

## Результаты исследований водозапаса облаков радиометрическим комплексом «Микрорадком»

Е.Н. Кадыгров, А.Г. Горелик, Т.А. Точилкина\*

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

Поступила в редакцию 20.01.2014 г.

Представлены результаты исследований водозапаса оптически тонких облаков и дымки, полученные с помощью высокочувствительного микроволнового многоканального измерительного комплекса «Микрорадком». В состав комплекса входят четыре СВЧ-радиометра: многоканальный с частотами в диапазоне 53–58 ГГц (измерение профилей температуры тропосферы), одноканальный сканирующий с частотой 56,6 ГГц (измерение профилей температуры атмосферного пограничного слоя), одноканальный – 22,235 ГГц (с приведенной чувствительностью 0,04 К для измерения интегрального водозапаса атмосферы), одноканальный – 37,5 ГГц (с приведенной чувствительностью 0,02 К для измерения интегрального водозапаса атмосферы), автоматическая метеостанция и видеосистема наблюдения за облачностью. Измерения проводились в г. Долгопрудном Московской области с февраля 2012 по январь 2014 г.

*Ключевые слова:* физика облаков, микроволновая радиометрия, водозапас атмосферы, водозапас облаков; cloud physics, microwave remote sensing, integral water vapour, liquid water in clouds.

### Введение

Облачный покров Земли играет ключевую роль в формировании всех синоптических и климатических процессов в атмосфере. Облачность регулирует радиационный баланс, очевидна также роль облачности как основного звена в обратной связи установления погоды [1]. В земной атмосфере вода присутствует во всех трех фазовых состояниях – газообразном, определяющем влажность воздуха, жидком (в виде капель в облаках, тумане и дожде) и твердом (в виде облачных кристаллов, снежинок, града). Понятно, что от фазового состава влаги в облаках сильно зависят их свойства и влияние на радиационные процессы в атмосфере [1, 2]. В частности, измерение водозапаса облаков является одним из важнейших звеньев в изучении строения, эволюции и физических свойств естественных облаков. Если данные об интегральном содержании водяного пара в атмосфере можно получить с помощью радиозонда, то данные о водозапасе и водности облака получить сложно, обычно их определяют с помощью установленных на самолете-метеолaborатории приборов [1–3]. В Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) в 2012–2013 гг. разработан и введен в эксплуатацию многоканальный СВЧ-комплекс «Микрорадком», имеющий в своем составе высокочувствительные СВЧ-радиометры с длинами волн 1,35 и 0,8 см, позволившими провести измерения интегрального содержания водяного пара в столбе

атмосферы (далее влагосодержание) и интегрального содержания жидкой воды (водозапас) [3] не только мощных облачных систем, но и получить новые сведения о водозапасе полупрозрачных облаков (собственное излучение которых в микроволновом диапазоне не превышает 4 К, например высоко-слоистые облака Altostratus) и дымки [4, 5].

### Методика измерений и основные характеристики аппаратуры

Измерения проводились в непрерывном режиме с помощью многоканального радиометрического комплекса «Микрорадком» в период февраль 2012 г. – январь 2014 г. на территории ЦАО (г. Долгопрудный Московской области) [4, 5]. В состав комплекса входят высокочувствительные и высокостабильные микроволновые радиометры [4]:

– многоканальный СВЧ-радиометр диапазона 60 ГГц (длина волны 0,5 см), обеспечивающий измерение профилей температуры тропосферы;

– сканирующий одноканальный СВЧ-радиометр с частотой 56,6 ГГц – профилей температуры атмосферного пограничного слоя;

– СВЧ-радиометр с центральной частотой 37,5 ГГц (длина волны 0,8 см) – водозапаса атмосферы;

– СВЧ-радиометр с центральной частотой 22,235 ГГц (длина волны 1,35 см) – влагосодержания атмосферы.

В состав «Микрорадком» входит также метеостанция WXT 520 Vaisala, обеспечивающая измерение приземных метеопараметров (температура, давление, влажность, ветер, осадки), система ви-

\* Евгений Николаевич Кадыгров (enkadygrov@gmail.com); Андрей Габриэлович Горелик; Татьяна Алексеевна Точилкина.

деонаблюдения за облачностью, навигатор GPS/GLONASS и система сбора, обработки и передачи информации [4]. Приведем более подробно характеристики двух СВЧ-радиометров, результаты измерений с помощью которых в основном использованы в настоящей статье – одноканальные радиометры с длинами волн 0,8 и 1,35 см. Они установлены внутри фургона-прицепа с системой кондиционирования, поддерживающей температуру в нем  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ . Измерения проводят в зенит через радиопрозрачное окно и внешнее зеркало-отражатель. Радиометры собраны по модуляционной схеме с приемниками прямого усиления, имеющими на входе современные трехкаскадные СВЧ-усилители. Чувствительность радиометра 0,8 см составляет 0,02 К, а радиометра 1,35 см – 0,04 К (при постоянной времени интегрирования 1 с) [4]. Периодические калибровки производятся при безоблачной атмосфере с помощью внешней микроволновой мишени. Контроль калибровок радиометра 1,35 см ведется дополнительно по данным радиозондов аэрологической станции Долгопрудный, выпускаемых в непосредственной близости от комплекса.

