

## **Многодиапазонное СВЧ радиометрическое зондирование удаленных зон дождя**

Е.В.Федосеева, И.Н. Ростокин, Г.Г.Щукин, Е.А. Ростокина

*Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО  
«Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г.Столетовых»,  
602264, г. Муром, Владимирской обл., ул. Орловская 23,  
E-mail: elenafedoseeva@yandex.ru  
Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,  
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13,  
E-mail: ggshchukin@mail.ru*

*Выполнен анализ влияния удаленной области дождя на радиояркостную температуру атмосферы при горизонтальном зондировании многочастотной СВЧ радиометрической системы. Получены численные оценки радиояркостной температуры и ее прироста обусловленного наличием зоны дождя в направлении зондирования. Приведены данные измерений мощности радиотеплового излучения атмосферы с областью дождя, выполненные трехдиапазонной СВЧ радиометрической системой, и показано наличие тенденции различного по времени формирования прироста выходного сигнала системы при приближении области дождя к месту базирования СВЧ радиометрической системы.*

*The analysis of the influence of a remote rain area on the radio brightness temperature of the atmosphere during horizontal sounding of a multi-frequency microwave radiometric system is performed. Numerical estimates of the radiofrequency temperature and its increase due to the presence of a rain region in the direction of sounding are obtained. The data of measurements of power of thermal radiation of the atmosphere with the rain, made a tri-band microwave radiometric system, and shows a trend different time of formation of growth of the output of the system.*

### **Введение**

Важная задача систем дистанционного зондирования атмосферы - формирование достоверных прогнозов опасных погодных явлений, в частности, получение оперативной оценки возможности выпадения ливневых дождей и сильных осадков в виде снега и града на определенной территории по результатам пассивных микроволновых радиометрических измерений [1-3].

СВЧ радиометрические системы позволяют оперативно отслеживать пространственно-временные изменения состояния атмосферы по изменению уровня создаваемого ей радиотеплового излучения, так можно получить оперативную информацию о наличии в зондируемой области атмосферы зоны осадков.

Цель работы - формирование предпосылок разработки многодиапазонного метода обнаружения и мониторинга зон дождя при наклонном СВЧ радиометрическом зондировании при малых углах места.

В данной статье исследуются теоретические вопросы численной оценки радиояркостной температуры удаленной зоны дождя при наклонном зондировании при малых углах места антенны, рассматриваются вопросы технической реализации таких измерений с применением трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов и анализируются экспериментальные данные по измерению радиотеплового излучения атмосферы с удаленными зонами дождя.

### Теоретическая основа многодиапазонного СВЧ радиометрического зондирования удаленных зон дождя

Сложная многопараметрическая зависимость радиояркой температуры атмосферы от метеопараметров атмосферы, ее однородности, наличия осадков и частотного диапазона СВЧ радиометрических измерений приводит к необходимости использования регрессионных моделей оценки метеопараметров при обеспечении стандартных условий в атмосфере, или более сложных статистических методов, например, метода Монте-Карло [1-3].

При формировании радиотеплового излучения атмосферы, фиксируемого в определенной точке пространства, можно говорить об эффективном слое, в основном определяющем величину радиояркой температуры атмосферы.

Наличие в направлении дистанционного зондирования протяженной слабо поглощающей области перед сильно поглощающей может существенно уменьшить его влияние на общее значение радиояркой температуры такой неоднородной среды. Проанализируем в данном контексте условия СВЧ радиометрического зондирования зоны дождя, удаленной на некоторое расстояние от места измерения радиояркой температуры атмосферы. Проанализируем возможности удаленного обнаружения такой зоны дождя в трех частотных диапазонах с центральными длинами волн 1,35 см, 3,2 см и 7,5 см.

При моделировании радиояркой температуры были введены следующие упрощающие предположения:

- горизонтальная однородность атмосферы в области без дождя и в зоне дождя, характеризуемая постоянным коэффициентом поглощения, зависящим от частоты;
- прямолинейность радиолуча, характеризующего направление формирования радиотеплового излучения атмосферы с зоной дождя в точку приема;
- существенно отстоящий от зенита угол места - 30° направления зондирования, что позволяет пренебречь излучением дождевого облака и учитывать только зону выпадения дождя.

