

**Экспериментальные исследования пространственно-временной изменчивости радиотеплового излучения облачной атмосферы в период развития опасных метеоявлений**

И.Н. Ростокин, Е.В. Федосеева, Е.А. Ростокина, А.С. Круглов

Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета, 602264, г. Муром, Владимирской обл., ул. Орловская 23, e-mail: [arostokina@yandex.ru](mailto:arostokina@yandex.ru)

*Приведены результаты комплексных экспериментальных исследований пространственно-временной изменчивости радиотеплового излучения облачной атмосферы, выполненные с помощью разработанного микроволнового радиометрического метеокомплекса, в период формирования опасных метеорологических явлений, связанных с развитием мощных конвективных облаков, гроз, ливней, а также в период прохождения мощных атмосферных фронтов. Проведены корреляционные оценки результатов измерений интенсивности радиотеплового излучения облачной атмосферы с осадками с данными по интенсивности осадков, полученных с помощью автоматизированной метеостанции.*

*The results of complex pilot studies of spatio-temporal variability of radio heat radiation of the cloudy atmosphere executed by means of the developed microwave radiometric meteorocomplex during forming of the dangerous meteorological phenomena connected with development of powerful convective clouds, thunder-storms, heavy rains and also during passing of powerful atmospheric fronts are given. Correlation estimates of results of measurements of intensity of radio heat radiation of the cloudy atmosphere with rainfall data on intensity of rainfall received by means of the automated meteorological station are carried out.*

**Введение**

Первичной измеряемой величиной при микроволновом радиометрическом зондировании атмосферы является радиояркостьная температура принятого излучения, от погрешности измерения которой зависит точность решения обратных задач определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков, а также достоверность выполняемых на их основе сверхкраткосрочных (в пределах от 0 до 6 ч от срока наблюдения) прогнозов развития опасных погодных явлений или наукастинга [1].

Интенсивность собственного радиотеплового излучения атмосферы имеет определенную частотную зависимость, как от параметров облачного слоя, так и от содержания в атмосфере водяного пара, капель воды и вертикальных профилей распределения осадков. Поэтому, для повышения точности оценок характеристик облачности, наблюдения необходимо выполнять в нескольких частотных диапазонах, что дает возможность разделить вклады облачности, водяного пара и кислорода в измеряемые величины – радиояркостьные температуры [2].

Различия в пространственных характеристиках, водности, температуре и фазовом составе облаков отражаются в величине их радиояркостьных контрастов на фоне ясного неба. Методы микроволнового радиометрического контроля за кучевыми облаками и их эволюцией могут способствовать оперативному обнаружению таких опасных (ОЯ) и неблагоприятных (НГЯ) гидрометеорологических явлений, как гроза, шквал, смерч, ливневые дожди, град, ледяной дождь, метель и т.д., приносящих большой ущерб различным отраслям народного хозяйства.

Кучево-дождевые облака Сб являются пространственно ограниченными средами и представляют собой динамичные неоднородные системы со сложной микроструктурой, при зондировании которых с поверхности Земли в главный лепесток диаграммы

направленности антенны попадают не только мелкокапельные переохлажденные зоны облака, но и части слоя дождя, а также фоновое излучение, приходящее по боковым лепесткам диаграммы направленности [3].

Решение данной задачи заключается в комплексном использовании многоволнового микроволнового радиометрического метода зондирования конвективной облачности, на разных стадиях развития, с пространственным и поляризационным разрешением радиотепловых сигналов с применением метода компенсации влияния фонового излучения.

### **Опасные метеорологические явления, связанные с эволюцией конвективной облачности**

Процесс развития (эволюции) конвективной облачности (Cb - кучево-дождевых облаков) может сопровождаться возникновением опасных метеорологических явлений (ОЯ), к которым в соответствии с руководящим документом Росгидромета РД 52.27.724-2009 принято относить природные процессы и явления, возникающие в атмосфере и/или у поверхности Земли, которые по своей интенсивности (силе), масштабу распространения и продолжительности оказывают или могут оказать поражающее воздействие на людей, сельскохозяйственных животных и растения, объекты экономики и окружающую среду.

Метеорологические явления оцениваются как ОЯ при достижении ими определенных значений метеорологических величин – критерии определения ОЯ. Типовой перечень ОЯ связанных с формированием конвективной облачности, составленный с учетом рекомендаций Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) представлен в таблице 1.