Определение влагосодержания и водозапаса атмосферы методом микроволновой радиометрии основано на их связи с характеристиками радиотеплового излучения атмосферы: радиояркостной температурой и оптической толщиной [6, 7]. Эти связи вытекают из уравнения радиотеплового излучения атмосферы [6]:

$$I_v = \frac{2kv^2}{c^2} \int_0^\infty T(l)\gamma_v(l) \times \exp\left(-\int_0^l \gamma_v(l')dl'\right) dl + I_\phi \exp\left(-\int_0^\infty \gamma_v(l)dl\right), \quad (1)$$

где  $I_v$  – интенсивность излучения;  $\gamma_v$  – коэффициент поглощения;  $v$  – частота;  $dl$  – элемент пути;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T(l)$  – профиль термодинамической температуры атмосферы;  $I_\phi$  – интенсивность реликтового излучения космоса.

Вместе с  $I_v$  часто используется радиояркостная температура  $T_y$ , это температура гипотетического абсолютно черного тела, излучение которого интенсивностью  $I_v$  в данном направлении равно излучению атмосферы [6, 7]:

$$T_y = \frac{c^2 I_v}{2kv^2}. \quad (2)$$

Высокочувствительный радиометрический комплекс «Микроградком», обладающий как минимум на порядок лучшей чувствительностью по сравнению с ранее использованной техникой в подобных экспериментах [8–15], был применен для решения важной задачи, а именно для исследования влияния полупрозрачной облачности на термодинамический режим атмосферы, который выражается в изменении ее излучательной способности, зарегистрированной одновременно в окне прозрачности (0,8 см) и в центре линии поглощения водяного пара (1,35 см) [4, 8]. Наличие полупрозрачной облачно-

сти может существенно изменять как температурный режим в нижних слоях атмосферы, так и распределение по высотам водяного пара [2, 10], что должно сказаться на взаимозависимости:

$$T_y^{1,35} / T_y^{0,8} \text{ или } \tau^{1,35} / \tau^{0,8}, \quad (3)$$

где  $\tau$  – оптическая толщина.

На практике для определения радиояркостной температуры часто используют уравнение регрессии, где радиояркостная температура выражается через коэффициенты поглощения в кислороде, водяном паре и жидкокапельной влаге [8]:

$$T_y^\lambda = A_\lambda + B_\lambda R + C_\lambda W. \quad (4)$$

Здесь  $R$  – влагосодержание атмосферы (интегральное содержание водяного пара в столбе атмосферы единичной площади);  $W$  – водозапас атмосферы (интегральное содержание жидкокапельной воды в столбе атмосферы единичной площади);  $A_\lambda$ ,  $B_\lambda$ ,  $C_\lambda$  – коэффициенты, связывающие уровень собственного излучения и поглощения с количеством поглощающих компонент. Влагосодержание атмосферы  $R$  и водозапас облаков  $W$  обычно выражаются в  $\text{кг}/\text{м}^2$  или  $\text{г}/\text{см}^2$  (соответственно  $1 \text{ кг}/\text{м}^2 = 0,1 \text{ г}/\text{см}^2$ ) [3].

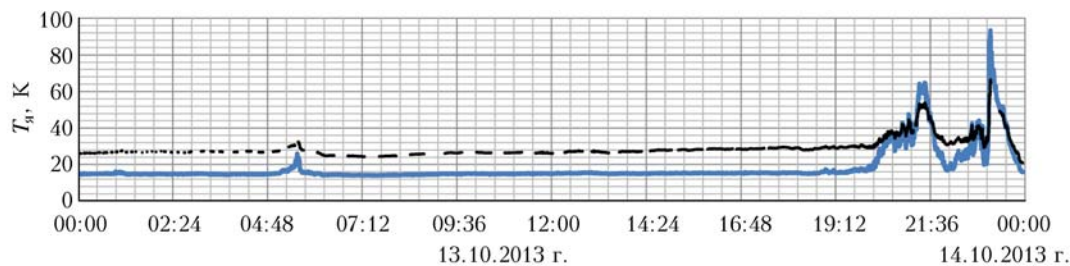
## Результаты измерений и их анализ

Изучая полученные записи радиояркостных температур при различных метеоусловиях и в различные сезоны года, наблюдаем очень большое разнообразие их значений на каждом из каналов. Примеры записей приведены на рис. 1.