Согласно известным опубликованным данным по коэффициентам поглощения атмосферы без осадков и области дождя [1, 2] были приняты при расчетах радиояркой температуры атмосферы с удаленной областью дождя значения коэффициентов ослабления, приведенные в Таблице 1.

**Таблица 1 - Погонные коэффициенты поглощения атмосферы**

Длина волны, см	Коэффициент ослабления атмосферы, дБ·км <sup>-1</sup>			
	Без дождя	В дожде с интенсивностью		
		1мм/час	10мм/час	100 мм/час
1,35	0,1	0,1	0,2	2
3,2	0,02	0,03	0,03	0,3
7,5	0,001	0,005	0,005	0,05

На основе уравнения переноса излучения для неоднородной структуры [1-2] и с учетом указанных упрощений модель радиояркой температуры неоднородной атмосферы с удаленной от СВЧ радиометрической системы областью дождя была принята в виде

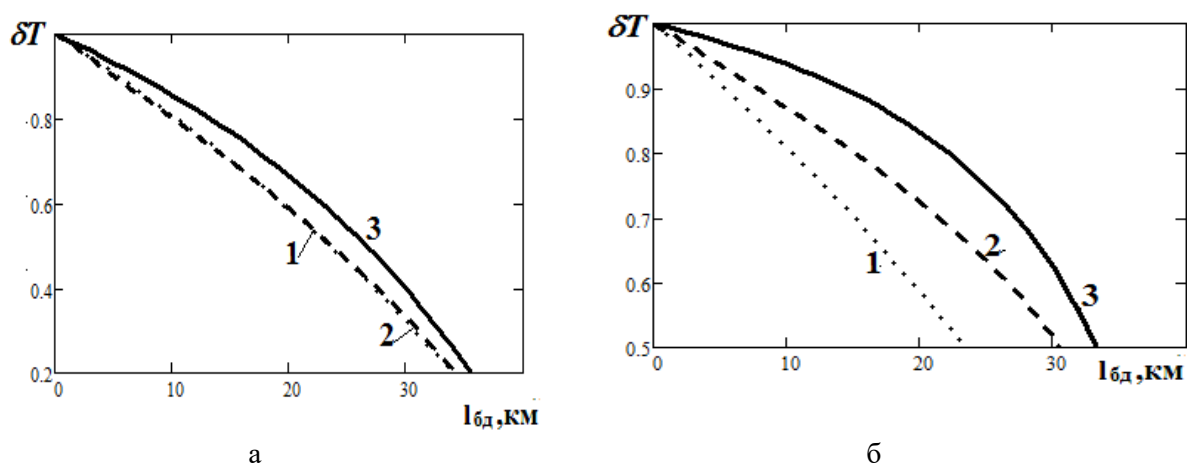
$$T_{ярк} = \Delta T_{\delta} + \Delta T_{\delta\delta} = (1 - e^{-\alpha_{\delta} \cdot l_{\delta}}) T_{\delta} e^{-\alpha_{\delta\delta} \cdot l_{\delta\delta}} + \int_0^{l_{\delta\delta}} \alpha_{\delta\delta} T_{\delta\delta} \exp\left(-\int_x^{l_{\delta\delta}} \alpha_{\delta\delta} dy\right) dx, \quad (1)$$

где  $T_{ярк}$  - радиояркостная температура атмосферы с удаленной областью дождя;  $\Delta T_{\delta}$  и  $\Delta T_{\delta\delta}$  - составляющие радиояркостной температуры атмосферы, обусловленные радиотепловым излучением продольной области до дождя и областью дождя соответственно;  $\alpha_{\delta}$  и  $\alpha_{\delta\delta}$  - погонные коэффициенты затухания в области дождя и в области атмосферы без дождя;  $T_{\delta}$  и  $T_{\delta\delta}$  - термодинамические температуры областей дождя и без дождя;  $l_{\delta}$  и  $l_{\delta\delta}$  - продольные размеры области дождя и без дождя.

Была выполнена оценка относительного вклада удаленной зоны дождя в измеряемую радиояркостную температуру в указанных трех диапазонах по формуле

$$\delta T = \frac{\Delta T_{\delta}}{T_{ярк}}. \quad (2)$$

Результаты расчета относительного вклада радиотеплового излучения удаленной области дождя в радиояркостную температуру атмосферы приведены на рис. 1.