**Таблица 1. Характеристики и критерии ОЯ**

Наименование ОЯ	Характеристики и критерии ОЯ
1. Сильный ливень	Сильный ливневый дождь с количеством выпавших осадков не менее 30 мм за период не более 1 ч.
2. Очень сильный дождь (очень сильный дождь со снегом, очень сильный мокрый снег, очень сильный снег с дождем)	Выпавший дождь, ливневый дождь, дождь со снегом, мокрый снег с количеством не менее 50 мм, в ливнеопасных (селеопасных) горных районах – не менее 30 мм за период времени не более 12 ч.
3. Очень сильный снег	Выпавший снег, ливневый снег с количеством не менее 20 мм за период времени не более 12 ч
4. Продолжительный сильный дождь	Дождь с короткими перерывами (не более 1 ч) с количеством осадков не менее 100 мм (в ливнеопасных районах с количеством осадков не менее 60 мм) за период времени более 12 ч, но менее 48 ч, или 120 мм за период времени более 2 сут.
5. Крупный град	Град диаметром 20 мм и более.

### **Техническое обеспечение экспериментальных исследований**

В процессе проведения экспериментальных исследований облачной атмосферы были задействованы следующие измерительные средства наблюдения и контроля за состоянием атмосферы:

- многочастотный микроволновый радиометрический измерительный комплекс, расположенный на позиции с координатами (широта 55°55'N, долгота 42°05'E, высота над уровнем моря 119 м.);

- доплеровский метеолокатор ДМРЛ С, расположенный на позиции Нижний Новгород с координатами (широта: 56.294°N, долгота: 43.978°E, высота над уровнем моря 135 м.);

- автоматизированная метеостанция, расположенная на позиции с координатами (широта 55°55'N, долгота 42°05'E, высота над уровнем моря 119 м.);

- межрайонная метеостанция г. Муром, расположенная на позиции с координатами (широта 55.60°N, долгота 42.03°E, высота над уровнем моря 115 м.).

На рис. 1 представлена схема района проведения экспериментальных исследований, с указанием координат местоположения основных средств наблюдения и контроля, а также расстояний между ними.



Рис. 1. Схема района проведения экспериментальных исследований.

Многочастотная микроволновая радиометрическая система принимает радиотепловое излучение облачной атмосферы на трех длинах волн (7.5 см, 3.2 см, 1.35 см) на двух ортогональных поляризациях на одну осесимметричную зеркальную антенну, диаметром 2400 мм с частотным разделением в двухмодовом облучателе при организации дополнительного приемного канала в каждом диапазоне, на выходе которых формируется сигнал компенсации фоновых шумов. Флуктуационный порог чувствительности, при постоянной интегрирования  $\tau = 1$  с, составляет 0.03 – 0.05 К.

Доплеровский поляризационный метеорологический радиолокатор ДМРЛ-С использовался для получения оперативной метеорологической информации об облачности, осадках и связанных с ними явлениях погоды, в диапазоне частот 5.60 - 5.65 ГГц (С - диапазон), при дальности обнаружения не менее 250 км, и высоте обнаружения, не менее 20 км [4].

В эксперименте использовались, находящиеся в свободном доступе, радиолокационные карты высоты верхней границы облачности ( $H_{ВГО}$ ), позволяющие судить о характере облачности и степени опасности конвективной облачности (безопасность полетов авиации), обновляемые каждые 10 мин.

Автоматизированная метеостанция, предназначена для сбора, передачи и отображения основных приземных метеорологических параметров на позиции многочастотной микроволновой радиометрической системы, таких как, внутренняя и внешняя температура воздуха, внутренняя и внешняя влажность, скорость и направление ветра, атмосферное давление, интенсивность атмосферных осадков. Измеренные данные с наружных датчиков передаются на управляющий блок метеостанции по беспроводной технологии на частоте 868 МГц и далее на персональный компьютер.

Привлечение метеоданных получаемых на межрайонной гидрометеостанции г. Мурома, позволило сопоставить аналогичные данные автоматизированной метеостанции с регулярными наблюдениями на гидрометеорологических станциях, а также дополнить экспериментальные данные характеристиками облачности: количеством облаков (общая бальность облачности, бальность нижней облачности), форма облаков, высота нижней границы облаков.

