

Дистанционное аэрологическое зондирование - новые перспективы микроволновой радиометрии

Е.Н.Кадыгров¹, Е.В. Ганьшин¹, И.Н.Кузнецова², Н.Е.Брусова²,

¹ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория», 141700, Московская область, г. Долгопрудный, ул. Первомайская 3, e-mail: ldz@cao-rhms.ru

²ФГБУ «Гидрометеорологический центр России», 123242, Москва, Большой Предтеченский переулок, д.11-13, e-mail: muza@metcom.ru

Дан анализ возможностей использования данных современных наземных микроволновых радиометрических комплексов для задач дистанционного аэрологического зондирования.

The analysis of possibilities of modern foreign and domestic ground-based microwave radiometric system for using in remote sensing aerology are presented.

Введение

Одной из основных наук изучения атмосферы является аэрология. Главные задачи современной аэрологии заключаются в создании методов исследования свободной атмосферы, а также в разработке новых, более точных приборов для измерения различных параметров атмосферы, в первую очередь структурных (или термодинамических): профилей температуры, водяного пара, скорости и направления ветра [1]. Главным методом аэрологических исследований является зондирование, т.е. измерение различных метеорологических величин либо с помощью поднимаемых в атмосферу приборов (радиозондирование, самолетное, аэростатное, ракетное зондирования), либо дистанционно (спутниковое, радиолокационное, лидарное, акустическое, радиометрическое зондирования). Традиционно основным методом аэрологического зондирования являлось радиозондирование - выпуски радиозондов, осуществляемые сетью аэрологических станций. До 1991 г. на территории бывшего СССР большая часть станций (а всего их было более 200) проводила 4-х разовое радиозондирование в сроки 00, 06, 12 и 18 GMT (гринвичское время). Согласно правилам Всемирной метеорологической организации, обязательными являются сроки наблюдения 00 и 12 GMT. Поэтому в последние годы на сети Росгидромета (а всего в РФ осталось 113 оперативно работающих аэрологических станций) ежегодным планом радиозондирования из экономических соображений предусматривается лишь 2-х разовое зондирование, а некоторые станции проводят выпуски радиозонда всего один раз в сутки. Это положение серьезно затрудняет работу не только отечественной синоптической службы, но и практически всех мировых центров. Особенно это касается данных о характеристиках одной из самых изменчивых частей атмосферы - нижней тропосферы, и в первую очередь атмосферного пограничного слоя атмосферы (АПС), высота которого меняется от 100 м в полярных широтах до 1600м в средних широтах. Двухразового зондирования совершенно недостаточно для контроля характеристик этого слоя, в котором практически сосредоточена вся жизнь на Земле. Поэтому мировой тенденцией в последние годы, поддерживаемой Всемирной метеорологической организацией в рамках создания Всемирной наблюдательной сети, является использование на аэрологических станциях в дополнение к радиозондированию современных дистанционных приборов для непрерывного измерения профилей температуры, влагозапаса и ветра в тропосфере и в АПС [1]. Главными достоинствами дистанционных приборов являются возможность непрерывных измерений и низкая эксплуатационная стоимость - приборы могут работать непрерывно в автоматическом режиме многие годы, в отличие от

одноразового прибора - радиозонда. Данная работа посвящена анализу современного состояния и возможностей наземного микроволнового радиометрического зондирования термодинамических параметров тропосферы как одного из перспективных направлений аэрологического дистанционного зондирования.