**Рис. 1** Относительный вклад радиотеплового излучения удаленной области дождя в радиояркостную температуру атмосферы при интенсивности дождя 1мм/час (а) и 10 мм/час (б) на длинах волн 1,35см (1), 3,2см (2), 7,5 см (3).

Результаты численной оценки радиояркостной температуры атмосферы с удаленной областью дождя показали совпадение общей тенденции зависимости изменения величины  $T_{ярк}$  от расстояния до области дождя. С увеличением расстояния  $T_{ярк}$  уменьшается для всех трех длин волн, но согласно данным рис. 2 вклад в  $T_{ярк}$  ослабленного атмосферой радиотеплового излучения удаленной области дождя зависит от длины волны, интенсивности дождя и расстояния до этой области от точки наблюдения: с увеличением интенсивности дождя прирост наблюдаемой радиояркостной температуры, обусловленный влиянием удаленной области дождя возрастает и тем сильнее, чем больше длина волны.

Полученные результаты анализа радиояркостной температуры атмосферы с удаленной областью дождя позволили предположить о возможном различии по времени наблюдения прироста выходного сигнала в разных частотных каналах СВЧ радиометрической системы при появлении в удаленной области зоны дождя.

### Технические вопросы экспериментальных исследований

Для проверки предположения о различном по времени формировании прироста радиояркой температуры атмосферы с удаленной зоной дождя в разных частотных диапазонах были проведены наклонные измерения мощности радиотеплового излучения горизонтально неоднородной атмосферы в разных частотных диапазонах. Для данных исследований применялась трехканальная СВЧ радиометрическая система с центральными длинами волн рабочих диапазонов 1,35 см, 3,2 см, 7,5 см с приемом излучения на общую апертуру зеркальной антенны с формированием дополнительных сигналов компенсации влияния фоновых шумов в диапазонах с центральными длинами волн 3,2 см и 7,5 см [4-5].

Измерения выполнялись для направления антенны соответствующего углу места  $30^\circ$  при базировании СВЧ радиометрической системы в Муромском районе Владимирской области.

Технические характеристики системы для трех частотных диапазонов приведены в Таблице.

**Таблица Технические характеристики трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы**

Параметр	Значение		
	7.5	3.2	1.35
1. Длина волны, $\lambda$ см.	7.5	3.2	1.35
2. Радиометрическая чувствительность $\Delta T$ , при постоянной времени интегрирования $\tau = 1$ с.	0.03	0.04	0.05
3. Полоса пропускания, $\Delta f$ МГц.	800	1000	800
4. Шумовая температура приемника, $T_{ш\text{пр}}$ °К	13	13	101
5. Коэффициент усиления приемника, $G$ дБ.	60	60	53
6. Ширина диаграммы направленности по уровню -3 дБ, при ( $D = 1000$ мм, $F = 320$ мм) - мобильный вариант	5.07	1.82	0.91
7. Коэффициент усиления антенны, $K_{ус}$ дБ.	31	40	46
8. Ширина диаграммы направленности по уровню -3 дБ, при ( $D = 2400$ мм, $F = 900$ мм) - стационарный вариант	2.13	0.76	0.38
9. Коэффициент усиления антенны, $K_{ус}$ дБ.	39	48	54

Приведенные ранее численные оценки прироста радиояркой температуры атмосферы при приближении области дождя к месту базирования СВЧ радиометрической системы были получены в предположении нулевой ширины ДН антенны, т.е. для случая линейного горизонтального направления в атмосфере. Отличие реальных условий СВЧ радиометрического зондирования атмосферы от ранее указанных состоит в приеме радиотеплового излучения атмосферы антенной с ненулевой шириной ДН, что приводит к влиянию на результаты измерений изменения состояния всего окружающего антенну пространства. Это определило необходимость экспериментальной проверки теоретических выкладок по различиям прироста радиояркой температуры для многочастотных исследований и оценки их проявления в приростах антенной температуры и, соответственно, выходных сигналов.

