

## **Направления работы лаборатории «Радиофизические исследования природных сред» в Муромском институте**

Г.Г. Щукин<sup>1,2</sup>, И.Н. Ростокин<sup>1</sup>, Е.В. Федосеева<sup>1</sup>, Е.А. Ростокина<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 имени А.Ф. Можайского, 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13  
E-mail: [gshchukin@mail.ru](mailto:gshchukin@mail.ru)

*В докладе представлено современное состояние и перспективы развития радиофизических исследований атмосферы в Муромском институте, базирующиеся на долговременном опыте проектных разработок микроволновых радиометрических систем и натурных измерений. Современный этап развития направления микроволновых исследований характеризуется реализацией современных принципов приема и обработки сигналов и оригинальных подходов к усовершенствованию микроволновых радиометрических систем, обусловленных принципом их функционирования - приема широкополосного шумового сигнала с необходимостью реализации его пространственной селекции.*

*Ключевые слова: дистанционное зондирование атмосферы; двухмодовый облучатель; антенная система; напряженность электрического поля атмосферы.*

## **Directions of the laboratory «Radiophysical Investigations of Natural Environments» at the Murom Institute**

G.G. Shchukin<sup>1,2</sup>, I.N. Rostokin<sup>1</sup>, E.V. Fedoseeva<sup>1</sup>, E. A. Rostokina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Murom Institute (branch) of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "A.G. and N.G. Stoletovs Vladimir State University ", 602264, Murom, 23, Orlovskaya str.

<sup>2</sup> Academy of Space and Military Sciences. A.F. Mozhaisky, 191198, St.-Petersburg, Zhdanovskaya, 13

*The report presents the current state and prospects for the development of radiophysical studies of the atmosphere at the Murom Institute, based on long-term experience in the design development of microwave radiometric systems and in-situ measurements. The modern stage of development of the direction of microwave studies is characterized by the implementation of modern principles of signal reception and processing and original approaches to the improvement of microwave radiometric systems, due to the principle of their functioning - the reception of a broadband noise signal with the need to implement its spatial selection.*

*Key words: remote sensing of the atmosphere; two-mode irradiator; antenna system; electric field strength of the atmosphere.*

### **Введение**

В 2019 году в Решение Всероссийских открытых Армандовских чтений, проводимых Научным Советом по распространению радиоволн (НС РРВ) ОФН РАН в Муромском институте ВлГУ, по предложению Председателя Совета, д.ф.-м.н., профессора Лукина Д.С. и Председателя программного комитета чтений, д.ф.-м.н., профессора Щукина Г.Г. было внесено положение о целесообразности создания на базе

МИ ВлГУ комплексной региональной системы сверхкраткосрочного прогнозирования развития неблагоприятных и опасных атмосферных метеоявлений.

Требования, предъявляемые к современным системам дистанционного зондирования атмосферы, обусловлены необходимостью обеспечения всепогодного мониторинга при повышении точности решения обратных задач оценки метеопараметров атмосферы. Это, в свою очередь, ставит задачи снижения погрешности измерений, введения интеллектуальной составляющей комплексного анализа большого массива данных и формирования прогнозов развития состояния атмосферы [1-5]. Создание таких систем требует высокого уровня квалификации специалистов, накопленного опыта проведения соответствующих работ, а также определённого аппаратного и интеллектуального задела, как базы для создания аппаратных комплексов и систем обработки и представления информации.

Включение такого пункта в Решение обосновывалось имеющимся в Муромском институте опытом проведения радиометеорологических исследований и заложенной к тому моменту базой для создания необходимых современных интеллектуальных измерительных средств.

В соответствии с этим решением в Муромском институте была создана научно-исследовательская лаборатория «Радиофизические исследования природных сред», научным руководителем которой стал профессор Щукин Г.Г. [6].