### **Результаты экспериментальных исследований**

Для оценки потенциальных возможностей контроля состояния атмосферы в задачах прогнозирования развития опасных явлений трехдиапазонной микроволновой радиометрической системой с компенсацией влияния фоновых шумов [5, 6] 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°. Для общей характеристики облачности атмосферы рассматривались данные Муромской межрайонной метеостанции, расположенной на расстоянии 6 км от места базирования микроволнового радиометрического измерительного комплекса. Для возможности оперативного отслеживания изменения состояния атмосферы по метеопараметрам ее приземного слоя в области расположения микроволновой радиометрической системы была установлена мобильная автоматическая метеостанция, данные с которой синхронизировались с данными многочастотных микроволновых радиометрических измерений.

### **Результаты корреляционной обработки от 30.07.2017 г.**

Данные результатов корреляционной обработки от 30.07.2017 г. представлены в Таблицах 1, 3 и 5, причем оценка корреляции выходных сигналов с интенсивностью осадков выполнена как без разделения по интенсивности дождя, так и с разделением по интенсивности осадков меньше и больше 1 мм/ч. Для сравнения в Таблицах 2, 4 и 6 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 от 30.07.2017 г. без разделения по интенсивности осадков.**

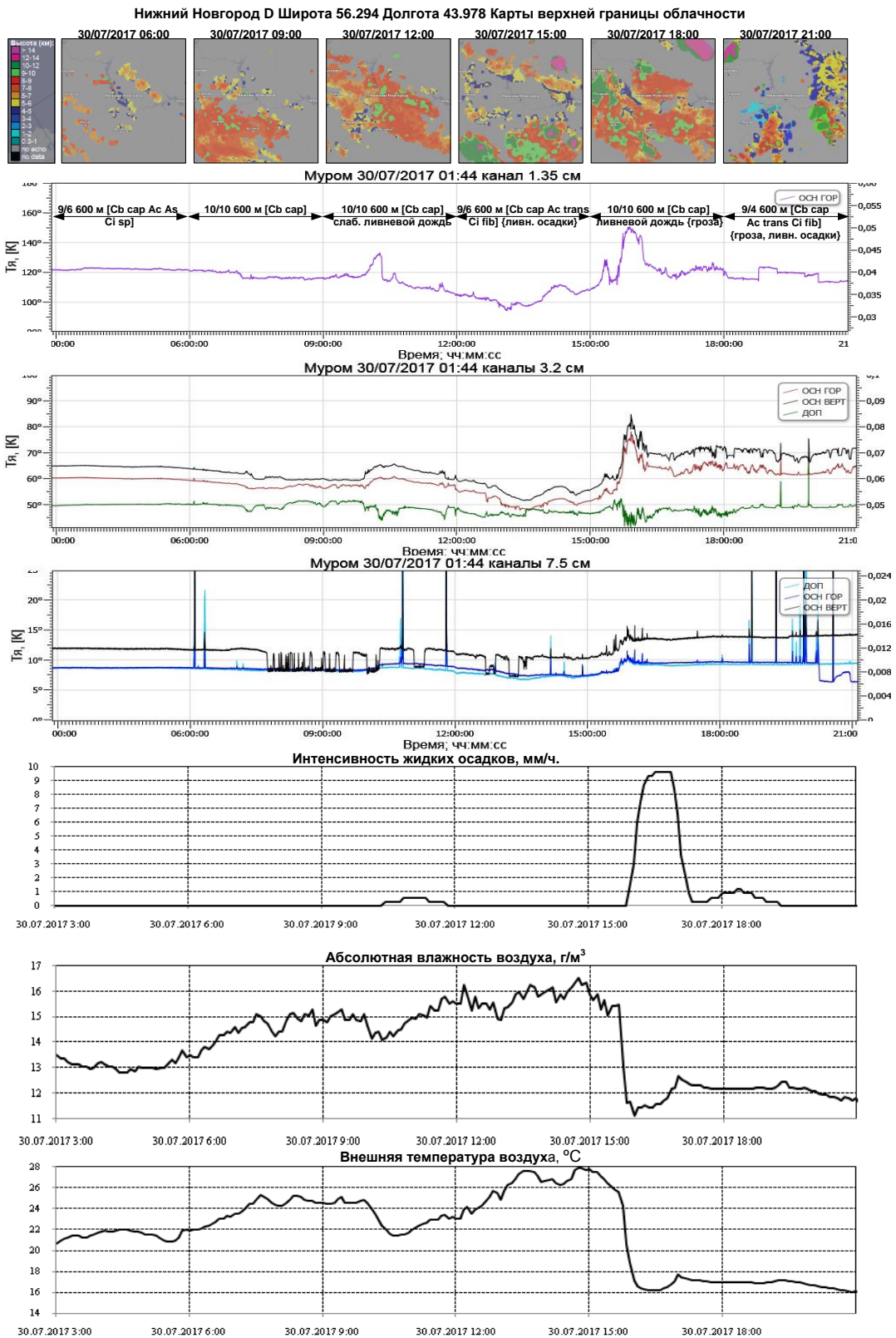
3.2 ОСН ГОР	7.5 ДОП	3.2 ОСН ВЕРТ	7.5 ОСН ГОР	3.2 ДОП	7.5 ОСН ВЕРТ	1.35 ОСН ГОР
0,151437	-0,07563	0,169993	-0,05103	0,030857	-0,02572	-0,04588

