11,5 К. Возможно, такое увеличение объясняется недостаточно корректным определением типа облачности или же оно может быть вызвано перисто-кучевыми облаками. В некоторых случаях перистые облака

вызывают общее изменение термодинамического состояния атмосферы. В любом случае это — предмет дальнейшего исследования.

Проведена классификация приращений температуры, вызванных различными типами облачности. Эти приращения были разбиты на пять групп: 0–3 К, 3–10 К, 10–40 К, 40–100 К, >100 К. Выбраны 205 точек на длинах волн 0,8 и 1,35 см. Определено количество случаев, приходящихся на каждый из интервалов. Полученные данные представлены в процентном отношении к общему количеству измерений (табл. 4).

Таблица 4

Классификация приращений радиояркостной температуры ($T_{я\text{ обл.}}$ – $T_{я\text{ ясно}}$), полученные радиометрами комплекса «Микроградком» на длинах волн 0,8 (частота 35 ГГц) и 1,35 см (частота 22 ГГц). Представлено количество случаев, приходящихся на различные интервалы приращений, и их процент к общему количеству измерений (205)

0,8 см			1,35 см		
Диапазон температур, К	Количество случаев	%	Диапазон температур, К	Количество случаев	%
0–3	51	24,9	0–3	34	16,6
3–10	48	23,4	3–10	63	30,7
10–40	62	30,2	10–40	82	40,1
40–100	28	13,7	40–100	13	6,3
> 100	16	7,8	> 100	13	6,3
<i>Итого</i>	205	100	<i>Итого</i>	205	100

Заключение

Опыт использования современных наземных микроволновых радиометрических систем для измерения структурных параметров атмосферы показал их высокую эффективность как в области научных исследований, так и в оперативной синоптической практике. При дефиците информации о процессах в нижней атмосфере многолетний опыт использования данных МТР-5 подтверждает эффективность дистанционного мониторинга термического состояния нижних слоев атмосферы как средства контроля самой изменчивой части атмосферы — атмосферного пограничного слоя. Это может дать новое развитие дистанционному аэрологическому зондированию. Данные одноканальных сканирующих температурных профиломеров прежде всего позволяют проводить подробный анализ процессов в предшествующее время, уточнять не выявленные традиционными способами явления и определять их природу, обнаруживать явления, обусловленные влиянием загрязнений на термические процессы в нижних слоях атмосферы. В настоящее время 22 микроволновых температурных профиломера используются на наблюдательной сети Росгидромета. Всего их изготовлено в России более 100 экземпляров, они работают в таких странах, как США, Япония, Франция, Италия, Испания, Германия, Норвегия, Финляндия, Австралия, Китай, Кувейт, Вьетнам и в ряде

других. Многие отечественные институты, работа которых связана с исследованием атмосферы, используют данные этих приборов: Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Институт прикладной астрономии РАН, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Геофизическая обсерватория «Борок» РАН, Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Центральная аэрологическая обсерватория (с непрерывной передачей данных в Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации), НПО «Тайфун», Бюро прогноза погоды по Москве и Московской области, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, ряд других университетов. Что касается многоканального комплекса «Микроградком», то он не уступает лучшим зарубежным образцам и позволяет проводить исследования фазовых переходов влаги в облаках, а в будущем, возможно, позволит создать новый атлас облаков с градиентами их радиационных характеристик.