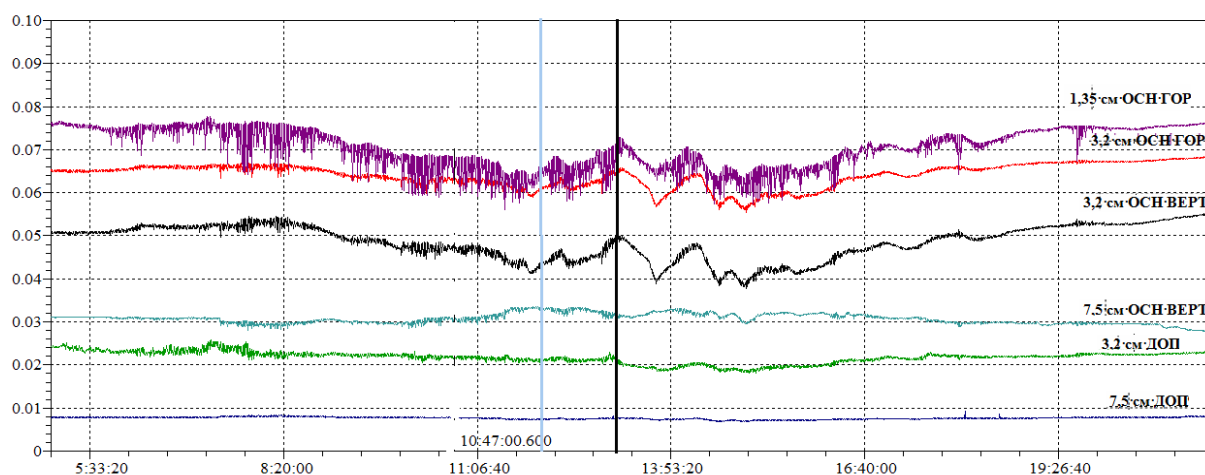
### Результаты многодиапазонных СВЧ радиометрических измерений удаленных зон дождя

Для решения задачи предварительной оценки наличия различий по времени реакции системы на удаленную область дождя в разных частотных диапазонах были

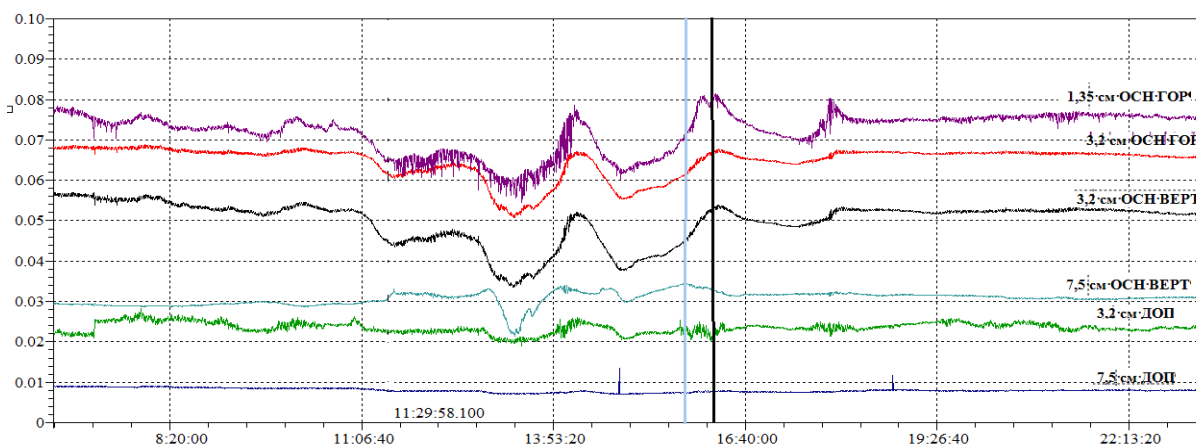
выполнены измерения мощности радиотеплового излучения атмосферы при наклонном зондировании при малом угле места  $30^\circ$ .

Существенное отличие ожидаемых результатов зондирования от полученных при численных расчетах радиояркостной температуры атмосферы с удаленной областью дождя может быть обусловлено ненулевой шириной ДН антенны.

Результаты продолжительных (суточных) измерений мощности радиотеплового излучения атмосферы при наличии удаленных зон дождя трехдиапазонной СВЧ радиометрической системой приведены на рис.2-4.