Наземные микроволновые радиометрические комплексы

Исторически так сложилось, что практическое применение микроволновая радиометрия как метод дистанционного аэрологического зондирования структурных параметров атмосферы получила в 60-70-е года прошлого века, когда появились спутниковые метеорологические приборы [2-6]. Первым спутниковым микроволновым зондировщиком профилей температуры тропосферы и общего содержания водяного пара был прибор NEMS, установленный на спутнике США Nimbus-5 в 1972 г., а его модернизированная версия SCAMS работала на спутнике Nimbus-6 1975 г. [3]. Специализированными спутниковыми микроволновыми зондировщиками, предназначенными только для измерения профилей температуры, были прибор MSU, запущенный на спутнике NOAA-6 в 1979 г., и почти одновременно запущенный на военном метеорологическом спутнике DMSP прибор SSM/T [3]. Все это были надирные приборы, имеющие не высокое вертикальное разрешение (7-8 км). Повысить его удалось с помощью микроволнового прибора с лимбовой геометрией измерений, но и существенно более дорогого-прибора MLS, разработанного для исследовательского спутника UARS [4]. Дальнейшим развитием спутниковых микроволновых приборов аналогичного назначения были разработанные в США многоканальные спектрорадиометры AMSU, и прибор МТВЗА-ГЯ (РФ), обеспечивающие измерение профилей температуры и водяного пара тропосферы и стратосферы [4,5]. Безусловным плюсом спутниковых приборов является глобальность измерений, а основными недостатками являются плохое вертикальное разрешение и очень высокие погрешности измерений в нижней тропосфере (от поверхности Земли до высот 2-3 км). Вслед за развитием спутниковых микроволновых приборов в 60-80 г.г. 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 [6-11]. Радиометрический метод первоначально был развит при радиоастрономических исследованиях температурного режима планет, когда проводился предварительный анализ мешающего влияния теплового радиоизлучения атмосферы и осуществлялась разработка чувствительных СВЧ радиометров [7]. Однако это были штучные приборы, в основном используемые в исследовательских лабораториях [6-11]. И только в конце XXI века 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 двухканальные радиометры MP-1500 компании «Radiometrics», США, обеспечивающие измерение общего содержания водяного пара и жидкой воды в атмосфере (с частотами 22 ГГц и 30 ГГц) [6, 11,12]. В основном их появление было связано с необходимостью валидации спутниковых приборов и создаваемой на основе использования приемников навигационной системы GPS системы мониторинга общего содержания водяного пара [11]. Позднее эти приборы были модернизированы, и появились многоканальные радиометры MP-3000, состоящие фактически из двух блоков - первый с частотами в диапазоне 22-30 ГГц - для измерения профилей водяного пара и жидкой воды, и второй с частотами в диапазоне 51-59 ГГц - для измерения профилей температуры тропосферы [11]. В начале XXI века появились

приборы RPG-HATPRO компании Radiometer-Physics, Германия, внешне и по характеристикам близкие к МР-3000 [6,11, 13]. В России отечественные серийные микроволновые приборы для измерения профилей температуры атмосферы (МТП-5) появились в начале 90-х годов. Первый экспериментальный образец МТП-5, разработанный в ЦАО, прошел успешные испытания и сравнения с данными радиозондов и привязных аэростатов в 1989 году [12]. Он представлял собой одноканальный сканирующий по углу места от горизонта до зенита микроволновый радиометр с длиной волны 5 мм (частота 60 ГГц) и чувствительностью 0.05 К при постоянной времени интегрирования 1 с и обеспечивал измерение профилей температуры атмосферы от поверхности Земли до высоты 600 м [12]. Главными его достоинствами является полностью автоматический режим работы (включая автоматическую калибровку), всепогодность, практически непрерывный режим выдачи измерительной информации, малые габариты и энергопотребление. Тиражирование этого прибора частными компаниями обеспечило его широкое внедрение как в нашей стране, так и во многих зарубежных странах. Модификациями прибора стали модели МТР-5Н с высотой зондирования до 1 км и полярная версия МТР-РЕ. На первом этапе в этих приборах использовались СВЧ радиометры, построенные по супергетеродинной схеме, позднее-по схеме модуляционных радиометра прямого усиления (Рис.1) [12].