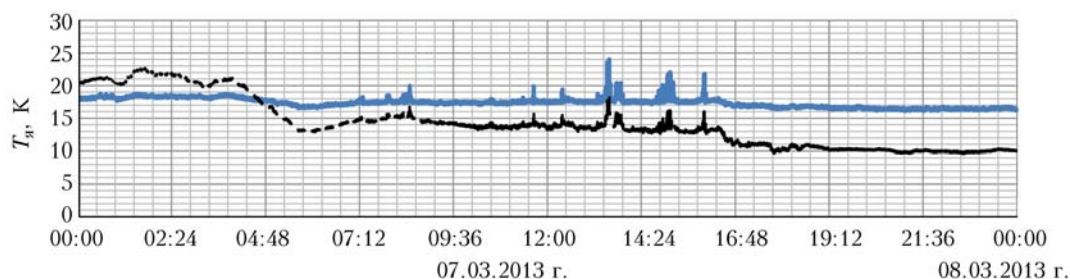
На базе экспериментального материала, полученного с помощью комплекса «Микроградком», построены зависимости  $T_y^{1,35} = f(T_y^{0,8})$ . Так как комплекс работает непрерывно, данные зависимости строились для интервала времени, равного 24 ч (рис. 2). Большой набор точек отображает общую картину изменения яркостных температур за день. Учитывая, что канал, работающий на длине волны 0,8 см, обладает повышенной чувствительностью к жидкой фракции в облаке, а канал 1,35 см – к паробразной, по поведению кривой можно судить о характере изменения во времени водозапаса и влагосодержания, т.е. о фазовых переходах влаги в облаках.

Наиболее интересным является построение зависимостей для отдельных промежутков времени (рис. 3). Анализ зависимостей  $T_y^{1,35} = f(T_y^{0,8})$  дает ценную информацию о том, каким образом происходит трансформация облака или облачной системы в диапазоне пространственно-временных масштабов. Эта информация оказывается наиболее полезной, если она опирается на определенные модели, на базе которых получены аналогичные зависимости [13–15].

Анализ таких взаимозависимостей становится весьма информационным, если полученные материалы разбить по диапазонам  $\Delta T_y$  или  $W$ , которые соответствуют той или иной облачности, или анализировать их с различным временным разрешением.



*a*



*б*

Рис. 1. Вариации значений радиоярких температур: *a* – нижняя кривая – температура на канале 0,8 см, верхняя кривая – на канале 1,35 см; *б* – с 00:00 до 4:48 температура на канале 0,8 см идет ниже, чем на канале 1,35 см, после 4:48 температура на канале 0,8 см идет выше, чем на канале 1,35 см

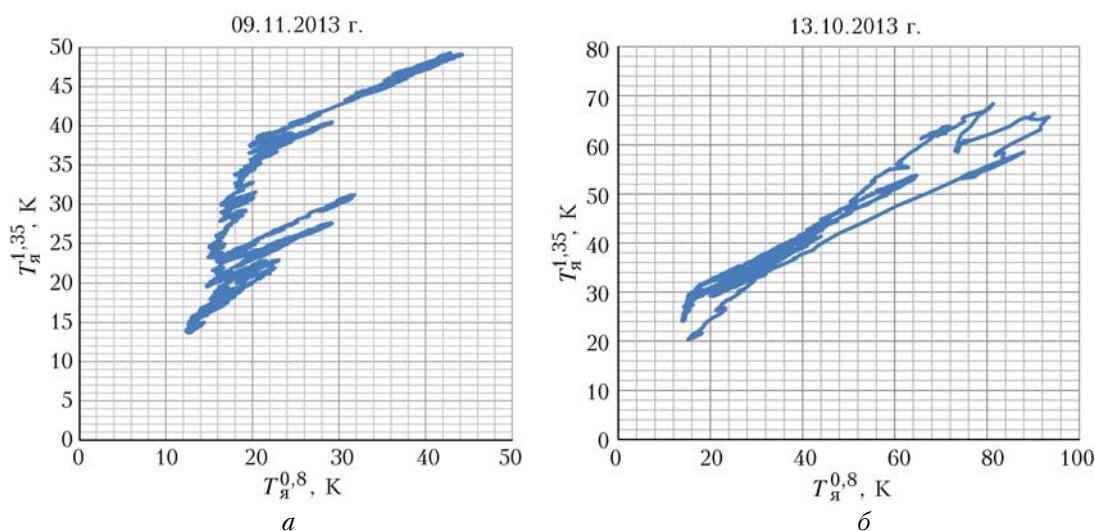


Рис. 2. Зависимость радиоярких температур на каналах 1,35 и 0,8 см за время с 00:00 до 24:00. *a* – 09.11.2013 г., *б* – 13.10.2013 г.