Разработанная комплексная научная программа развития лаборатории, создания новых аппаратных средств, методик оценок и прогнозирования получила поддержку со стороны Российского научного фонда в виде предоставления финансирования на проведение исследований по теме «Разработка и реализация нового цифрового метода повышения точности прогноза опасных атмосферных явлений по данным многочастотных микроволновых радиометрических измерений с использованием технологий радиофотоники и искусственных нейронных сетей». И к настоящему моменту благодаря такой поддержке лаборатория имеет обновлённую измерительную базу, обеспечивающую решение поставленных задач.

В докладе рассматриваются основные направления исследований в лаборатории «Радиофизические исследования природных сред» Муромского института ВлГУ.

### **Микроволновые радиометрические исследования атмосферы**

Микроволновая радиометрия является средством пассивного дистанционного зондирования атмосферы и оценки ее метеопараметров по результатам измерений собственного радиотеплового излучения атмосферы, являющегося результатом теплового движения заряженных частиц.

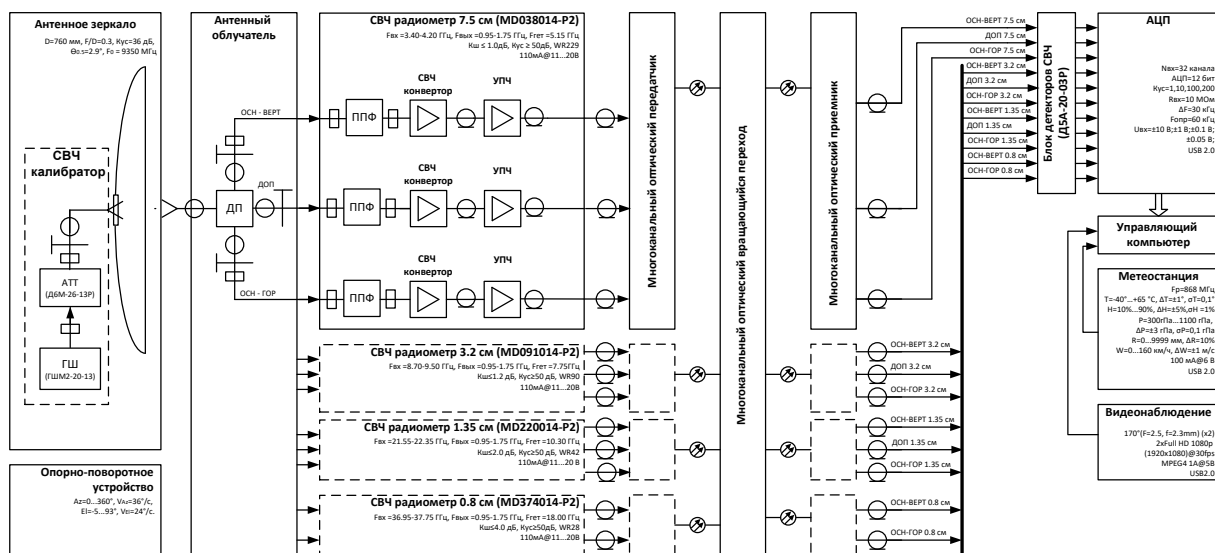
Наибольший вклад в формирование радиотеплового излучения облачной атмосферы вносят кислород, водяной пар, жидкокапельные облака и осадки. На основе данных микроволновых радиометрических измерений в результате решения обратных задач оценивают метеопараметры атмосферы, в частности, влагозапас атмосферы и водозапас облаков, а также интенсивность осадков, значительные вариации которых могут являться предикторами возникновения опасных метеорологических явлений.

Информация о радиоярких температурах атмосферы используется для оценки параметров облачности, вариаций полной массы водяного пара в атмосфере, для анализа синоптической обстановки, локализации зон выпадения осадков, а также для решения ряда других научно-прикладных задач.

Вариант структурной схемы многочастотной микроволновой радиометрической системы дистанционного зондирования атмосферы, с использованием элементов радиофотоники в тракте передачи промежуточной частоты, представлен на рис. 1.