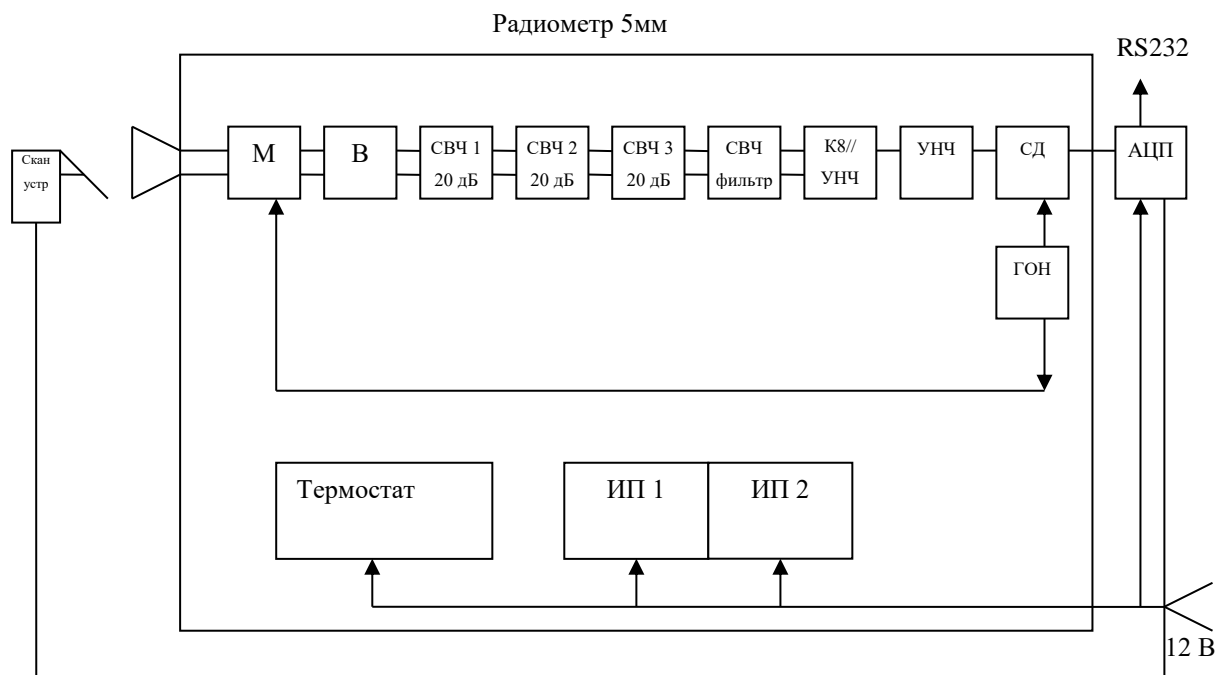


Рис.1. Блок-схема СВЧ радиометра профилера МТР-5
 (М - модулятор, В - вентиль, СВЧ - входной трехкаскадный усилитель, УНЧ - усилитель низкой частоты, СД - синхронный детектор, ГОН - генератор опорного напряжения, АЦП - аналого-цифровой преобразователь, ИП - источник питания)

Физические основы радиометрических измерений профилей температуры атмосферы достаточно глубоко разработаны к настоящему времени и подробно изложены в [2,8,10-12,14-15]. Существуют три основных геометрии наземных измерений профилей температуры атмосферы: угломестный, многочастотный и комбинированный [10]. В профилерах МТР-5 используется угломестный метод, когда луч антенны сканирует от горизонта до зенита и по измеренной зависимости радиоярких температур на разных углах места восстанавливается профиль термодинамической температуры в диапазоне высот 0-1000 м (Рис.2). Поскольку

частота выбрана вблизи максимума поглощения молекулярного кислорода (60 ГГц в версии 600 м и 56.6 в версии 1000 м) порядка 14 дБ/км, то при условии горизонтальной однородности атмосферы вблизи установки прибора измеренная в горизонт радиояркая температура почти совпадает с термодинамической. Это дает возможность автоматической калибровки прибора по собственному излучению атмосферы, что наряду с более высоким разрешением является важным достоинством данного метода [12]. Естественно, нельзя объять необъятное - недостатком является ограничение высоты (до 1 км). В настоящее время более 100 профиломеров МТР-5 используется для измерения профилей температуры атмосферного пограничного слоя (АПС) в разных странах мира, из них 22 прибора - на наблюдательной сети Росгидромета [12].