**Таблица 2. Коэффициенты корреляции от 30.07.2017 г. при разностных значениях без разделения по интенсивности с компенсацией фоновых шумов.**

3.2 ОСН ГОР-3.2 ДОП	3.2 ОСН ВЕРТ-3.2 ДОП	7.5 ОСН ГОР-7.5 ДОП
0,155254	0,268773	0,09484

**Таблица 3. Коэффициенты корреляции от 30.07.2017 г. при интенсивности осадков меньше 1 мм/ч.**

3.2 ОСН ГОР	7.5 ДОП	3.2 ОСН ВЕРТ	7.5 ОСН ГОР	3.2 ДОП	7.5 ОСН ВЕРТ	1.35 ОСН ГОР
0,111588	-0,11441	0,121862	-0,11066	0,052322	-0,07788	-0,14803



**Рис.2. Процесс развития опасного явления в виде сильного ливня с грозой от 30.07.2017 г.**

**Таблица 4. Коэффициенты корреляции от 30.07.2017 г. при разностных значениях при интенсивности осадков меньше 1 мм/ч с компенсацией фоновых шумов.**

3.2 ОСН ГОР-3.2 ДОП	3.2 ОСН ВЕРТ-3.2 ДОП	7.5 ОСН ГОР-7.5 ДОП
0,092036	0,161404	0,098943

**Таблица 5. Коэффициенты корреляции от 30.07.2017 г. при интенсивности осадков больше 1 мм/ч.**

3.2 ОСН ГОР	7.5 ДОП	3.2 ОСН ВЕРТ	7.5 ОСН ГОР	3.2 ДОП	7.5 ОСН ВЕРТ	1.35 ОСН ГОР
0,117182	-0,0927	0,293757	0,245278	-0,26946	-0,18416	-0,48496

**Таблица 6. Коэффициенты корреляции от 30.07.2017 г. при разностных значениях при интенсивности осадков больше 1 мм/ч с компенсацией фоновых шумов.**

3.2 ОСН ГОР-3.2 ДОП	3.2 ОСН ВЕРТ-3.2 ДОП	7.5 ОСН ГОР-7.5 ДОП
0,23009	0,354569	0,216924

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 7.5 см. Наиболее сильная корреляция результатов измерений микроволновой радиометрической системы и интенсивности осадков наблюдается для канала с центральной длиной волны 7.5 см, а корреляция результатов измерений и влажности для канала с центральной длиной волны 1.35 см.

### **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.

Для представленных 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.

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

*Работа выполнена при поддержке РФФИ гранта №14-02-97510 р\_центр\_а.*

### **Литература**

1. Радиотеплокация в метеорологии / В.Д. Степаненко, Г.Г. Щукин, Л.П. Бобылев, С.Ю. Матросов. - Л.: Гидрометеиздат, 1987. - 283 с.

2. 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.
3. Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Применение метода СВЧ - радиометрии в задачах регионального сверхсрочного прогноза опасных явлений погоды и наукастинга. // Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике [Электронный ресурс]: Всероссийские радиофизические научные чтения-конференции памяти Н.А. Арманда. Сб. докладов III Всероссийской научной конференции (Муром, 28 июня – 1 июля 2010 г.). – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2010. –306 с. - С 137 - 141.
4. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике. М.: Росгидромет, 2014.
5. 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.
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.