1. *Караваяев Д.М., Щукин Г.Г.* Современное состояние и перспективы применения микроволновой радиометрии атмосферы // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 12. С. 1122–1127; *Karavaev D.M., Shchukin G.G.* Status and prospects of application of microwave radiometry of the atmosphere // *Atmos. Ocean.* Opt. 2016. V. 29, N 3. P. 308–314.
2. *Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И.* Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: ЛЕНАНД, 2015. 333 с.
3. *Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н.* Методические рекомендации по использованию данных дистанционных измерений профилей температуры в атмосферном пограничном слое микроволновыми профилимерами: теория и практика. Долгопрудный: «Физматкнига», 2015. 171 с.
4. *Кадыгров Е.Н., Горелик А.Г., Миллер Е.А., Некрасов В.В., Троицкий А.В., Точилкина 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.
5. *Троицкий А.В.* Дистанционное определение температуры атмосферы из спектральных радиометрических измерений в линии λ 5 мм // *Изв. вузов. Радиофиз.* 1986. Т. 29, № 8. С. 878–887.
6. *Кадыгров Е.Н.* Микроволновая радиометрия атмосферного пограничного слоя – метод, аппаратура, результаты измерений // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 7. С. 697–704.
7. *Вязанкин А.С., Кадыгров Е.Н., Мазурин Н.Ф., Троицкий А.В., Шур Г.Н.* Сравнение данных микроволнового радиометра и высотной метеорологической мачты при измерениях профиля температуры и структуры ее неоднородностей // *Метеорол. и гидрол.* 2001. № 3. С. 34–44.
8. *Юшков В.П.* Оценка пространственной неоднородности температурной стратификации в пограничном слое Московского мегаполиса по данным дистанционных измерений // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 11. С. 1012–1022; *Yushkov V.P.* Estimation of spatial

inhomogeneities of thermal stratification in the boundary layer of the Moscow megalopolis from remote sensing // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 1. P. 56–66.

9. *Кадыгров Е.Н., Ганьшин Е.В., Миллер Е.А., Точилкина Т.А.* Наземные температурные профилимеры: потенциал и реальность // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 6. С. 521–528; *Kadygrov E.N., Ganshin E.V., Miller E.A., Tochilkina T.A.* Ground-based microwave temperature profilers: Potential and experimental data // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 6. P. 598–605.
10. *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. АН.* 2002. Т. 385, № 4. С. 541–548.
11. *Кузнецова И.Н., Кадыгров Е.Н., Миллер Е.А., Нахаев М.И.* Характеристики температуры в нижнем 600-метровом слое по данным дистанционных измерений приборами МТР-5 // *Оптика атмосф. и океана.* 2012. Т. 25, № 10. С. 877–883.
12. *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. АН.* 2007. Т. 417, № 1. С. 90–93.
13. *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; *Zaitsev N.A., Timofeyev Yu.M., Kostsov V.S.* Comparison of radio sounding and ground-based remote measurements of temperature profiles in the troposphere // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 5. P. 386–392.
14. *Кадыгров Н.Е., Кручицкий Г.М., Лыков А.Д.* Количественные оценки возмущений, вносимых мегаполисом в поле температуры атмосферного пограничного слоя // *Изв. АН. Физ. атмосф. и океана.* 2007. Т. 43, № 1. С. 1–13.
15. *Эзау И.Н., Вольф Т., Миллер Е.А., Ретина И.Н., Троицкая Ю.И., Зилитинкевич С.С.* Анализ результатов дистанционного мониторинга профиля температуры в нижних слоях атмосферы долины г. Берген (Норвегия) // *Метеорол. и гидрол.* 2013. № 10. С. 93–103.
16. *Степаненко В.В., Щукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю.* Радиотеплолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 283 с.
17. *Горелик А.Г., Фролов Ю.А., Щукин Г.Г.* Радиотепловые измерения влажности атмосферы и интегральной влажности облаков // *Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана.* 1973. Т. 9, № 5. С. 928–936.
18. *Горчаков Г.И., Карпов А.В., Кузнецов Г.А., Бунтов Д.В.* Квазипериодическая сальтация в ветропесчаном потоке на опустыненной территории // *Оптика атмосф. и океана.* 2016. Т. 29, № 6. С. 472–477; *Gorchakov G.I., Karpov A.V., Kuznetsov G.A., Buntov D.V.* Quasiperiodic saltation in the windsand over desertified areas // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 6. P. 501–506.
19. *Зуев В.В., Нахтигалова Д.П., Шелехов А.П., Шелехова Е.А., Павлинский А.В., Баранов Н.А., Кижнер Л.И.* Применение метеорологического температурного профилимера МТР-5 РЕ в аэропорту для определения пространственных зон возможного обледенения воздушного судна // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 11. С. 1029–1034; *Zuev V.V., Nakhtigalova D.P., Shelekhov A.P., Shelekhova E.A., Pavlinskii A.V., Baranov N.A., Kizhner L.I.* Application of MTR-5 PE meteorological temperature profiler in an