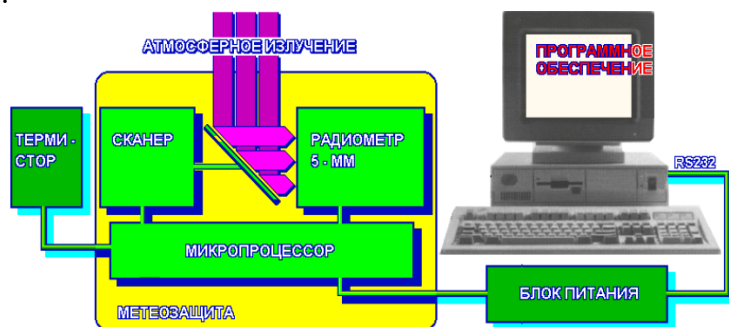


Рис.2. Блок схема угломестных измерений профиломером МТР-5

В многочастотном методе используется измерение в зенит на нескольких частотных каналах, и по измеренным радиоярким температурам восстанавливается профиль термодинамической температуры (каналы вблизи 60 ГГц), профили водяного пара (каналы вблизи 22.235 ГГц и содержание жидкой воды в атмосфере (окно прозрачности 35 ГГц)). Выбор частот понятен из Рис.3 - для определения профилей температуры используется собственное излучение молекулярного кислорода, для концентрации водяного пара - собственное резонансное излучение водяного пара, и для определения концентрации жидкой влаги - ее нерезонансное излучение в окне прозрачности [8,11].

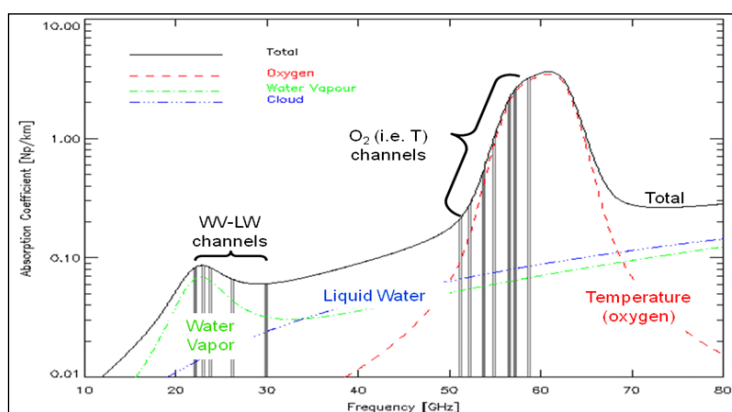


Рис.3. Поглощение радиоволн в водяном паре, молекулярном кислороде, водяном паре и в жидкой воде [11]

Многоканальный режим используется в приборах МР-1500, МЗ-3000, RPG-НАТПРО, а также в российском многоканальном СВЧ комплексе Микрорадком [2,11,16]. Дистанционный микроволновый измеритель Микрорадком разработан в Лаборатории дистанционного зондирования Центральной аэрологической

обсерватории в 2012 г. [16]. В настоящее время на территории ЦАО в непосредственной близости к аэрологической станции Долгопрудный в непрерывной работе имеются два таких комплекса - опытный образец и первый серийный образец. Проводятся с 2013 г. сравнения с данными ночных и дневных выпусков радиозондов. Комплекс Микрорадком имеет 9 измерительных каналов: 6 каналов вблизи частоты 60 ГГц для измерения профилей температуры в диапазоне высот 0-4 км (а при безоблачной атмосфере - и до 10 км), один канал для измерения общего содержания водяного пара на частоте 22.224 ГГц, один канал 36 ГГц для измерения жидкой воды и канал с угломестным режимом измерений на частоте 56.6 ГГц для измерения профилей температуры АПС (0-1000 м) [16]. Наиболее сложным является шестиканальный СВЧ радиометр с частотными каналами в диапазоне частот 53-57 ГГц, чувствительность каждого из каналов которого не хуже 0.1 К при постоянной времени интегрирования 1 с. В состав комплекса входит также автоматическая метеостанция для измерения приземных данных (температура, влажность, давление, ветер) и видеочасть наблюдения за облачностью [16]. При восстановлении профилей температуры тропосферы используются значения радиоярких температур, полученные на каждом из шести измерительных частотных каналов, а также измеренные значения общего содержания водяного пара и информация о водозапасе облаков и интенсивности жидких осадков [12,16]. Темп выдачи данных о профилях температуры тропосферы не более 600 с, шаг по высоте 1 км и погрешность восстановления профилей температуры 0,5°С – 1,5,0°С. Восстановление профилей температуры производится методом статистической регуляризации с использованием матрицы аэрологических данных [12,16,17]. Общий вид многоканального радиометрического комплекса Микрорадком представлен на Рис.4.