В этом случае удается выявить, как происходит изменение структуры водозапаса и влагосодержания облачности или облачной системы в процессе ее прохождения над пунктом зондирования. Для безоблачной атмосферы при измерении радиационных потоков на нескольких длинах волн одновременно между этими величинами должна существовать достаточно высокая и устойчивая корреляция [8, 10]. Если не учитывать ряд вторичных факторов (например, облачности), то эта связь может быть линейной.

Изменение угла наклона  $T_{я}^{1,35} = f(T_{я}^{0,8})$ , указывает на то, что возникают дополнительные факторы, которые влияют на излучательные свойства облака на той или другой длине волны или на обеих длинах одновременно. К числу таких факторов могут принадлежать повышение в облаке концентрации водя-

ного пара, образование крупных кристаллов, появление многоярусной облачности, для которой каждый ярус может иметь свой фазовый состав и строение [2]. Если представить полученные экспериментальные данные в виде точек, можно наблюдать изменение угла наклона для различных периодов времени или различных облачных систем (рис. 4).

Видно, что каждое из этих семейств точек может быть разбито еще на семейства с разным количеством точек. Были рассчитаны значения углов наклона зависимостей для различных месяцев. Данные расчета представлены в табл. 1, из которой следует, что тангенс угла наклона  $tg\gamma/x$  для летнего периода смещается в область больших углов по сравнению с зимой. Анализ полученных нами данных показал, что угол наклона зависит от типа облачности

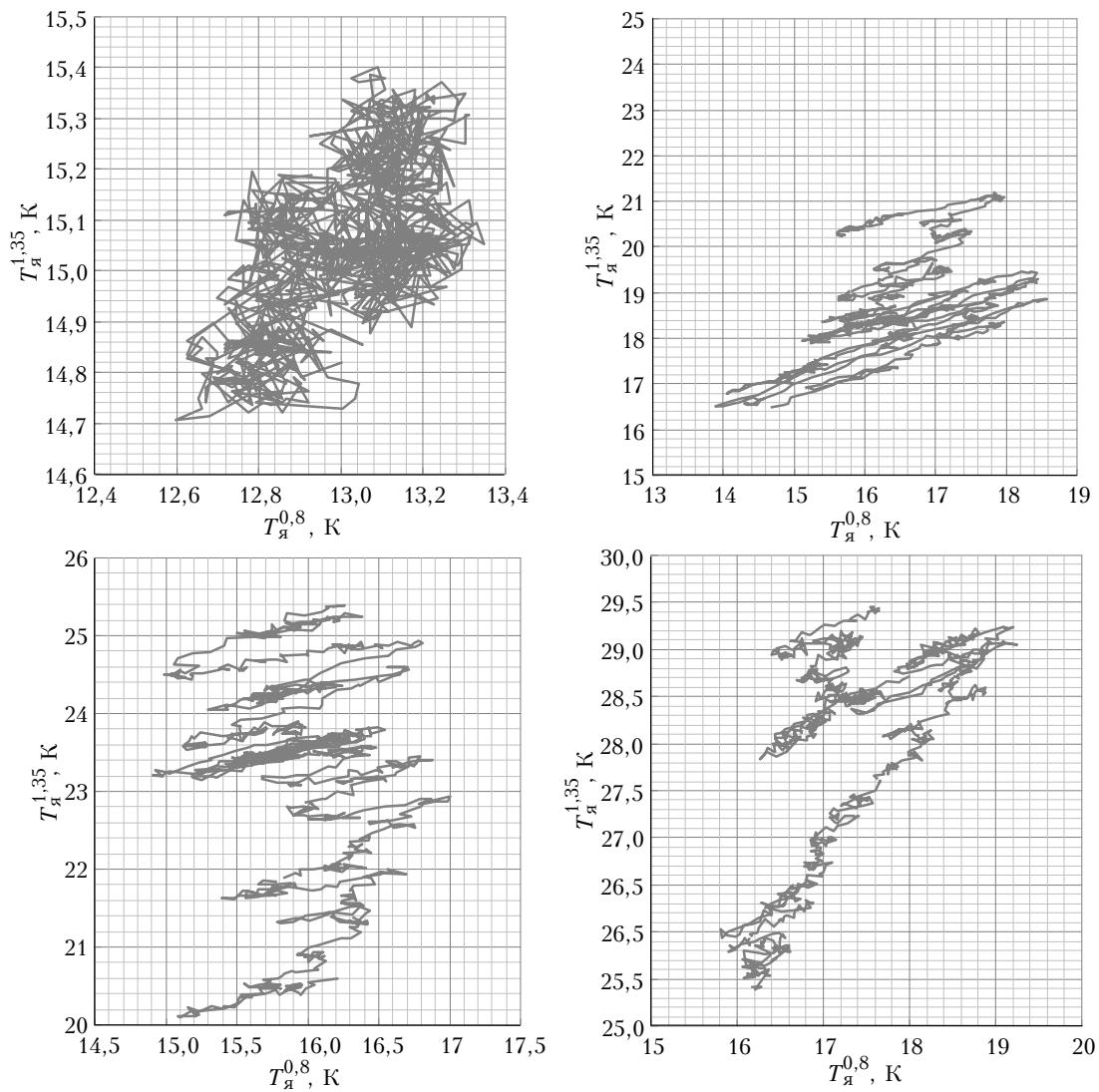


Рис. 3. Зависимость радиояростных температур на каналах 1,35 и 0,8 см. Выбраны четыре интервала по 1000 точек для различных участков времени 09.11.2013 г.