- airport for determining spatial zones of possible aircraft icing // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 2. P. 186–190.
20. *Repina I., Varentsov M., Makshitas A., Kadygrov E., Khavina E.* Polar atmospheric boundary layer temperature structure under differ meteorological conditions // *Proc. WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation TECO-2014.* Saint Petersburg, Russian Federation, 7–9 July, 2014. P. 1–6.
 21. *Westwater E.R.* Ground-based microwave remote sensing of meteorological variables. Atmospheric remote sensing by microwave radiometry. New York: John Wiley & Sons, 1993. P. 145–213.
 22. *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 // *Appl. Meteorol.* 1998. V. 5, N 4. P. 393–404.
 23. *Westwater E.R., Han Y., Irisov V.G., Levskiy 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, N 7. P. 805–818.
 24. *Kadygrov E.N., Shur G.N., Viazankin A.S.* Investigation of atmospheric boundary layer temperature, turbulence, and wind parameters on the basis of passive microwave remote sensing // *Radio Sci.* 2003. V. 38, N 3. P. Mar13-1–13-12.
 25. *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.
 26. *Crewell S., Lohnert U.* Accuracy of boundary layer temperature profiles retrieved with multifrequency multi-angle microwave radiometry // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2007. V. 45, iss. 7. P. 2195–2201.
 27. *Knupp K.R., Ware R., Cimini D., Vandenberghe F., Vivekanandan J., Westwater E., Coleman T., Phillips D.* Ground-based passive microwave profiling during dynamic weather conditions // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2009. V. 26, N 6. P. 1057–1073.
 28. *Rotach M.W., Calanca P., Graziani G., Gurtz J., Steyn D., Vogt R., Andretta M., Christen A., Cieslik S., Comolli R., Wekker S.De, Galmarini S., Kadygrov E.N., Kadygrov V.N., Miller E.A., Neininger B., Rucker M., Van Gorsel E., Weber H., Weiss A., Zappa M.* Turbulence structure and exchange processes in an alpine valley: The Riviera Project // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2004. V. 85, N 9. P. 1367–1385.
 29. *Argentini S., Conidi A., Kadygrov E.N., Pellicioni A., Viola A.* Temperature measurements at Dome C using a new microwave temperature profiler // *Confer. Proc. Italian Physical Society.* 2004. V. 89. P. 215–227.
 30. URL: www.radiometrics.com
 31. URL: www.radiometer-physics.de
 32. URL: www.mtp5.ru

E.N. Kadygrov, I.N. Kuznetsova, E.V. Ganshin, A.G. Gorelik, A.K. Knyazev, E.A. Miller, V.V. Nekrasov, T.A. Tochilkina, A.N. Shaposhnikov. **Modern experience of using ground-based microwave radiometric systems for the study of atmospheric parameters.**

The possibilities of modern foreign and domestic ground-based microwave radiometric systems of measuring structural atmospheric parameters (temperature profiles, water vapor, and liquid water) are analyzed. Data of Russian microwave temperature profilers MTP-5 are used in the study of the urban heat island vertical structure, for improvement of the forecast of adverse meteorological phenomena, and monitoring of thermal stratification of the atmospheric boundary layer in polar regions and during solar eclipses. Some results of cloud parameters monitoring with the use of multi-channel microwave radiometric complex “Microradcom” are presented.