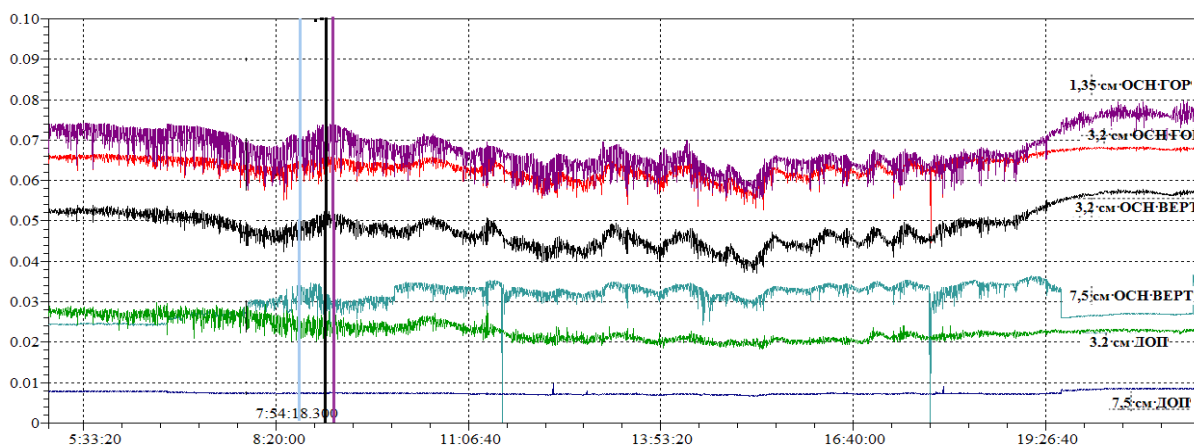


**Рис. 2** Зависимость выходного сигнала трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы при угле места  $30^\circ$  от 18.04.2020 г.



**Рис. 3** Зависимость выходного сигнала трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы при угле места  $30^\circ$  от 16.04.2020 г.

На рисунках 2-4 вертикальными линиями заданы моменты времени максимального прироста выходных сигналов в трех частотных диапазонах. На всех приведенных рисунках 2-4 прослеживается тенденция более раннего по времени наблюдения прироста выходного сигнала на длине волн 7.5 см, чем на длинах волн 3.2 см и 1.35 см. На рисунке 5 можно говорить о различных моментах наблюдения максимального прироста для всех трех длин волн 7.5 см, 3.2 см и 1.35 см.



**Рис. 4** Зависимость выходного сигнала трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы при угле места  $30^\circ$  от 22.04.2020 г.

### Заключение

Наличие сложной временной зависимости, наблюдаемой радиояркой температуры атмосферы с удаленной областью дождя от его интенсивности и расстояния до области дождя в трех частотных диапазонах позволяет сделать вывод о возможности формирования оперативных прогнозов приближения области дождя с оперативным его отслеживанием по данным многочастных микроволновых радиометрических измерений.

### Литература

1. Радиотеплолокация в метеорологии / В.Д. Степаненко, Г.Г.Щукин, Л.П. Бобылев, С.Ю. Матросов. – Л.: Гидрометеиздат, 1987 – 283 с.
2. D. Cimini1, M. Nelson, J. Güldner, and R. Ware Forecast indices from a ground-based microwave radiometer for operational meteorology *Atmos. Meas. Tech.*, 8, 315–333, 2015 doi:10.5194/amt-8-315-2015.
3. Alessandro Battaglia, Pablo Saavedra, Carlos Augusto Morales, Clemens Simmer Understanding three-dimensional effects in polarized observations with the ground-based ADMIRARI radiometer during the CHUVA campaign *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 116, D09204, doi:10.1029/2010JD015335, 2011
4. Федосеева Е.В., Щукин Г.Г., Ростокин И.Н., Ростокина Е.А. Компенсация помех в работе СВЧ радиометрических систем // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы.* – 2014. – №1(13). – С. 50 – 62
5. Ростокин И.Н., Федосеева Е.В. Вопросы построения многочастотной СВЧ радиометрической системы дистанционного зондирования облачной атмосферы с компенсацией фонового излучения // *Радиотехнические и телекоммуникационные системы.* – 2015. – №1(17). – С. 5 – 12.