

## **Исследование корреляционных зависимостей результатов измерений радиотеплового излучения атмосферы трехдиапазонной микроволновой радиометрической системой**

И.Н. Ростокин<sup>1</sup>, Е.В.Федосеева<sup>1</sup>, Г.Г. Щукин<sup>2</sup>, Е.А. Ростоккина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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](mailto:elenafedoseeva@yandex.ru)

<sup>2</sup>Военно-космическая академия им. А.Ф.Можайского, 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13, E-mail: [ggshchukin@mail.ru](mailto:ggshchukin@mail.ru)

*Приведены результаты измерений радиотеплового излучения атмосферы с помощью трехдиапазонной микроволновой радиометрической системы и данные измерений метеостанции метеопараметров приземного слоя атмосферы. Получены корреляционные оценки результатов измерений интенсивности радиотеплового излучения атмосферы с осадками трехдиапазонной микроволновой радиометрической системой с данными по влажности атмосферы и интенсивности осадков, полученных с метеостанции.*

*The results of measurements of the microwave thermal radiation of the atmosphere with the help of Quad-band microwave radiometric system and measurement data of weather station meteorological parameters of the atmosphere. Correlation estimates results of the measurement of the intensity of microwave thermal radiation of the atmosphere with precipitation-band microwave radiometric system with the data on humidity and intensity of precipitation obtained from the weather station.*

### **Введение**

Микроволновая радиометрия является средством дистанционного контроля состояния атмосферы и оценки ее метеопараметров по результатам измерений собственного радиотеплового излучения. На основе данных микроволновых радиометрических измерений в результате решения обратных задач возможна оценка метеопараметров атмосферы, в частности, влагозапаса атмосферы, водозапаса облаков и интенсивности осадков [1-2].

Погрешность измерения интенсивности радиотеплового излучения атмосферы СВЧ радиометрическими системами определяет точность оценки метеорологических параметров. Поэтому разработка способов снижения влияния помехообразующих факторов на результаты СВЧ радиометрических измерений в конечном итоге связана с решением задачи повышения достоверности метеопрогнозов.

В частности, сильным помехообразующим фактором в работе СВЧ радиометрических систем является фоновое излучение, принимаемое через область рассеяния диаграммы направленности антенны. Для снижения влияния данного фактора в микроволновой радиометрической системе должны быть предусмотрены меры исключения составляющей входного сигнала, обусловленной приемом фонового излучения, например, путем выполнения разностных измерений при формировании дополнительного сигнала компенсации [3-5], а расширение функциональных возможностей микроволновых радиометрических систем оценки состояния атмосферы связано с переходом к многочастотному режиму измерения [6].

В данной работе представлены результаты многочастотных радиометрических измерений радиотеплового излучения атмосферы в холодное и теплое время и данные метеопараметров приземного слоя атмосферы и выполнен корреляционный анализ взаимосвязи данных измерений системы с изменением состояния атмосферы с целью оценки эффективности микроволнового радиометрического контроля ее состояния.

## Результаты экспериментальных исследований

Для оценки потенциальных возможностей оценки состояния атмосферы трехдиапазонной СВЧ радиометрической системой с компенсацией влияния фоновых шумов [4] были выполнены суточные измерения радиотеплового излучения атмосферы в теплое и холодное время года в условиях выпадения осадков в трех частотных диапазонах с центральными длинами волн 7,5 см, 3,2 см и 1,35 см. Направление приема радиотеплового излучения соответствовало зенитному углу  $5^\circ$ . Для общей характеристики облачности атмосферы рассматривались данные Муромской межрайонной метеостанции, расположенной на расстоянии 35 км от места базирования СВЧ радиометрического комплекса. Для возможности оперативного отслеживания изменения состояния атмосферы по метеопараметрам ее приземного слоя в области расположения СВЧ радиометрической системы была установлена мобильная автоматическая метеостанция, данные с которой синхронизировались с данными многочастотных СВЧ радиометрических измерений.