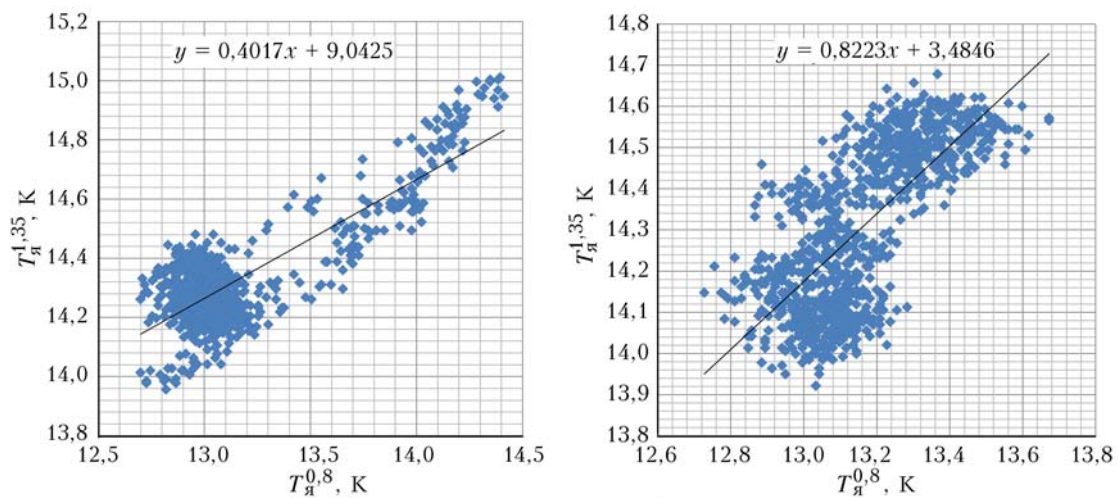


Рис. 4. Зависимость радиояростных температур на каналах 1,35 и 0,8 см с уравнением линии тренда для 1000 точек

и водозапаса [2]. Особенно ярко этот процесс проявляется при больших значениях водозапаса облаков, предшествующих выпадению жидких осадков [1, 2].

Многообразие полученных высокочувствительными радиометрами экспериментальных данных дало возможность проследить последовательность и величину изменения угла наклона  $T_{я}^{1,35} = f(T_{я}^{0,8})$  и сделать вывод, что, базирясь на характере взаимозависимостей, можно изучать фазовые переходы, происходящие в атмосфере, и ее микроструктуру [8, 10]. В случае, когда угол наклона зависимости  $T_{я}^{1,35} = f(T_{я}^{0,8})$  становится меньше (приближается к горизонтальной оси), то это указывает на относительное снижение роли водяного пара и рост влияния жидкокапельной влаги при одновременном увеличении размера капель в облаке (см. рис. 4) [2]. Анализ данных также показывает, что коэффициент  $C_{\lambda}$  в уравнении (4) является величиной сложной и многофункциональной. С учетом этого радиояркость температура и поглощение на длине волны  $\lambda$  могут быть описаны предложенными нами и приведенными ниже формулами, отличными от используемых ранее в работах [8, 9, 11]. Различное и комплексное влияние разных параметров подчеркивает сложность процессов, протекающих в атмосфере:

$$T_{я}^{\lambda} = [A_{\lambda}(T) + B_{\lambda}(T, R)R] + [B_{\lambda}(T, R) * \Delta R + C_{1\lambda}(T) * W_{\text{МК}} + C_2(T)W_{\text{КК}} + C_3(T) * W_{\text{О.К}}]; \quad (5)$$

$$\tau^{\lambda} = [a_{\lambda}(T) + b_{\lambda}(T, R) * R] + [b_{\lambda}(T, R) * \Delta R + c_{1\lambda}(T) * W_{\text{МК}} + c_2 W_{\text{КК}} + c_3(T) * W_{\text{О.К}}]. \quad (6)$$

Здесь  $\Delta R$  – изменение интегрального влагосодержания за счет облачности;  $W_{\text{МК}}$  – водозапас, определяемый мелкокапельной фракцией,  $W_{\text{КК}}$  – крупнока-

