

УДК 551.501.8

## Результаты мониторинга термодинамического состояния тропосферы многоканальным микроволновым радиометрическим комплексом

Е.Н. Кадыгров, А.Г. Горелик, Е.А. Миллер, В.В. Некрасов,  
А.В. Троицкий, Т.А. Точилкина, А.Н. Шапошников\*

ГУ «Центральная аэрологическая обсерватория»  
141700, г. Долгопрудный Московской обл., ул. Первомайская, 3

Поступила в редакцию 17.01.2013 г.

Представлены результаты исследований динамики термодинамического состояния тропосферы, полученные в 2012 г. с помощью микроволнового многоканального измерительного комплекса «Микрорадком». В состав комплекса входят 4 СВЧ-радиометра с частотами 53–58 (многоканальный), 56,6 (сканирующий), 22,235 и 37 ГГц, радиолокационный измеритель интенсивности жидких осадков и видеосистема наблюдения за облачностью. Комплекс обеспечивает измерение профилей температуры атмосферы в диапазоне высот 0–10 км с детализацией в пограничном слое (0–1,5 км), общего содержания водяного пара в столбе атмосферы и водозапаса облаков. Измерения проводились в г. Долгопрудный Московской области в период с 1 марта по 31 декабря 2012 г. Приведены примеры наиболее интересных с точки зрения физики облаков результатов измерений, а также данные сравнений результатов дистанционных измерений профилей температуры и влагозапаса атмосферы с данными радиозондирования.

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

### Введение

Обеспечение непрерывного контроля за термическим режимом атмосферы и концентрацией одного из газов, определяющих основные процессы в атмосфере, — водяного пара, является важной проблемой в системе геофизического мониторинга. В частности, большинство протекающих процессов в атмосфере зависят от температуры, поэтому без информации о температуре на разных высотах невозможна их диагностика. Без учета вариаций водяного пара и данных о водозапасе облаков, в свою очередь, невозможен контроль за протекающими в атмосфере термодинамическими процессами.

В настоящее время в Российской Федерации отсутствует система мониторинга этих параметров, производятся только дискретные выпуски радиозондов, по данным которых строятся различные статистические модели [1]. В связи с этим в Центральной аэрологической обсерватории Росгидромета в 2008–

2012 гг. был разработан и изготовлен опытный образец наземного измерительного комплекса, основанный на использовании современных СВЧ-радиометров, работающих в диапазоне частот 20–57 ГГц (патентованное название «Микрорадком») [2, 3]. Комплекс обеспечивает практически непрерывные измерения профилей температуры атмосферы, а также интегрального содержания водяного пара в столбе атмосферы единичной площади (далее будем называть, как принято в радиометрии, влагозапас атмосферы  $R$ ) и интегрального содержания жидкокапельной воды в столбе атмосферы единичной площади (далее водозапас облаков  $W$ ) [4–7]. Единицами измерения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков обычно берутся  $\text{кг}/\text{м}^2$  или  $\text{г}/\text{см}^2$ .

В отличие от систем контактных измерений (радиозонды, метеоракеты) СВЧ-радиометры обеспечивают непрерывность измерений, работают в автоматическом режиме и не требуют расходных материалов (что обуславливает их низкую операционную стоимость). В отличие от активных (излучающих) приборов (локаторов, лидаров, содаров) они сами ничего не излучают, а основаны на измерении собственного теплового излучения атмосферы, что облегчает их использование на урбанизированных территориях [4–12]. Одновременные измерения профилей температуры, влагозапаса и водозапаса атмосферы

\* Евгений Николаевич Кадыгров (enkadygrov@gmail.com); Андрей Габриэлович Горелик; Евгений Алланович Миллер (tissary@rambler.ru); Владимир Васильевич Некрасов; Аркадий Всеволодович Троицкий (troitskyav@nirfi.sci-nnov.ru); Татьяна Алексеевна Точилкина; Александр Николаевич Шапошников (src\_attex@mtu-net.ru).

позволяют также получить дополнительную информацию о внутренней структуре конвективных облаков, что является полезным при решении многих задач в технике связи, радиолокации, авиационной метеорологии. Эти же данные необходимы при разработке теории образования ливневых осадков, града, совершенствовании методов активных воздействий на конвективные облака и контроля за их результатами, в исследованиях обводненного аэрозоля [4, 7, 12].

В настоящей статье дано краткое описание нового измерительного комплекса, приводятся результаты сравнения измеренных профилей температуры, интегрального содержания водяного пара с данными радиозондирования. Приводятся примеры наиболее интересных результатов измерений, характеризующие фазовые переходы воды в облаках.