### Холодный период года

Результаты многочастотных микроволновых радиометрических измерений радиотеплового излучения зимней облачной атмосферы с указанием бальности и типа облачности, нижней границы и наблюдаемых метеоявлений в период с 18:44:00 22.02.2016 г. до 09:00:00 23.02.2016 г. и метеорологические параметры приземного слоя атмосферы за данный период наблюдений представлены на рис. 1.

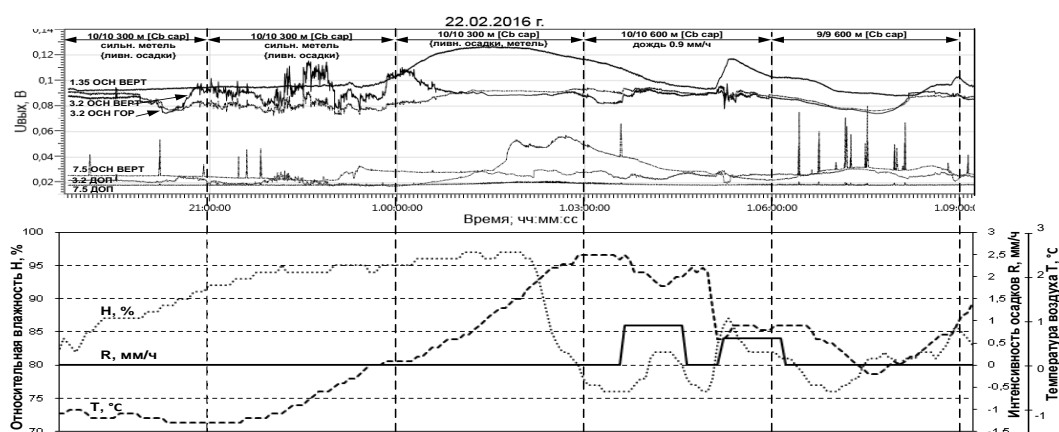
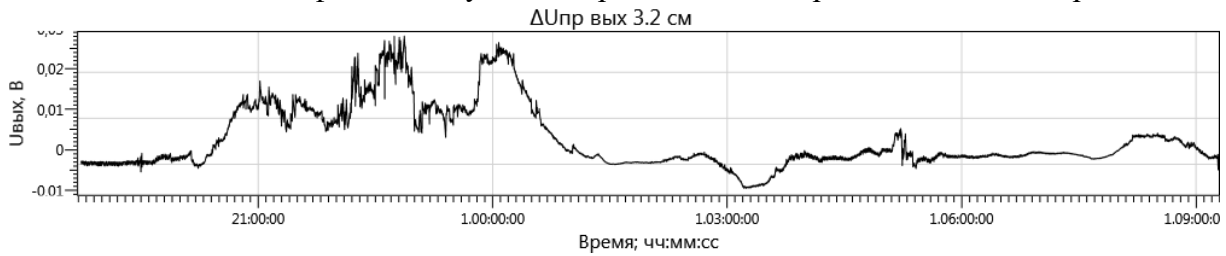


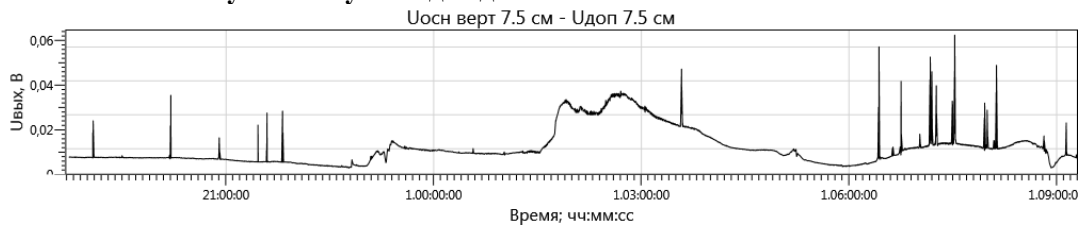
Рис. 1. Результаты первичных измерений радиотеплового излучения кучево-дождевой облачности в условиях выпадения как твердых обводненных осадков (мокрый снег), так и жидких (морозящий дождь) от 22 - 23.02.2016 г. и метеорологические параметры приземного слоя атмосферы по данным автоматизированной метеостанции: H, % - относительная влажность воздуха в %; T, °C - внешняя температура воздуха в °C; R, мм/ч - интенсивность жидких осадков в мм/ч

Наличие приема по дополнительному каналу формирования сигнала компенсации в диапазонах 3.2 см и 7.5 см позволяет исключить влияние изменения подстилающей поверхности на результаты измерений. В данном случае наблюдается прирост сигнала дополнительного канала при повышении температуры атмосферы, обусловленный увеличением влажности слоя снега на поверхности земли, что компенсируется в разностных выходных сигналах.