Реализация в антенне многочастотной микроволновой радиометрической системы трехканального приема по двум основным измерительным на вертикальной (V) и горизонтальной (H) поляризациях и дополнительному каналу ( $\Delta$ ) на общее зеркало антенны определяет условия компенсации влияния фоновых шумов на результаты измерений с возможностью оценки поляризационных контрастов.

Включение в состав микроволновых систем дистанционного зондирования элементов радиофоники позволило снизить потери сигнала при передаче его к оконечным устройствам обработки, что в целом способствует повышению чувствительности систем.



**Рис. 1. Структурная схема радиофотонной многочастотной микроволновой радиометрической системы**

Основные технические характеристики радиофотонной многочастотной микроволновой радиометрической системы приведены в таблице 1, вид – на рис. 2..

**Таблица 1.**

Параметр	Значение			
1. Длина волны, $\lambda$ см.	7.5	3.2	1.35	0.8
2. Радиометрическая чувствительность $\Delta T$ , при постоянном времени интегрирования $\tau = 1$ с.	0.03	0.04	0.05	0.07
3. Полоса пропускания, $\Delta f$ МГц.	800	1000	800	800
4. Шумовая температура приемника, $T_{ш \text{ пр}}$ °К	13	13	101	438
5. Коэффициент усиления приемника, G дБ.	60	60	53	50
6. Ширина диаграммы направленности по уровню -3 дБ, при (D = 2400 мм, F = 900 мм) - стационарный вариант	2.13	0.76	0.38	0.2
7. Коэффициент усиления антенны, $K_{УС}$ дБ.	39	48	54	60
8. Поляризация	H, V, $\Delta$	H, V, $\Delta$	H, V, $\Delta$	H, V

Таким образом, наземные многочастотные микроволновые радиометрические системы дистанционного зондирования атмосферы и измерительно-прогностические комплексы обнаружения и отслеживания развития опасных атмосферных явлений логически должны развиваться в направлении расширения рабочего диапазона систем в область длинных волн, разработкой методик оценки пространственно-структурных характеристик области осадков с переходом к численному моделированию в оперативном режиме оценки интенсивности осадков с применением нейронных сетей и

адаптивным регулированием чувствительности при включении в состав систем устройств радиофотоники.



Рис. 2. Радиофизический комплекс исследования параметров атмосферы

### Исследование основных метеорологических параметров приземного слоя атмосферы

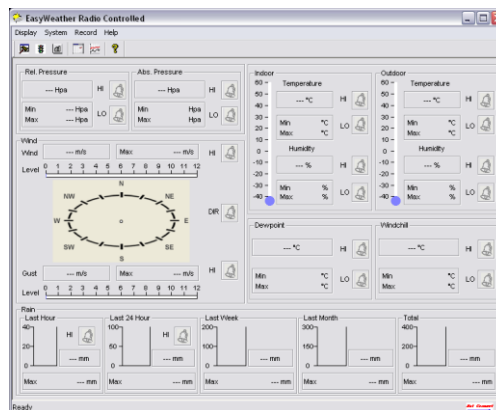
Цифровая метеостанция (рис. 3), предназначенная для сбора и отображения основных метеорологических параметров на позиции многочастотной микроволновой радиометрической системы: внутренней и внешней температуры воздуха, внутренней и внешней влажности, количества осадков, скорости и направления ветра, атмосферного давления, измеренные данные наружных датчиков передаются на метеостанцию по беспроводной технологии на частоте 868 МГц; на основе использования внутреннего датчика давления воздуха и регистрации изменения давления, рассчитывается прогноз погоды на следующие сутки; диапазон измеряемых параметров: внутренняя температура 0...+50 °С, наружная температура -40...+65 °С, внутренняя влажность воздуха 10...90 %, влажность наружного воздуха 10...90 %, атмосферное давление 300...1100 гПа, разрешение атмосферного давления 0.1 гПа, скорость ветра 0...160 км/ч, уровень осадков 0...9999 мм, разрешение 1 мм, разрешение по влажности 1 %, разрешение по температуре 0.1 °С.