### Физические основы измерений параметров атмосферы методом микроволновой радиометрии

Использование дистанционных радиофизических методов зондирования земной атмосферы по ее собственному (тепловому) излучению основано на решении интегрального уравнения переноса энергии радиоизлучения в поглощающей среде с конкретной геометрией и на знании условий взаимодействия микроволнового излучения с атмосферой [4]. Известно, что поле излучения характеризуется рядом величин, основной из которых является интенсивность излучения. Для атмосферы, находящейся в состоянии термодинамического равновесия (до высот  $h < 90$  км), в радиодиапазоне, где  $h\nu \ll kT$  и справедливо приближение Рэлея–Джинса для функции Планка, уравнение переноса излучения имеет вид [4]:

$$\frac{dI_\nu}{dl} = -\gamma_\nu I_\nu + \frac{2k\nu^2}{c^2} \gamma_\nu T, \quad (1)$$

где  $I_\nu$  – интенсивность излучения;  $\gamma_\nu$  – коэффициент поглощения;  $\nu$  – частота;  $dl$  – элемент пути. Интегрирование (1) по траектории распространения волны при граничных условиях  $I_\nu(0) = 0$  и  $I_\nu(\infty) = I_\nu$  дает выражение для спектральной интенсивности нисходящего радиоизлучения атмосферы при наблюдении с поверхности Земли в данном направлении [4, 6–8]:

$$I_\nu = \frac{2k\nu^2}{c^2} \int_0^\infty T(l) \gamma_\nu(l) \exp\left(-\int_0^l \gamma_\nu(l') dl'\right) dl + I_\Phi \exp\left(-\int_0^\infty \gamma_\nu(l) dl\right). \quad (2)$$

В качестве исходной величины для получения физической информации в радиодиапазоне обычно используется радиояркая температура исследуемого тела (атмосферы)  $T_\nu$ , под которой понимается температура гипотетического абсолютно черного тела, излучающего в данном направлении излучение

интенсивностью  $I_\nu$ , равное излучению исследуемого тела (атмосферы), т.е.

$$T_\nu = \frac{c^2 I_\nu}{2k\nu^2}. \quad (3)$$

Для плоскослоистой модели атмосферы  $dl = dh/\cos\theta$  выражение (2) в терминах яркостной температуры принимает вид [4, 6]:

$$T_\nu = \frac{1}{\cos\theta} \int_0^\infty T(h) \gamma_\nu(h) \exp\left(-\frac{1}{\cos\theta} \int_0^h \gamma_\nu(h') dh'\right) dh + T_\Phi \exp\left(-\frac{\tau_0}{\cos\theta}\right), \quad (4)$$

где  $\tau_0 = \int_0^\infty \gamma_\nu(h) dh$  – полное вертикальное поглощение

в атмосфере;  $\theta$  – зенитный угол;  $T_\Phi$  – температура реликтового излучения космоса. В окнах прозрачности атмосферы плоскослоистое приближение выполняется для интервала углов  $\theta = 0 \div 85^\circ$  [6], а в областях резонансов поглощения атмосферных газов справедливо во всем диапазоне зенитных углов [10]. Для практических расчетов интегрирование (4) выполняется до высоты  $H$ , при которой значение интеграла (4) практически не отличается от его значения для случая бесконечного верхнего предела. При зондировании пограничного слоя атмосферы  $H = 3$  км в общем случае  $H \approx 30$  км [6, 8, 10]. Вклад фонового члена  $T_\Phi \exp(-\tau_0/\cos\theta)$  в (4) в резонансных областях поглощения из-за большого  $\tau_0$  пренебрежимо мал и может не учитываться [4].

Возможность определения метеопараметров атмосферы дистанционным радиометрическими методами основана на спектральных особенностях собственного радиоизлучения атмосферы и на взаимной связи характеристик этого излучения (яркостной температуры  $T_\nu$  и поглощения  $\tau$ ) с исследуемыми метеопараметрами [4, 6, 8, 10, 11]. Поскольку отмеченные спектральные особенности связаны с поглощением водяного пара (линии  $\lambda = 1,35$  см и 1,64 мм) и молекулярного кислорода (линии  $\lambda = 5$  и 2,53 мм), то принимаемое собственное радиоизлучение атмосферы будет в существенной степени зависеть от концентрации упомянутых газов и их высотного распределения, а также от распределения температуры и давления по высоте. При наличии гидрообразований (облачности, дождя) радиоизлучение атмосферы в значительной мере зависит от фазового состава, количества воды, температуры этих образований [4, 7]. Это особенно важно в микроволновых окнах прозрачности  $\lambda = 8$  и 3 мм, где вклад газовых компонентов  $H_2O$  и  $O_2$  в общее излучение мал.

Перечисленные обстоятельства позволяют ставить и решать задачу по обращению измеренных характеристик атмосферы с целью определения ее основных метеопараметров: высотного профиля температуры по радиоизлучению в резонансных областях поглощения  $O_2$   $\lambda = 5$  мм [6, 8, 9, 10]; характеристик влагосодержания атмосферы по радиоизлучению

в резонансных областях поглощения  $\text{H}_2\text{O}$   $\lambda = 1,35$  см и  $1,64$  мм [7, 11, 12]; водозапаса облаков по радиолучению в микроволновых окнах прозрачности  $\lambda = 8$  мм [7, 11, 12].

Для реальной (облачной) атмосферы коэффициент поглощения  $\gamma_v(h)$  определяется вкладом водяного пара  $\text{H}_2\text{O}$ , молекулярного кислорода  $\text{O}_2$  и водяных капель облаков [4]:

$$\gamma_v(h) = \gamma_{\text{H}_2\text{O}}(h) + \gamma_{\text{O}_2}(h) + \gamma_W(h). \quad (5)$$

Для кристаллических облаков коэффициент поглощения при эквивалентной влажности на 2–3 порядка меньше коэффициента поглощения в капельных облаках, поэтому влиянием кристаллических облаков можно пренебречь [7].