На рис. 2 и 3 показаны временные зависимости разностных выходных сигналов СВЧ радиометрической системы в диапазоне 3.2 см и 7.5 см при выполнении компенсации влияния фоновых шумов и определении поляризационного контраста.



**Рис. 2. Временные зависимости выходного разностного сигнала СВЧ радиометрической системы в диапазоне 3.2 см, характеризующего поляризационный контраст радиотеплового излучения кучево-дождевой облачности от 22 - 23.02.2016 г**

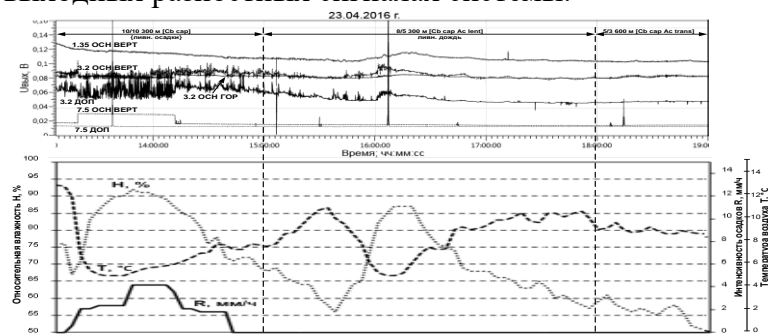


**Рис. 3. Временные зависимости выходного разностного сигнала СВЧ радиометрической системы в диапазоне 7,5 см, характеризующего уровень радиотеплового излучения кучево-дождевой облачности от 22 - 23.02.2016 г при выполнении компенсации влияния фоновых шумов**

#### Теплый период года

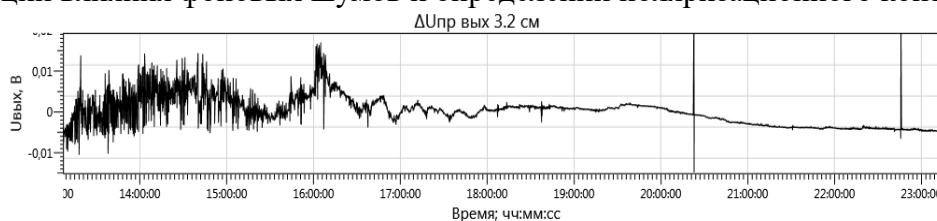
Результаты многочастотных микроволновых радиометрических измерений радиотеплового излучения весенней облачной атмосферы с указанием бальности и типа облачности, нижней границы и наблюдаемых метеоявлений в период с 13:00 до 24:00 23.04.2016 г., приведены на рис. 4.

В теплый период года при выполнении СВЧ радиометрических измерений в условиях выпадения дождя изменение уровня сигнала дополнительного приемного канала обусловлено изменением влажности подстилающей поверхности, что компенсируется в выходных разностных сигналах системы.



**Рис. 4. Результаты первичных измерений радиотеплового излучения облачной атмосферы в условиях выпадения умеренных жидких осадков 23.04.2016 г. с 13:00 до 24:00 по данным многочастотной микроволновой радиометрической системы и метеорологические параметры приземного слоя атмосферы по данным автоматизированной метеостанции: H, % - относительная влажность воздуха в %; T, °C - внешняя температура воздуха в °C; R, мм/ч - интенсивность жидких осадков в мм/ч**

На рис. 5 и 6 показаны временные зависимости разностных выходных сигналов СВЧ радиометрической системы в диапазоне 3.2 см и 7.5 см при выполнении компенсации влияния фоновых шумов и определении поляризационного контраста.