Рис. 4. Измерительный СВЧ комплекс «Микрорадком» в сборе

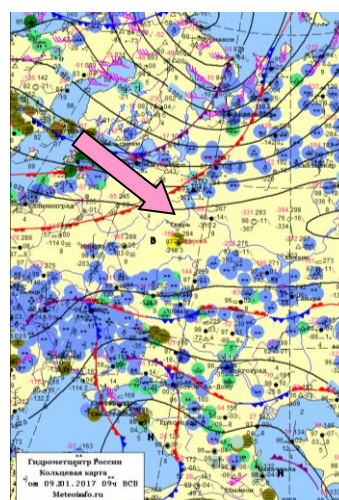
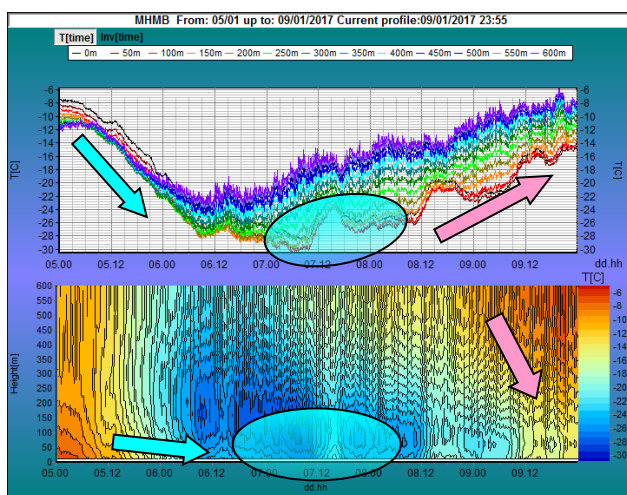
Примеры использования данных дистанционного радиометрического зондирования

В период 2000-2016 годов с помощью отечественных микроволновых профиломеров МТР-5 и «Микрорадком» получены новые научные результаты в области исследований физических процессов в нижней тропосфере, в той или иной степени находящейся под антропогенным воздействием, а также в резко различающихся физико-географических условиях с широким спектром типов подстилающей

поверхности [16,17]. В частности, впервые исследована вертикальная структура городского острова тепла (ГОТ) над Москвой и Санкт-Петербургом, его динамика. Проведены оригинальные наблюдения за динамикой термической стратификации АПС во время полных солнечных затмений; проведен мониторинг термической структуры АПС в аридном регионе в жаркий период. Для задач анализа взаимодействия океана и атмосферы экспериментально получены данные о профилях температуры АПС над морской поверхностью, проведен мониторинг термической структуры АПС в районе Северного (дрейфующие станции СП-39 и СП-40) и Южного (антарктическая станция Конкордия) полюсов Земли. Также получены данные о характеристиках различного вида облаков в различных метеорологических ситуациях, предложены новые подходы для сверхкраткосрочного прогнозирования обледенения самолетов в районе аэропортов и для прогноза возникновения опасных метеорологических явлений, в т.ч. для прогноза возникновения и диссипации туманов [12].

На основе теоретических положений и многолетнего опыта применения данных измерений МТР-5 для анализа и детализации процессов в атмосферном пограничном слое (АПС) подготовлено и опубликовано пособие для практического использования данных профилемеров, в первую очередь, в сетевых подразделениях Росгидромета, оснащенных приборами МТР-5 [12]. Дистанционные приборы находят все большее применение в практике аэрологического зондирования; сегодня в нашей стране для проведения научных исследований и практического использования в синоптической и экологической практике мониторинга и прогнозирования используются 22 микроволновых температурных профилемера МТР-5 [12,17].

Приведем несколько примеров интерпретации данных измерений МТР-5. Представленные на рис. 5 данные иллюстрируют экстремальный эпизод короткопериодных колебаний крупномасштабных атмосферных процессов: от резкого похолодания (на рис. 5а) и установления 30-ти градусных морозов в Московском регионе (синий овал) до мощного потепления вследствие адвекции атлантической воздушной массы и опережающего ее теплого атмосферного фронта (на синоптической карте рис. 5.б - красная линия). Этот же эпизод примечателен тем, что по наблюдениям (<http://www.mosecom.ru/air/>) 9 января 2017 г. зафиксирован резкий всплеск уровня загрязнения приземного воздуха в Москве (рис. 5 в, г.) И только разнесенные данные МТР-5 позволяют установить в деталях метеорологические факторы, способствовавшие ухудшению экологической обстановки в регионе. Повышение уровня загрязнения происходило на фоне кратковременного затишья и при усилении мощности температурной инверсии смешанного типа (инверсии оседания и радиационной). Отметим, что при максимальном развитии температурной инверсии ее величина достигала 12-14°C.