Как видно из характера уравнения (1), яркостная температура несет интегральную по трассе зондирования информацию о состоянии атмосферы. Поэтому естественно в первую очередь решать задачу о нахождении интегральных метеопараметров, таких как суммарное влагосодержание в столбе атмосферы  $R$  и водозапас облаков  $W$  [7, 11, 12]. Эта задача сама по себе имеет важное практическое значение, так как штатными средствами метеослужбы эти параметры не измеряются. Кроме того, значения  $R$  и  $W$  используются в задаче термического зондирования  $T(h)$  для «очистки» измерений в линии  $\text{O}_2$  от мешающего влияния водяного пара и капельной фазы облаков [2, 6]. Более подробно теоретические основы микроволнового радиометрического зондирования атмосферы изложены в [4–8, 10–12].

## Характеристики измерительного комплекса

Измерительный комплекс «Микрорадком» обеспечивает измерение:

- профилей температуры тропосферы в диапазоне высот 0–10 км с темпом выдачи данных не более 600 с, шагом по высоте 1 км и погрешностью восстановления профилей температуры 0,5–2,0 °С [4, 6];
- профилей температуры в диапазоне высот 0–1,6 км (режим «погранслоя») с темпом выдачи данных не более 600 с, шагом по высоте 25, 50 или 100 м и погрешностью восстановления профилей температуры атмосферы не более 1 °С [8–10];
- влагозапаса атмосферы с погрешностью 2 кг/м<sup>2</sup> [4, 6, 7];
- водозапаса облаков с погрешностью 0,05 кг/м<sup>2</sup> (в интервале 0–2 кг/м<sup>2</sup>) [4, 6, 7];
- интенсивности жидких осадков с относительной погрешностью 15% [2].

При этом каналы измерения профилей температуры тропосферы и влагозапаса атмосферы являются основными, а каналы измерения профилей температуры атмосферного пограничного слоя, водозапаса облаков и интенсивности жидких осадков – вспомогательными, позволяющими повысить информативность основных каналов, хотя их данные имеют и самостоятельный интерес, например при исследова-

нии радиационных процессов в атмосфере, исследованиях атмосферного аэрозоля и эмиссии различных газов в атмосферу [4–10].

Указанные выше измерения реализуются с помощью нескольких технических устройств: шестиканального СВЧ-радиометра с частотами в диапазоне 53–57 ГГц; сканирующего по углу места одноканального СВЧ-радиометра, измеряющего собственное тепловое излучение атмосферы на частоте 56,6 ГГц на 11 углах; СВЧ-радиометра с центральной частотой 22,235 ГГц (длина волны 1,35 см) для измерения влагозапаса атмосферы; СВЧ-радиометра с центральной частотой 37 ГГц (длина волны 0,8 см) для измерения водозапаса облаков [4, 6, 7]. Радиометры выполнены с использованием самых современных технологий техники миллиметрового СВЧ-диапазона – входных СВЧ-усилителей с центральными частотами до 60 ГГц, антенн с низким уровнем бокового излучения, вентиля и фильтров с улучшенными характеристиками, цифровыми схемами низкочастотной части. Построены радиометры по модуляционной схеме Дике, в основном по схеме приемника прямого усиления, что по сравнению с ранее используемыми приемниками супергетеродинного типа позволило существенно повысить их надежность и долговременную стабильность характеристик [3]. Чувствительность радиометров составляет 0,02–0,08 К при постоянном времени наблюдений 1 с, что существенно выше, чем у радиометров, используемых в предыдущих экспериментах [5, 6, 11, 12].

В качестве вспомогательного оборудования в состав измерительного комплекса входят: видеокамера наблюдения за облаками, доплеровский радиолокационный измеритель жидких осадков с частотой 10 ГГц; внешний измеритель приземной температуры; навигатор для определения точного местоположения комплекса и высоты установки над уровнем моря; микропроцессорное устройство для сбора и предварительной обработки измерительной информации; ПЭВМ для обработки данных [2, 3]. Функциональная схема измерительного комплекса «Микрорадком» приведена на рис. 1. Комплекс смонтирован на базе передвижного тонара (прицепа-фургона).

## Примеры полученных результатов

Измерения с помощью комплекса «Микрорадком» проводились с 01.03.2012 г. по 31.12.2012 г. на территории ФГБУ «ЦАО» (г. Долгопрудный Московской области, 55,56° с.ш., 37,30° в.д.), в непосредственной близости от аэрологической станции «Долгопрудный» (50 м), осуществляющей стандартные выпуски радиозондов дважды в сутки. Всего имеются в сформированном архиве данные 306 сут (7344 ч) непрерывных измерений. Проводились также непрерывные измерения приземных метеопараметров – температуры, давления, влажности, фиксировались тип облаков или их отсутствие.