**Рис. 5. Временные зависимости выходного разностного сигнала СВЧ радиометрической системы в диапазоне 3.2 см, характеризующего поляризационный контраст радиотеплового излучения облачной атмосферы в условиях выпадения умеренных жидких осадков 23.04.2016 г**



**Рис. 6. Временные зависимости выходного разностного сигнала СВЧ радиометрической системы в диапазоне 7,5 см, характеризующего уровень радиотеплового излучения облачной атмосферы в условиях выпадения умеренных жидких осадков 23.04.2016 г. при выполнении компенсации влияния фоновых шумов**

#### **Оценка корреляционных взаимосвязей результатов СВЧ радиометрических измерений и данных измерений метеостанции**

Для анализа возможностей оперативной оценки метеопараметров атмосферы по данным СВЧ радиометрических измерений была проведена корреляционная обработка результатов измерений - уровней выходных сигналов трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы и данных измерений метеостанции - влажности и интенсивности осадков в приземном слое атмосферы. По качественному анализу временных зависимостей этих величин, представленных на рис. 1 и 4, была поставлена задача определения коэффициента корреляции между величиной выходного сигнала основного измерительного канала каждого частотного диапазона и разностного выходного сигнала, после выполнения процедуры компенсации, и величиной влажности и интенсивности дождя. Кроме того в задаче определения коэффициента корреляции величины выходного сигнала и интенсивности дождя анализировалась взаимосвязь отдельно для случая интенсивности дождя менее и более 1мм/час.

#### **Результаты корреляционной обработки данных от 22-23.02.2016 г.**

Данные результатов корреляционной обработки от 22-23.02.2016г. представлены в Таблицах 1 и 2, причем оценка корреляции выходных сигналов с интенсивностью осадков выполнена без разделения по интенсивности дождя, так как в этот день интенсивность осадков не превышала 1 мм/ч. Для сравнения в Таблицах 1и 2 приведены результаты оценки корреляции выходных сигналов и метеопараметров при выполнении компенсации влияния фоновых шумов на результаты измерения радиометрической системы и без нее.

#### **Таблица 1. Коэффициенты корреляции выходных сигналов трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы и интенсивности дождя**

Центральная длина волны диапазона, см	Коэффициент корреляции	
	Без компенсации фоновых шумов	С компенсацией фоновых шумов
3,2 (вертикальная поляризация)	0,0537	0,1692
3,2 (горизонтальная поляризация)	0,3487	0,2352
7,5	0,0821	0,0796
1,35	0,0723	-

**Таблица 2. Коэффициенты корреляции выходных сигналов СВЧ радиометрической системы и влажности приземного слоя атмосферы при отсутствии осадков**

Центральная длина волны диапазона, см	Коэффициент корреляции	
	Без компенсации фоновых шумов	С компенсацией фоновых шумов
3,2 (вертикальная поляризация)	0,3513	0,4155
3,2 (горизонтальная поляризация)	0,4162	0,3040
7,5	0,2476	0,2701
1,35	0,2199	-

Выполненный численный анализ показал наличие достаточно сильной корреляционной связи между результатами радиометрических измерений и интенсивностью дождя и влажностью приземного слоя атмосферы, причем величина взаимосвязи сильно варьируется в зависимости от частотного диапазона, а компенсация влияния фоновых шумов в определенных ситуациях позволяет повысить степень взаимосвязи результатов измерений радиометрической системы и данных метеостанции.

**Результаты корреляционной обработки данных от 23.04.2016 г.**

Данные результатов корреляционной обработки результатов измерений от 23.04.2016г. представлены в Таблицах 3 и 4, причем оценка корреляции выходных сигналов с интенсивностью осадков выполнена без разделения по интенсивности дождя и с разделением по интенсивности дождя для величин более и менее 1 мм/ч.