пельной фракцией,  $W_{\text{О.К}}$  – обводненными кристаллами;  $A_{\lambda}(T)$ ,  $B_{\lambda}(T, R)$ ,  $C_{1\lambda}(T)$ ,  $C_2(T)$ ,  $C_3(T)$ ,  $a_{\lambda}(T)$ ,  $b_{\lambda}(T, R)$ ,  $c_{1\lambda}(T)$ ,  $c_2(T)$ ,  $c_3(T)$  – коэффициенты, связывающие уровень собственного излучения и поглощения с количеством поглощающих компонент.

$$\Delta R = \int_{H_1}^{H_2} adH; \quad W = \int_{H_1}^{H_2} wdH, \quad (7)$$

где  $a$  – удельное влагосодержание,  $\text{г}/\text{см}^3$ ;  $w$  – водность облака,  $\text{г}/\text{см}^3$  [3],  $w = W_{\text{МК}} + W_{\text{КК}} + W_{\text{О.К}}$ ;  $H_1$  – нижняя и  $H_2$  – верхняя границы облака.

Данные о нижней кромке облаков обычно получают с помощью ИК-радиометров и лидаров, а о верхней – из радиолокационных или спутниковых данных (например, используют данные, полученные с помощью установленных на спутнике Aqua приборов AIRS (Atmospheric Infrared Sounder), AMSU (Advanced Microwave Sounding Unit) и MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), имеющих горизонтальное разрешение  $5 \times 5$  км, что, впрочем, не обеспечивает необходимой точности в локальной точке наземных наблюдений) [14–16]. Нами делаются попытки получения информации о вертикальных размерах облаков из данных многоканального СВЧ-радиометра комплекса «Микрорадком», работающего на частотах 50–60 ГГц, но пока они далеки от завершения. На рис. 5 приведен пример влияния облачности на данные для этих каналов.

На основании полученных результатов были произведены расчеты водозапаса для высококучевых и высокослоистых облаков и при наличии дымки (табл. 2 и 3). Разброс значений водозапаса в табл. 3 указывает на разнообразие структур, из которых может состоять дымка. Приведенные выше формулы (5) и (6) существенно отличаются от формулы (4).

Таблица 1

Усредненные данные по углу наклона зависимостей  $T_{я}^{1,35} = f(T_{я}^{0,8})$  для различных месяцев

Месяц	Угол наклона зависимостей $T_{я}^{1,35} = f(T_{я}^{0,8})$							
	tg $\gamma$ /x							
	0,0–0,2	0,2–0,4	0,4–0,6	0,6–1,0	1,0–1,5	1,5–2,0	2,0–3,0	3,0 и более
	Процент наличия данного угла наклона в общем числе случаев							
Февраль 2012 г.	6,12	14,29	46,94	20,41	4,08	2,04	4,08	2,04
Март	17,86	16,67	21,43	22,62	4,76	4,76	3,57	8,33
Ноябрь	4,55	12,12	33,33	18,18	0,00	13,64	10,61	7,58
Декабрь	12,35	17,28	19,75	14,81	14,81	7,41	9,88	3,70
Январь 2013 г.	8,57	10,00	27,51	32,86	4,29	12,86	5,71	0,00
Февраль	4,69	17,19	23,44	37,50	10,94	1,56	1,56	3,13
Сумма	54,14	87,55	170,61	146,38	38,88	42,27	35,41	24,78
% за период	9,02	14,59	28,43	24,40	6,48	7,04	5,90	4,13
Июнь 2012 г.	2,73	1,82	23,64	11,82	19,09	10,91	17,27	12,73
Июль	1,75	2,63	18,42	11,40	12,28	9,65	31,58	12,28
Август	2,44	2,44	29,27	19,51	11,38	11,38	19,51	4,07
Сумма	6,92	6,89	71,33	42,73	42,75	31,94	68,36	29,07
% за период	2,31	2,30	23,78	14,24	14,25	10,65	22,79	9,69

Примечание. У зимних облаков угол наклона сдвинут в область 0,00–1,00, у летних – в область 1,00–3,00 и более.