Периодически проводились сравнения полученных дистанционных данных с данными радиозондов. Например, для радиозонда, выпущенного 07.09.2012 г. в 00:00 UTC, по формуле (4) были рассчитаны по

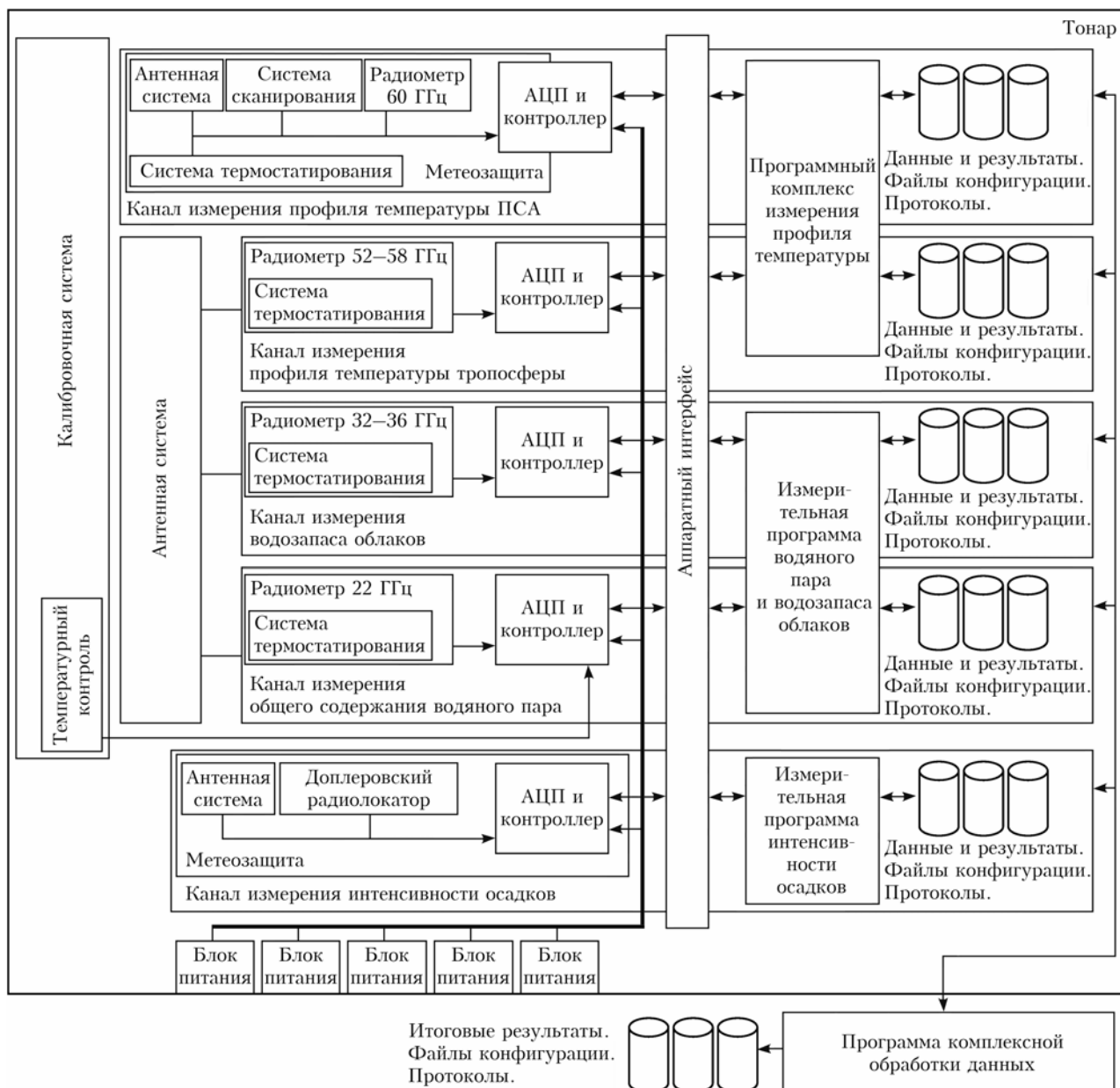


Рис. 1. Функциональная схема измерительного комплекса «Микрорадком»

прямой задаче радиояркостные температуры и проведено их сравнение с измеренными многоканальным радиометром радиояркостными температурами. Результаты приведены в табл. 1, а в табл. 2 даны результаты сравнения данных об интегральном влагозапасе, полученном с помощью радиозондов и комплексом «Микрорадком».

По измеренным радиояркостным температурам была также решена обратная задача и получен восстановленный профиль термодинамической температуры. На рис. 2 представлен результат сравнения восстановленного профиля с данными радиозонда (слева – восстановленный профиль в диапазоне высот 0–10 км по данным многоканального СВЧ-радиометра, справа – в диапазоне высот 0–2 км по данным канала «погранслои»).