**Таблица 3. Коэффициенты корреляции выходных сигналов трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы и интенсивности дождя**

Центральная длина волны диапазона, см	Коэффициент корреляции		Коэффициент корреляции для интенсивности дождя менее 1 мм/час		Коэффициент корреляции для интенсивности дождя более 1 мм/час	
	Без компенсации фоновых шумов	С компенсацией фоновых шумов	Без компенсации фоновых шумов	С компенсацией фоновых шумов	Без компенсации фоновых шумов	С компенсацией фоновых шумов
3,2 (вертикальная поляризация)	0,2536	0,7673	0,0313	0,2108	0,3233	0,0305
3,2 (горизонтальная поляризация)	0,0569	0,6138	0,0018	0,1409	0,0156	0,1469
7,5	0,039	0,7816	0,0209	0,8595	0,0877	0,3365
1,35	0,4908	-	0,3047	-	0,2978	-

**Таблица 4. Коэффициенты корреляции выходных сигналов СВЧ радиометрической системы и влажности приземного слоя атмосферы при отсутствии осадков**

Центральная длина волны диапазона, см	Коэффициент корреляции	
	Без компенсации фоновых шумов	С компенсацией фоновых шумов
3,2 (вертикальная поляризация)	0,0454	0,3877
3,2 (горизонтальная поляризация)	0,0309	0,3766
7,5	0,0062	0,3345
1,35	0,6314	-

Полученные численные результаты показали наличие сильной корреляционной связи между результатами радиометрических измерений и данными по интенсивности дождя и влажности приземного слоя атмосферы. Проведение разностных измерений при выполнении компенсации влияния фоновых шумов показало увеличение степени корреляции, особенно для канала с центральной длиной волны 7.5см. Наиболее сильная корреляция результатов измерений СВЧ радиометрической системы и интенсивности осадков наблюдается для канала с центральной длиной волны 7.5см, а корреляция результатов измерений и влажности для канала с центральной длиной волны 1.35см.

### **Заключение**

Полученные корреляционные оценки данных измерений интенсивности радиотеплового излучения атмосферы трехдиапазонной СВЧ радиометрической системой с данными по интенсивности осадков и влажности приземного слоя атмосферы, получаемых с метеостанции, позволили сделать вывод о возможности оперативной оценки состояния атмосферы по данным многочастотных микроволновых радиометрических измерений.

Степень корреляционной зависимости для каждого частотного канала свой, что определяет широкие возможности по оценке состояния атмосферы. Для приведенных данных выходной сигнал радиометрической системы в диапазоне 1.35 см имеет сильную корреляцию с влажностью атмосферы, на частоте 3.2 см имеет место корреляция с влажностью и интенсивностью дождя, а также существенно влияние выпадение твердых осадков в виде снега с наличием поляризационного контраста в результатах измерений, а на частоте 7.5 см выходной сигнал в основном зависит от интенсивности осадков. Выполнение компенсации влияния фоновых шумов на результаты радиометрических измерений позволяет оперативно выполнять их корректировку при изменяющихся условиях, что приводит к повышению корреляции между результатами измерений и метеоданными приземного слоя атмосферы.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований показали перспективность применения многодиапазонных микроволновых радиометрических систем с компенсацией влияния фоновых шумов для решения задач оперативной оценки состояния атмосферы.

### **Литература**

1. Щукин Г.Г., Степаненко В.Д., Снегуров А.В. Перспективные направления радиолокационных наблюдений за атмосферой // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И.Воейкова. - 2010. – № 561. – С. 223 - 241.
2. Некос А.Н., Некос В.Е. Щукин Г.Г. Дистанционные методы исследований природных объектов: моногр. – СПб.: РГГМУ, 2009 – 319 с.

3. 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.
4. Ростокин И.Н., Федосеева Е.В., Щукин Г.Г. Сверхвысокочастотная радиометрическая система с внешним тестовым шумовым сигналом. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Выпуск 653. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016, С. 204 – 209.
5. Федосеева Е.В., Ростокин И.Н., Щукин Г.Г. Оценка условий приема в двухканальной СВЧ радиометрической системе по внешнему тестовому сигналу. // Известия высших учебных заведений. Физика. Том. 59, №12/3. – Томск, 2016 С. 116 – 120.
6. 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.