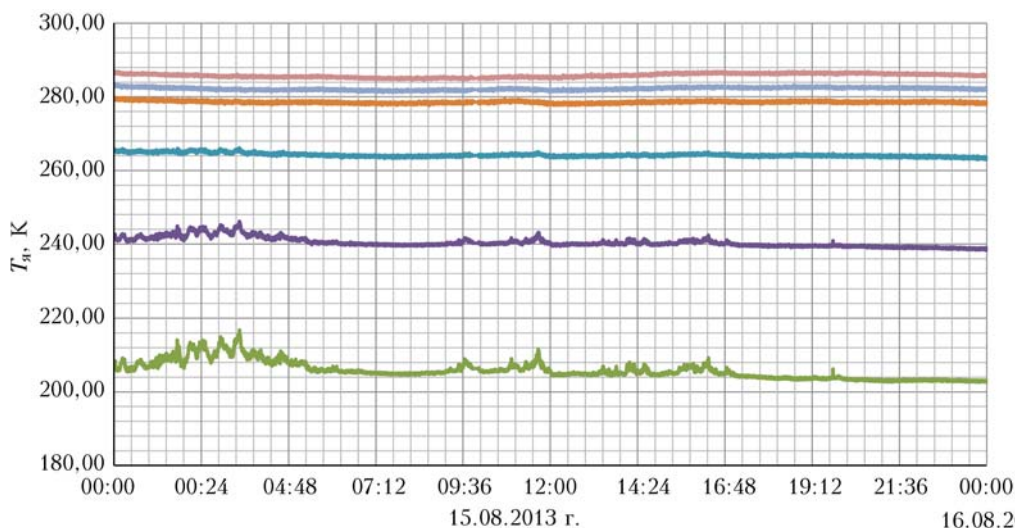


Рис. 5. Изменение радиояростной температуры в течение 24 ч. Снизу вверх для частот 53,3; 53,9; 54,5; 55,1; 55,7; 56,7 ГГц

Т а б л и ц а 2

Водозапас для высококучевых и высокослоистых облаков

Дата	$T$ , °С	Время	Тип облачности	Водозапас, г/см <sup>2</sup>
05.12.2012	-4,1	17:19	Высококучевые просвечивающие	0,0002–0,02
12.12	-9,7	22:24	Высококучевые просвечивающие	0,0022–0,02
22.12	-14,1	13:16	Высококучевые просвечивающие	0,01–0,04
23.12	-20,1	04:07	Высококучевые просвечивающие	0,02–0,03
22.01.2013	-14	7, 13, 22:24	Высококучевые просвечивающие	0,03–0,05
23.01	-11	00:04	Высококучевые просвечивающие	0,001–0,016
15.02	-2,6	7, 19	Высококучевые просвечивающие	0,01–0,05
30.03	1,6	8:10	Высококучевые просвечивающие	0,01–0,02
30.03	1,6	17:19	Высокослоистые непросвечивающие	0,12–0,13
04.04	5,1	10:13	Высококучевые просвечивающие	0,01–0,02
04.04	5,1	22:24	Высококучевые просвечивающие	0,01–0,05
23.04	11,3	11:13	Высокослоистые непросвечивающие	0,01–0,03
12.05	26,9	22:24	Высококучевые просвечивающие	0,00–0,11
17.07	20,8	04:10	Высококучевые просвечивающие	0,00–0,011
13.10	12,2	00:10	Высококучевые просвечивающие	0,01–0,02
13.10	12,2	22:24	Высококучевые непросвечивающие	0,01–0,04
23.10	1,8	08:24	Высококучевые просвечивающие	0,03–0,06
29.10	14	13:16	Высококучевые просвечивающие	0,03–0,05
30.10	11,1	03:04	Высококучевые просвечивающие	0,02–0,052
18.11	2,6	00:04	Высококучевые просвечивающие	0,4–0,6

Примечание.  $T$  – температура воздуха у подстилающей поверхности.

Т а б л и ц а 3

Водозапас при отсутствии облаков и наличии дымки

Дата	$T$ , °С	Время	Водозапас, г/см <sup>2</sup>
20.12.2012	-17,5	00:07	0,0016–0,0047
22.12	-14,1	00:04	0,005–0,007
23.12	-20,1	19:24	00–0,015
15.02.2013	-2,6	22:24	0,01–0,017
16.02	-6,3	00:07	0–0,01
08.04	8,1	04:10	0,0004–0,011
13.04	8,8	04:07	00–0,007
25.06	24,4	00:07	00–0,001
29.06	20,3	00:10	0,02–0,03
13.07	24,1	00:04	0,03–0,05
10.08	28,3	00:01	0,0009–0,01
10.08	29,2	19:24	0,02–0,04
17.08	21	00:10	0,02–0,03
27.08	15,2	00:04	00–0,02
19.09	13,1	00:04	0,0009–0,001
27.09	7,6	08:10	0,002–0,006
23.10	1,8	00:07	0,002–0,012
09.11	7,5	07:13	0,004–0,026

Нами были использованы данные для длин волн 0,8 и 1,35 см, но этого явно не достаточно для решения многопараметрического уравнения. Для решения задачи необходимо привлечение результатов, полученных на частотах диапазона 50–60 ГГц, а также применение других средств, например лидарной техники и радиолокации [8, 16].