Таблица 1

**Результаты сравнения расчетных значений радиояркостных температур по профилю термодинамической температуры радиозонда, выпущенного 07.09.2012 в 00:00 UTC, и соответствующих радиояркостных температур, измеренных спектральными каналами многоканального радиометра комплекса «Микрорадком»**

Частота, ГГц	56,6	55,7	55	54,4	53,8	53,2
Радиометр, К	282,6	279,7	276,8	269,7	247,1	243,3
Зонд, К	282,2	280,8	278,0	269,9	248,9	243,1
Разница, К	0,4	1,1	1,2	0,2	1,8	0,2

Необходимость наличия дополнительных каналов комплекса «Микрорадком» для восстановления профилей температуры тропосферы (измерение воды и влагозапаса атмосферы) хорошо видна из рис. 3

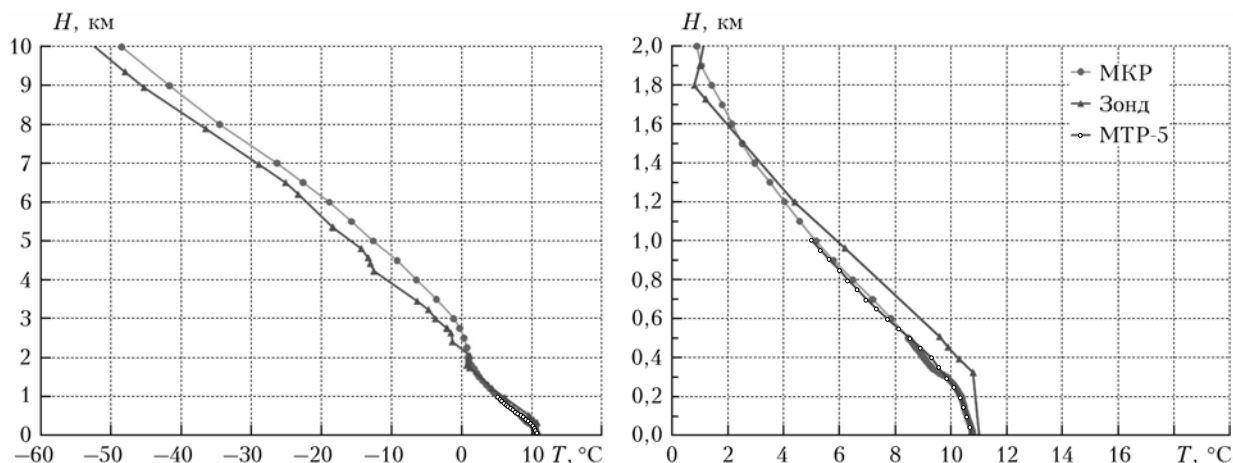


Рис. 2. Сравнение профилей температуры, полученных комплексом «Микрорадком», с данными радиозонда (07.09.2012, 00:00 UTC) (МКР – данные многоканального радиометра для измерения профилей температуры тропосферы; зонд – данные радиозонда станции «Долгопрудный»; МТР-5 – данные сканирующего радиометра для измерения профилей температуры атмосферного пограничного слоя)

Таблица 2

Сравнение данных об интегральном влагозапасе  $R$ , полученных с помощью радиозонда и комплекса «Микрорадком», а также данных об интегральном водозапасе  $W$ , одновременно полученных с помощью комплекса «Микрорадком»

Дата	$R$ , кг/м <sup>2</sup>		$W$ , кг/м <sup>2</sup>
	Зонд	«Микрорадком»	
01.03.2012	5,75	5,1	0,177
02.03.2012	5,78	4,7	0,115
03.03.2012	5,58	4,7	0,152
04.03.2012	5,98	5	0,135
05.03.2012	5,55	5	0,205
06.03.2012	6,34	5,2	0,228
07.03.2012	5,58	4,6	0,303
08.03.2012	4,29	3,4	0,285
09.03.2012	5,59	4,7	0,292
10.03.2012	4,83	4,2	0,218
11.03.2012	10,69	8,7	0,136
12.03.2012	9,5	7,9	0,096
13.03.2012	7,75	6,8	0,033
14.03.2012	6,7	6,5	0,045
15.03.2012	5,47	5,1	0,183
16.03.2012	5,04	4,6	0,290
17.03.2012	9,55	7,6	0,094
18.03.2012	8,58	8,4	0,059
19.03.2012	12,2	10	0,106
20.03.2012	12,1	10	0,103
21.03.2012	8,21	4,9	0,089

(цв. вклейка), на котором представлены реальные данные измерения излучения атмосферы в течение 24 ч 10 октября 2012 г., полученные с помощью многоканального СВЧ-радиометра (измерения проводились в зенит на частотах 6 спектральных каналов).

При этом, по данным независимых метеонаблюдений, над пунктом измерений 10.10.2012 г. с 00:00 до 09:50 наблюдалась незначительная разрывная облачность, а с 09:50 до 19:20 – сплошная облачность. Видно, что возникшие с появлением сплошной об-

лачности увеличения водо- и влагозапаса атмосферы не оказали практически никакого влияния на каналы с частотами 56,6 и 55,7 ГГц, которые используются для определения профилей температуры атмосферного пограничного слоя. В остальных каналах, соответствующих тропосферным высотам в диапазоне 1,5–10 км, появились существенные искажения сигнала, связанные с излучением водяного пара и жидкой воды в облаках. Для автоматического учета влияния облачности и были введены в состав комплекса «Микрорадком» каналы измерения водяного пара (22,235 ГГц) и водозапаса облаков (37 ГГц).