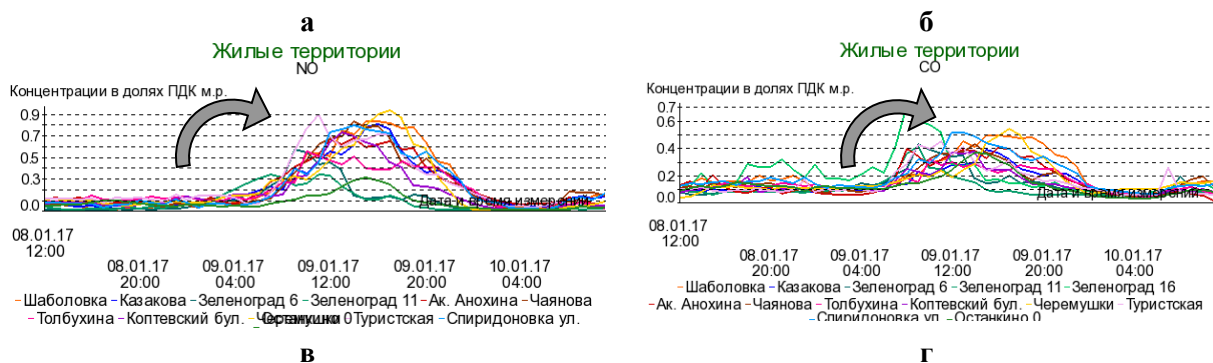


Рис. 5. а) изменения температуры в нижнем 600-метровом слое через каждые 50 м 5 - 9 января, б) синоптическая ситуация 9 ч. ВСВ 9 января, в) и г) временная серия концентрации NO и CO 8-9 января по наблюдениям на станциях ГПБУ «Мосэкомониторинг» (<http://www.mosecom.ru/air/>). 2017 г.

Надо особо отметить, что текущие данные МТР-5 позволяют с малой заблаговременностью оценивать тенденции локальных и даже крупномасштабных атмосферных процессов, что невозможно сделать по данным 2-х срочных радиозондовых измерений. К числу их главных недостатков относятся также частые «пропуски» низких температурных инверсий, вследствие чего переоценивается опасность метеорологических условий загрязнения. Одной из многих иллюстраций этого факта могут быть атмосферные процессы 5-6 февраля 2017 г. и их визуализация (рис. 6). Синоптическая карта показывает (рис. 6 а), что Москва находилась на южной периферии смещающегося на континент арктического антициклона (его центр на карте обозначен как «В»). Днем при ясном небе в такой ситуации формируется термическая неустойчивость; ее, как обычно, с высокой точностью фиксируют и радиозонды (рис.6 б), и, тем более, профилемеры МТР-5 (рис. 6в, розовая стрелка на рис. 6г).

В ночное время в ясную погоду происходит сильное выхолаживание подстилающей поверхности и образование инверсии температуры. Именно стандартную картину – радиационную приземную инверсию в Долгопрудном - отражают данные измерений радиозонда (рис. 6 д, розовый контур). При этом в рядом расположенном пункте установки прибора МТР-5 в часы синхронных измерений профиль температуры имел вид приподнятой инверсии температуры (рис. 6 г, е, залитый розовый овал).