а)

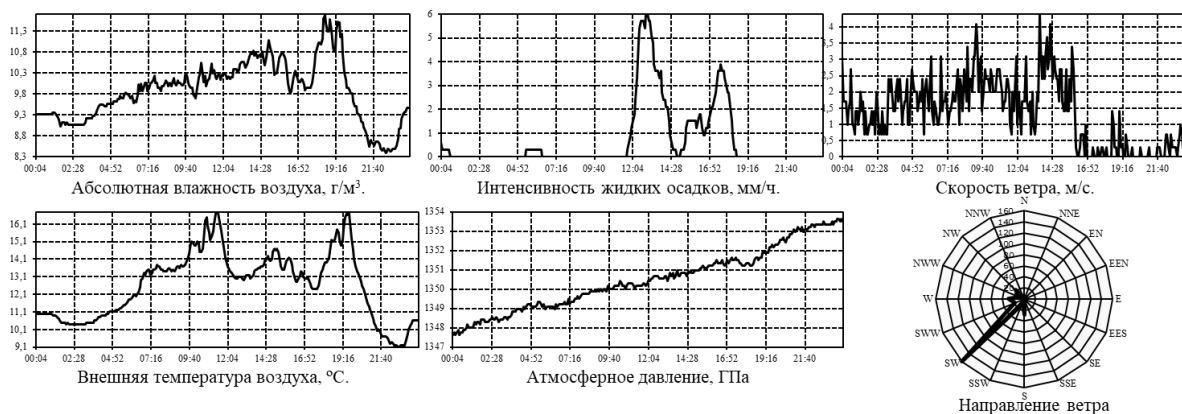


б)



в)

Рис. 3. Цифровая метеостанция: а) - внешние датчики, б) - контроллер управления, в) - программа сбора и отображения результатов



**Рис. 4. Основные метеорологические параметры приземного слоя атмосферы**

### **Наблюдения за состоянием небосвода в видимом диапазоне длин волн**

Система видеонаблюдения (рис. 5), предназначена для визуального контроля состояния атмосферы в осевом направлении визирования микроволновой радиометрической системы, а также оперативного визуального контроля работоспособности основных электромеханических приводов микроволновой радиометрической системы, система состоит из двух камер высокой четкости и производит непрерывную запись видео, аудио и фото материалов в реальном времени на управляющий компьютер, угол обзора объектива камер 170° (F=2.5, f=2.3mm) (x2), качество видео 2x Full HD 1080p (1920x1080) @ 30fps, 2x HD 720p (1280x720) @ 30fps, формат записи MPEG4, коммутация с компьютером HDMI или USB 2.0.



**Рис. 5. Информация с камер видеонаблюдения**

### **Исследование напряженности электрического поля атмосферы**

Электрическое поле Земли, является неотъемлемым фактором в общей системе геофизических полей. Напряженность электрического поля, оцениваемая на уровне поверхности Земли, зависит от множества различных факторов как природного, так и техногенного характера. С ним связано протекание многих природных явлений, как в толще атмосферы, так и непосредственно у поверхности Земли [7].

Данные о напряженности электрического поля Земли востребованы как в исследовательских целях, так и при решении задач раннего предупреждения об опасности возникновения грозных очагов [8].

Анализ данных об электрическом поле Земли позволяет предсказывать землетрясения, опасные атмосферные явления, определять наличие в атмосфере радона и аэрозолей [8]. В вариациях поля находят отражение приливные эффекты, солнечная активность, процессы, протекающие в глобальной электрической цепи.



**Рис. 6. Измеритель напряженности электрического поля атмосферы**

Датчик напряженности электростатического поля (рис. 6) предназначен для измерений вертикальной составляющей напряженности электрического поля атмосферы как в автономном режиме, так и в составе информационно-измерительных систем.

Датчик напряженности электростатического поля устанавливается на треноге и включает в себя электростатический генератор, усилители, контроллер, оборудование сопряжения с линией связи, заключенные в единый корпус.