На рис. 4 и 5 (цв. вклейки) приведены примеры информации, полученные с помощью этих каналов и представляющие самостоятельный интерес для исследования процессов, происходящих в облаках.

Так, рис. 4 дает представление о характере радиометрического сигнала и измеренных значений влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков (16.08.2012 г.). В период с 00:00 до 04:00 (здесь и далее московское местное время) облаков нет, с 07:00 до 10:00 туманообразные и слоисто-разорванные облака, с 10:00 до 13:00 – слоисто-кучевые, с 16:00 до 20:00 – образование кучевых и слоисто-кучевых облаков, далее до 24:00 слоисто-кучевые облака.

Особенно можно отметить сутки 30.09.2012 г. (рис. 5). Утром легкие перистые облака сменяются редкими облаками среднего яруса. К 12:00 небо постепенно затягивается облаками (высококучевые), но еще сохраняется разная толщина облачности. Иногда появляются участки тонкой облачности, сквозь которую просвечивает солнце. В 16:00 – более плотная облачность, в 17:00 – очень мелкий снег. После 18:00 – облака высокослоистые или слоисто-дождевые, слоистые разорванные, ледяная крупа, слабый замерзающий дождь, ледяной дождь (см. рис. 5).

Более 300 сут непрерывных измерений комплексом «Микрорадком» позволяют начать создание банка данных о высотных распределениях температуры атмосферы и особенностях суточного хода температуры на разных высотах в диапазоне 0–10 км,

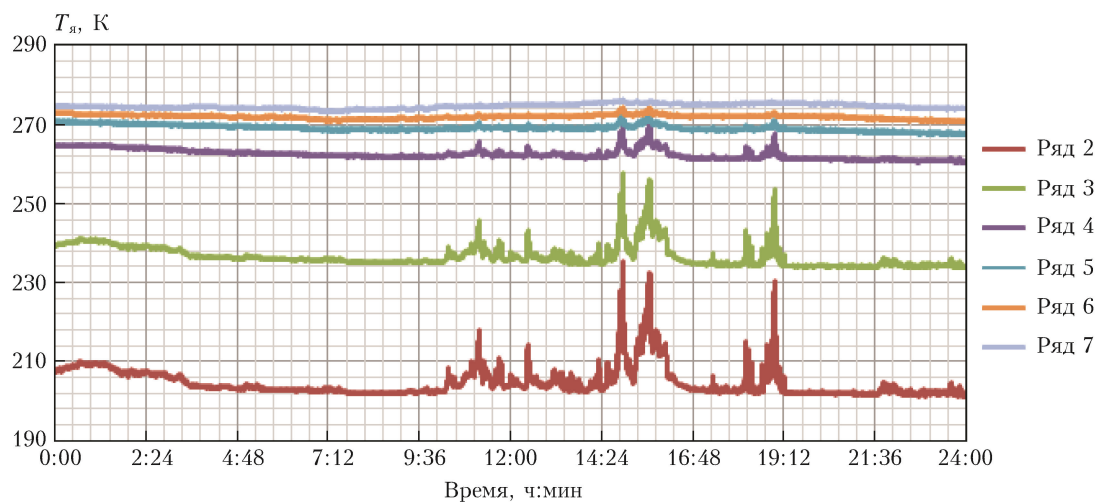


Рис. 3. Суточный ход данных спектральных каналов многоканального СВЧ-радиометра диапазона 60 ГГц измерительного комплекса «Микрорадком» при безоблачной и облачной атмосфере 10.10.2012 г. (снизу вверх: ряд 2 – 53,2; ряд 3 – 53,8; ряд 4 – 54,4; ряд 5 – 55,0; ряд 6 – 55,7; ряд 7 – 56,6 ГГц)