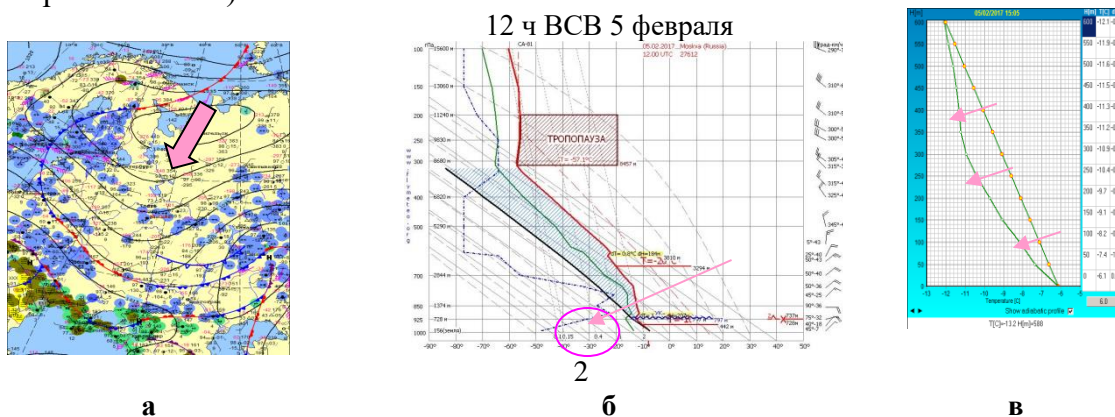




Рис. 6. Синоптическая ситуация 5-6 февраля 2017 г. (а), данные измерений радиозонда (б, д), изменения температуры в нижнем 1000-метровом слое (г) и профили МТР-5 в 15ч мск 5.02 (в) и 3ч 6.02 (е) в г. Долгопрудный

Отличия в типах вертикального профиля температуры двумя средствами измерений указывает на проблемы точного фиксирования сложных профилей температуры радиозондами, успешность их восстановления приборами МТР-5, что создает надежную информационную основу для изучения процессов в АПС, в т.ч. с позиций экологии.

Использование высокочувствительных каналов комплекса «Микрорадком» позволило получить характеристики обводненного аэрозоля при наличии тумана и дымки, исследовать фазовые переходы воды в облаках, также начать создание атласа радиационных характеристик различных типов облаков. Непрерывные измерения двумя комплексами Микрорадком производятся с 2013 года. Данные периодически сравниваются с данными радиозондов аэрологической станции Долгопрудный, выпуски которых производятся в 100 метрах от места установки дистанционных комплексов. На рис.7 приведен пример сравнений данных об интегральном содержании водяного пара в столбе атмосферы, измеренных комплексом «Микрорадком» и радиозондом. Следует отметить, что если дистанционные измерения точно соответствуют месту установки измерительного комплекса, то данные радиозонда - это интеграл от данных датчика влажности радиозонда за все время полета, конечная точка которого часто значительно удалена от места выпуска [16].

На рис. 8 представлены результаты измерений водности облаков ($г/см^2$), полученные каналом 35 ГГц комплекса Микрорадком. К сожалению, пока эти данные сравнивать не с чем-на радиозондах отсутствует датчик водности. Планируется провести сравнения с данными самолета-метеолaborатории ЯК-42 Д, оснащенного в том числе и датчиками водности [16].

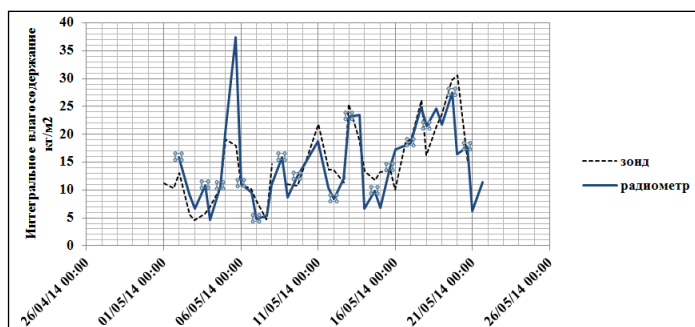


Рис. 7. Сравнение данных об интегральном влагосодержании атмосферы, полученных с помощью радиозонда с результатами радиометрического комплекса Микрорадком (26.04.2014-26.05.2014 г)

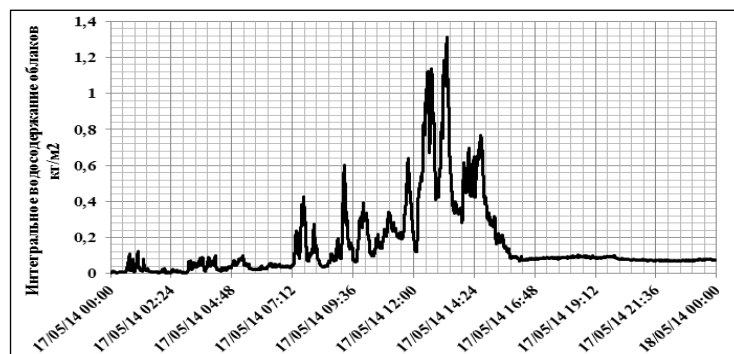


Рис. 8. Изменение интегрального водосодержания (водозапаса) облаков за 24 часа 17.05.2014 года (данные комплекса «Микрорадком»)