### З а к л ю ч е н и е

Анализ взаимозависимостей, полученных и обработанных за различные промежутки времени, указал на многообразие процессов, протекающих в облачных системах даже при сравнительно невысоком содержании в облаке жидкокапельной и паробразной влаги. Проанализированы возможности применения высокочувствительных СВЧ-радиометров для исследования водозапаса полупрозрачных облаков и дымки. Предложены многопараметрические формулы для радиояростной температуры и оптической толщи облачной атмосферы. На следующем

этапе планируется проведение исследований для определения вклада в излучение парообразной влаги, ледяных кристаллов, снежинок, предполагается также использовать синхронно и в том же объеме полученные комплексом «Микрорадком» данные на частотах в диапазоне 50–60 ГГц, что, возможно, позволит провести определение высоты, на которой находится облако, и идентификацию его температурного режима. Это даст геофизическую интерпретацию результатов, обеспечивающих формирование микроволнового излучения как при полупрозрачной облачности, так и в условиях дымки.

Авторы благодарны ведущим инженерам ФГБУ «ЦАО» А.Н. Шапошникову и В.В. Некрасову – одним из основных разработчиков комплекса «Микрорадком», за проведение калибровок и контроль характеристик измерительной аппаратуры, а также главному программисту ФГБУ «ЦАО» Е.А. Миллеру за помощь в обработке данных. Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 2014-05-00038).

1. Боровиков А.М. Физика облаков // Труды ЦАО. 1969. Вып. 90. С. 41–49.
2. Облака и облачная атмосфера: Справочник / Под ред. И.П. Мазина и А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеониздат, 1989. 647 с.
3. Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь / Под ред. А.И. Бедрицкого. СПб.: Летний сад, 2008. Т. 1. 234 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. Кадыгров Е.Н., Горелик А.Г., Князев А.К., Миллер Е.А., Точилкина Т.А. Результаты экспериментальных исследований водозапаса зимних облаков // Тезисы XX Рабочей группы «Аэрозоли Сибири». Томск, Изд. ИОА СО РАН. 2013. С. 78.

6. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974. 188 с.
7. Жевакин С.А. О радиотеплолокационном определении интегральной влажности атмосферы и интегральной водности, температуры и высоты капельной фазы облаков // Изв. вузов. Радиофиз. 1978. Т. XXI, № 8. С. 1122–1131.
8. Степаненко В.Д., Шукин Г.Г., Бобылёв Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеониздат, 1987. 283 с.
9. Караваев Д.М., Шукин Г.Г. Применения методов СВЧ-радиометрии для диагностики содержания жидкокапельной влаги в облаках // Труды НИЦДЗА. Прикладная метеорология. 2004. Вып. 5 (553). С. 99–120.
10. Горелик А.Г., Калашников В.В., Райкова Л.С., Фролов Ю.А. Радиотепловые измерения влажности атмосферы и интегральной водности облаков // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1973. № 5. С. 928–936.
11. Рассадовский В.А., Троицкий А.В. Радиометрические исследования влагосодержания и жидкокапельной фракции облачной атмосферы // Труды 5-го Всесоюз. совещ. по радиометеорологии. М.: Гидрометеониздат, 1981. С. 173–176.
12. Башаринов А.Е., Кутуза Б.Г. Исследование радиоизлучения и поглощения облачной атмосферы в миллиметровом и сантиметровом диапазонах волн // Труды ГГО. 1968. Л.: Гидрометеониздат. Вып. 222. С. 100–110.
13. Westwater E.R. The accuracy of water vapor and cloud liquid determination by dual frequency ground-based radiometry // Radio Science. 1978. N 4. P. 667–685.
14. Peter R., Kampfer N. Radiometric determination of water vapor and liquid water and its validation with other techniques // J. Geophys. Res. D. 1992. V. 18, N 97(16). P. 18.173–18.183.
15. Matzler C., Morland J. Advances in surface-based radiometry of atmospheric water. IAP Research Report. 2008. 2008-02-MW, University of Bern, Bern, Switzerland.
16. Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Макеев А.П., Матвиенко Г.Г., Невзоров А.В., Солдатов А.Н., Романовский О.А., Харченко О.В., Яковлев С.В. Лидарные технологии дистанционного зондирования параметров атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 10. С. 829–837.

*E.N. Kadygrov, A.G. Gorelik, T.A. Tochilkina. Study of the liquid water in clouds with the “Micro-radkom” microwave system.*

Results of study of liquid water in thin clouds and mist with the multichannel microwave radiometric system “Microradkom” are presented in the paper. The system includes 4 microwave radiometers: multichannel with frequencies of 53–58 GHz (tropospheric temperature profiling); scanning 56.6 GHz (atmospheric boundary layer temperature profiling); 22.235 GHz (with a sensitivity of 0,04 K at 1 s integration time for integral water vapor measurements); 37.5 GHz (with a sensitivity of 0.02 K at integration time of 1 s for integral liquid water measurements), and automatic meteostation and video system for cloud observations. Observations were provided in Dolgoprudny, Moscow region, from February 2012 to January 2014.