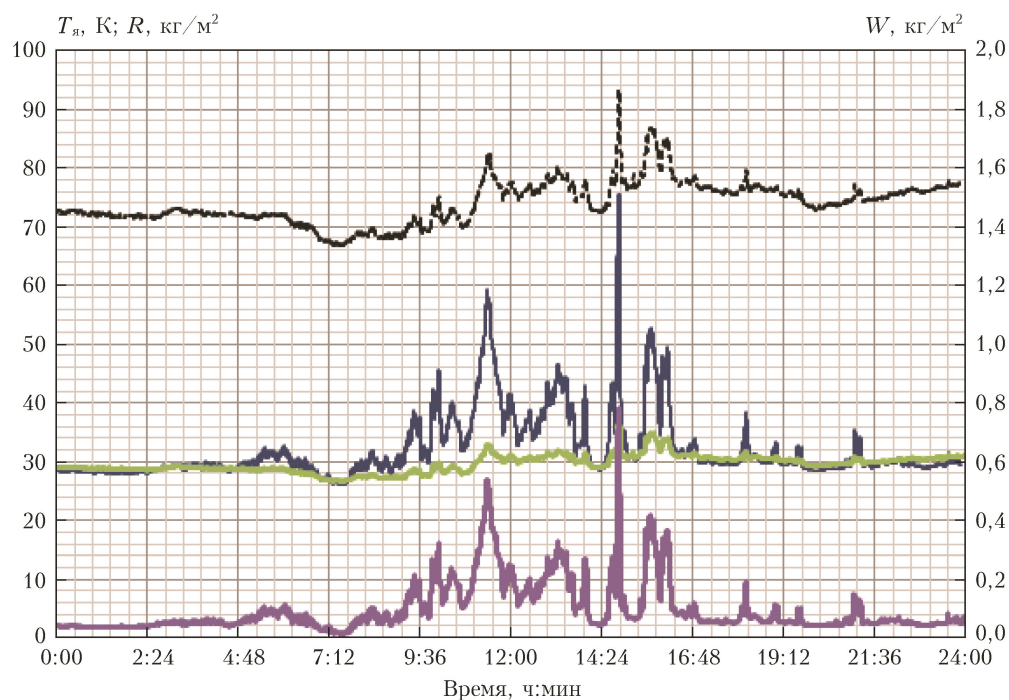


Рис. 4. Процесс перехода от ясного неба к слоисто-кучевым и кучевым облакам. Верхняя кривая – изменение радиояростной температуры  $T_{я}$  на канале 1,35 см, вторая сверху – на канале 0,8 см, третья сверху – интегральное влагосодержание  $R$ , нижняя кривая – водозапас  $W$

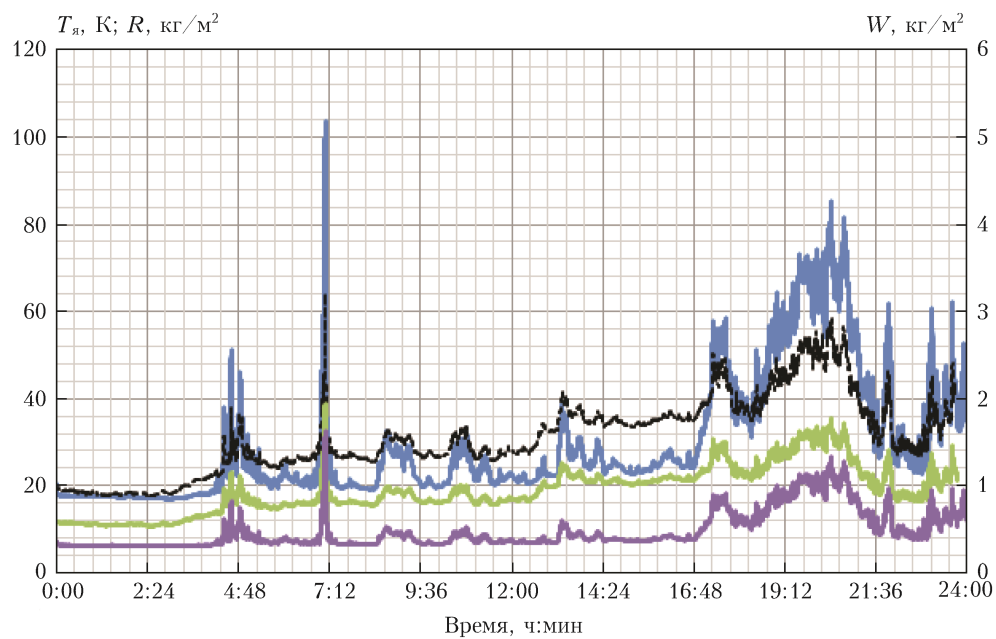


Рис. 5. Отображение прохождения фронта. Верхняя кривая – изменение радиояростной температуры  $T_{я}$  на канале 1,35 см, вторая сверху – на канале 0,8 см, третья сверху – интегральное влагосодержание  $R$ , нижняя кривая – водозапас  $W$

а также интегральных значений влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков в различные сезоны года.

Предварительный анализ полученных данных показал большое многообразие внутренней структуры и динамических процессов, которые происходят в различных облачных системах даже в одной и той же синоптической ситуации. Так, роль водяного пара в облаке во вкладе в излучение в одних ситуациях может существенно превышать роль жидкокапельной влаги, содержащейся в том же облаке. Причем вклад парообразной фракции может более чем в 5 раз превышать вклад жидкокапельной влаги.

Получена информация о большой изменчивости вклада жидкокапельной влаги в оптически тонких облаках, прохождение оптического излучения через которые представляет особый интерес для специалистов, занимающихся распространением лазерного излучения в атмосфере при наличии облачности. Зоны, в которых отмечается высокий уровень собственного излучения, чередуются в таких типах облаков с зонами, в которых уровень собственного излучения падает почти в 10 раз.

Детальное изучение этих процессов в сочетании с лидарной техникой окажется очень полезным для изучения внутреннего строения облаков, так как позволяет связать внутреннюю структуру облачности с ее излучательной способностью в микроволновом диапазоне и отражательными свойствами тех же облаков в оптическом и ИК-диапазонах. Это открывает возможность установить связи между тонкой структурой облачности, что в свою очередь позволяет детально исследовать процессы зарождения, развития и распада, например, облаков кучевых форм.