Основные технические характеристики измерителя приведены в таблице 2.

**Таблица 2.**

Параметр	Значение
1. Частота измерений, Гц	10
2. Диапазон измерений напряженности электрического поля, В/м	-100000 – 100000
3. Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений напряженности электрического поля (E), В/м	$\pm(20+0,03 \cdot  E )$
4. Стандарт передачи данных	RS-485
5. Скорость передачи данных, бит/с	9600
6. Напряжение питания от источника постоянного тока, В	8,0 – 15,0
7. Потребляемая электрическая мощность ДПП, не более, В·А	6

### **Выводы**

Работы в рамках проекта РНФ позволили провести материально-техническую и методическую модернизацию комплекса, обеспечивающую решение задач повышения точности, чувствительности, информативности измерений, а также реализации непрерывного режима измерений с формированием базы результатов.

Выполненные исследования позволили определить следующие основные направления развития микроволновой радиометрии в научно-исследовательской лаборатории Муромского института:

- непрерывное зондирование атмосферы при больших зенитных углах с формированием архива результатов измерений для решения задачи оперативной оценки пространственно-структурной однородности атмосферы;
- микроволновое исследование фронтальных атмосферных процессов с формированием информационной базы и развитием системы оценки состояния атмосферы на основе введения нейронной сети.

При решении задачи снижения потерь входных сигналов в СВЧ радиометрической системе рассмотрено постепенное введение в её состав устройств радиофотоники [30].

Таким образом, задачи микроволновых радиометрических исследований атмосферы в научно-исследовательской лаборатории Муромского института состоят в следующем:

- включение радиофотоники в состав системы на уровне формирования и обработки выходных сигналов;

- введение в состав системы нейронной сети с решением задач интеллектуального управления временем накопления выходного сигнала, оперативной оценки наличия условий формирования опасных атмосферных явлений в исследуемой области атмосферы, формирования прогнозов развития структурных изменений в атмосфере.

Реализация в многодиапазонной СВЧ радиометрической системе компенсации влияния фоновых шумов позволила перейти к наклонному зондированию приземного слоя атмосферы при больших углах визирования и решить аппаратные задачи дистанционного зондирования при прогнозировании опасных атмосферных явлений.

Цифровая обработка выходных сигналов СВЧ радиометрической системы расширила возможности как повышения чувствительности системы, так и расширения вариативности алгоритмов оценки результатов измерений для решения задач прогнозирования при встраивании нейронной сети в состав системы.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00378, <https://rscf.ru/project/21-19-00378/>.*

### **Литература**

1. Степаненко В.Д., Щукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1987.
2. Кутуза Б.Г., Яковлев О.И., Данилычев М.В. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. Монография. М., Ленанд, 2016.
3. Кадыгров Е.Н. Микроволновая радиометрия термической стратификации атмосферы. Москва, 2020.
4. Cimini D., Nelson M., Guldner J., Ware R. // Atmos.Meas.Tech., 2015, vol. 8, pp. 315-333.
5. Westwater E.R., Crewell S., Matzler C. // IEEE Geos. and Rem. Sens. Soc. Newsletter, 2005, pp.16-3
6. Щукин Г.Г., Булкин В.В., Федосеева Е.В., Ростокин И.Н. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2022, №4. С. 5.
7. Коровин Е.А., Ефимов В.А., Щукин Г.Г., Денисенков Д.А., Чернышев С.В. Компенсация контактной разности потенциалов в электростатических флюксометрах. // В сборнике: VII Всероссийские Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. материалы Всероссийской научной конференции. 2017. С. 416-422.
8. Коровин Е.А., Ефимов В.А., Денисенков Д.А., Крисанова О.А., Рудь А.А., Чернышев С.В. Датчик напряженности электрического поля земли. // В сборнике: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред. материалы VII Всероссийской научной конференции. Муромский институт (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых». 2016. С. 254-259.