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 радиометрического зондирования как средства контроля самой изменчивой части атмосферы – атмосферного пограничного слоя. Данные МТР-5 прежде всего дают возможность проводить детализированный анализ процессов в предшествующее время, уточнять не выявленные традиционными способами явления и определить их природу, позволяют обнаруживать явления, обусловленные влиянием загрязнений на термические процессы в нижних слоях атмосферы. В настоящее время 22 микроволновых температурных профилера МТР-5 работают на наблюдательной сети Росгидромета, что делает актуальной задачу присвоения дистанционным аэрологическим измерениям статуса сетевых измерений. Что касается многоканального комплекса «Микрорадком», то он кроме мониторинга термической стратификации тропосферы позволяет проводить исследования фазовых переходов влаги в облаках, дает надежду на создание нового атласа облаков с грациями их радиационных характеристик.

Литература

1. Зайцева Н.А. Аэрология. Ленинград, Гидрометеиздат, 1990, с. 325.
2. Кутуза Б.Г., М.В.Данилычев, О.И.Яковлев. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. Москва, Изд. ЛЕНАНД, 2015, с.333.
3. Кадыгров Е.Н., Кокин Г.А., Потапов А.А. Приборы миллиметрового диапазона волн для исследования озонового слоя Земли.// Зарубежная радиоэлектроника, N10, 1989 г., с. 52-66.
4. Власов А.А., Кадыгров Е.Н., Потапов А.А. Лимбовая радиоспектрометрия атмосферы на миллиметровых волнах.// Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. №3, 1997, с. 56-65.
5. Тимофеев Ю.М. Глобальная система мониторинга параметров атмосферы.2010, Санкт-Петербургский государственный университет, Физический факультет, с.129.
6. Караваев Д.М., Г.Г. Шукин. Современное состояние и перспективы применения микроволновой радиометрии атмосферы// Оптика атмосферы и океана, 2015, т. 28, № 12, с. 1122-1127.

7. Кутуза Б.Г. Исследование флуктуаций полной массы водяного пара в атмосфере радиоастрономическим методом//Изв. АН СССР, ФАО, 1974, Т.10, № 11, с. 2278.
8. Степаненко В.В., Щукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1987, 283 с.
9. Горелик А.Г., Фролов Ю.А., Щукин Г.Г. Радиотепловые измерения влажности атмосферы и интегральной водности облаков// Известия АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1973, № 5, С. 928-936.
10. Троицкий А.В. Дистанционное определение температуры атмосферы из спектральных радиометрических измерений в линии λ 5 мм // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1986. Т. 29. № 8. С. 878-887..
11. Westwater E.R., Crewel S., C.Matzler. A review of surface-based microwave and millimeter-wave radiometric remote sensing of the troposphere// Radio Science Bulletin, September, 2004, N 310, P. 59-80.
12. Кадыгров Е.Н., И.Н. Кузнецова. Методические рекомендации по использованию данных дистанционных измерений профилей температуры в атмосферном пограничном слое микроволновыми профилемерами: теория и практика. Долгопрудный, Изд. «Физматкнига», 2015, с. 171.
13. 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, № 5, с. 392-398.
14. 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.// Meteorological Applications, 1998, V.5, Issue 4, P. 393-404.
15. 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.// Journal of Atmosp., and Ocean. Techn., 1999, V. 16, July , P. 805-818.9. 9.
16. Кадыгров Е.Н., А.Г. Горелик, Е.А. Миллер, В.В. Некрасов, А.В. Троицкий, Т.А. Точилкина, А.Н.Шапошников. Результаты мониторинга термодинамического состояния тропосферы многоканальным микроволновым радиометрическим комплексом //Оптика атмосферы и океана, 2013, т. 26, № 6, с. 459-465.
17. 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, том 385, № 4, с. 541-548.