Особый интерес представляет совместное использование радиометра и лидара, так как позволяет оценить водность облаков и открывает широкие возможности для определения не только интегральных характеристик облака (водности и влагозапаса), но также определить влажность атмосферы в подоблачном слое и внутри облака. Кроме того, это открывает возможность детального исследования образования дымки и появления аэрозоля, находящегося в обводненном состоянии.

Анализ результатов измерений однозначно указывает на большое разнообразие процессов, протекающих в облачных системах, выражаемых в том, что вклад в собственное излучение облаков водяного пара и жидкокапельной влаги может изменяться в очень широких пределах.

## Заключение

Созданный в 2012 г. современный микроволновый комплекс «Микрорадком» благодаря своей высокой чувствительности и долговременной стабильности характеристик открывает новые возможности как в проведении мониторинга термодинамического состояния тропосферы, так и в исследованиях фазовых переходов влаги в облаках. Полученная с его помощью информация окажется особенно ценной

для специалистов, занимающихся изучением переноса оптического излучения в атмосфере и составлением кратковременного прогноза погоды. Дальнейшее развитие подобных дистанционных измерений видится в комплексировании микроволновых и оптических инструментов для получения качественно новой информации о свойствах и характеристиках облаков.

Авторы благодарны администрации Федерального государственного бюджетного учреждения «Центральная аэрологическая обсерватория» и в первую очередь директору Ю.А. Борисову, а также сотрудникам Управления геофизического мониторинга, активных воздействий и государственного надзора Росгидромета А.И. Чеснокову и И.Ю. Аракеловой за помощь и поддержку в создании уникального измерительного комплекса (патентованное название «Микрорадком»), не имеющего на данный момент аналогов в РФ.

1. Ломакина Н.Я., Комаров В.С., Ильин С.Н. Статистические модели высотного распределения температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы Восточной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 7. С. 629–632.
2. Кадыгров Е.Н., Агапов Ю.В., Горелик А.Г., Миллер Е.А., Некрасов В.В., Троицкий А.В., Шапошников А.Н. Наземный микроволновый комплекс для мониторинга термодинамических характеристик тропосферы // Труды II Всерос. научн. конф. «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» / Под ред. С.С. Суворова. СПб., 2012. Т. 1. С. 404–410.
3. Кадыгров Е.Н., Горелик А.Г., Князев А.К., Миллер Е.А., Некрасов В.В., Троицкий А.В., Тоцкая Т.А., Шапошников А.Н. Перспективы применения микроволновой радиометрии для определения парообразной и жидкокапельной влаги в облаках в разные сезоны года // Тезисы Рабочей группы «Аэрозоли Сибири». Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2012. С. 80–81.
4. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974. 188 с.
5. Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры. М.: Наука, 1973. 415 с.
6. Троицкий А.В. Дистанционное определение температуры атмосферы из спектральных радиометрических измерений в линии  $\lambda = 5$  мм // Изв. вузов. Радиофиз. 1986. Т. 29, № 8. С. 878–888.
7. Степаненко В.Д., Щукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеониздат, 1987. 283 с.
8. Кадыгров Е.Н. Микроволновая радиометрия атмосферного пограничного слоя – метод, аппаратура, результаты измерений // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 7. С. 697–704.
9. Гладких В.А., Макиенко А.Э., Миллер Е.А., Одищов С.Л. Исследование параметров пограничного слоя атмосферы в городских условиях с помощью средств локальной и дистанционной диагностики. Часть 2. Температура воздуха и поток тепла // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 11. С. 987–994.
10. 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 // Meteorol. Applications. 1998. V. 5, iss. 4. P. 393–404.



11. Башаринов А.Е., Кутуза Б.Г. Исследование радионизлучения и поглощения облачной атмосферы в миллиметровом и сантиметровом диапазонах волн / Под ред. К.С. Шифрина. Перенос микроволнового излучения в атмосфере // Труды ГГО. 1968. Вып. 222. С. 100–110.
12. Горелик А.Г., Фролов Ю.А., Щукин Г.Г. Комплексные СВЧ и ИК радиометрические исследования оптически полупрозрачной облачности // Радиометеорология: Труды VII Всерос. совещ. Л.: Гидрометеиздат, 1989. С. 28–29.

*E.N. Kadyrov, A.G. Gorelik, E.A. Miller, V.V. Nekrasov, A.V. Troitsky, T.A. Tochilkina, A.N. Shaposhnikov.* **Results of tropospheric thermodynamics monitoring on the base of multichannel microwave system data.**

Results of the tropospheric thermodynamics monitoring on the base of multichannel microwave radiometric system "Microradcom" are presented in the paper. The system includes 4 microwave radiometers with the frequencies of 53–58 (6 channels), 56.6 (scanning), 22.235, and 37 GHz, a dopler radar for liquid precipitations measurements, and video system for cloud observations. Passive microwave system provides continuous unattended measurements of the tropospheric temperature profiles in altitude range 0–10 km, and also integral water vapour (IWV) and integral liquid water (ILW). Observations were provided in Dolgoprudny, Moscow region, from 1 March 2012 up to 31 December 2012. The comparison between radiometric and radiosonde measurements shows almost no bias, but a considerable scatter. The scatter is most probably due to radiosondes drifting away from an upright flight route.