

Современное состояние и перспективы развития комплексных радиофизических методов исследования параметров атмосферы в научно-исследовательской лаборатории Муромского института ВлГУ

И.Н. Ростокин¹, Е.В. Федосеева¹, Г.Г. Щукин^{1,2}, Е.А. Ростокина¹, И.Ю. Холодов¹, М.А. Матюков¹.

¹Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых», 602264, г. Муром, Владимирской обл., ул. Орловская 23, E-mail: rostockin.ilya@yandex.ru

²Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13, E-mail: ggshchukin@mail.ru

В докладе представлено современное состояние и перспективы развития радиофизических исследований атмосферы, проводимых в научно-исследовательской лаборатории Муромского института, 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: радиофизические методы исследования природных сред; дистанционное зондирование атмосферы; многочастотная микроволновая радиометрическая система; двухмодовый облучатель; антенная система; напряженность электрического поля атмосферы, пассивно-активная метеорологическая радиолокация, метеорологические лидарные системы.

Current state and perspectives of development of complex radiophysical methods for the study of atmospheric parameters in the research laboratory of Murom Institute of VISU

I.N. Rostokin¹, E.V. Fedoseeva¹, G.G. Shchukin^{1,2}, E.A. Rostokina¹, I.Yu. Kholodov¹, M.A. Matyukov¹, N.V. Kokurov¹.

¹ 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.

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

The report presents the current state and prospects of development of radiophysical studies of the atmosphere, conducted in the research laboratory of Murom Institute, based on long-term experience of design developments of microwave radiometric systems and field measurements. The current stage of development of microwave research 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 operation - reception of broadband noise signal with the need to implement its spatial selection.

Key words: radiophysical methods of natural environments research; remote sensing of the atmosphere; multi-frequency microwave radiometric system; dual-mode irradiator; antenna system; atmospheric electric field strength, passive-active meteorological radar, meteorological lidar systems.

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.

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.

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».

К настоящему моменту благодаря такой поддержке лаборатория имеет обновлённую измерительную базу, обеспечивающую решение поставленных задач.

С данной статье представлено современное состояние и перспективы развития комплексных радиофизических методов исследования параметров атмосферы в научно-исследовательской лаборатории Муромского института ВлГУ.

1. Развитие радиофизических методов исследования атмосферы

Методы дистанционного зондирования атмосферы получили интенсивное развитие в середине 50-х г. XX в. с появлением искусственных спутников Земли.

В зависимости от используемого диапазона волн разделяются: на инфракрасные, оптические, микроволновые и акустические. По месту установки: наземные, самолетные, аэростатные, спутниковые (рис. 1.1) [1-3].

Наземные приборы: лидары (оптика), содары (акустика), системы радиоакустического зондирования (RASS), микроволновые приборы (радары и радиометры), подразделяются на пассивные системы, регистрирующие естественное излучение (например, собственное тепловое излучение атмосферы), и активные, генерирующие излучение и затем анализирующие его отраженную часть (рис. 1.2). [4].

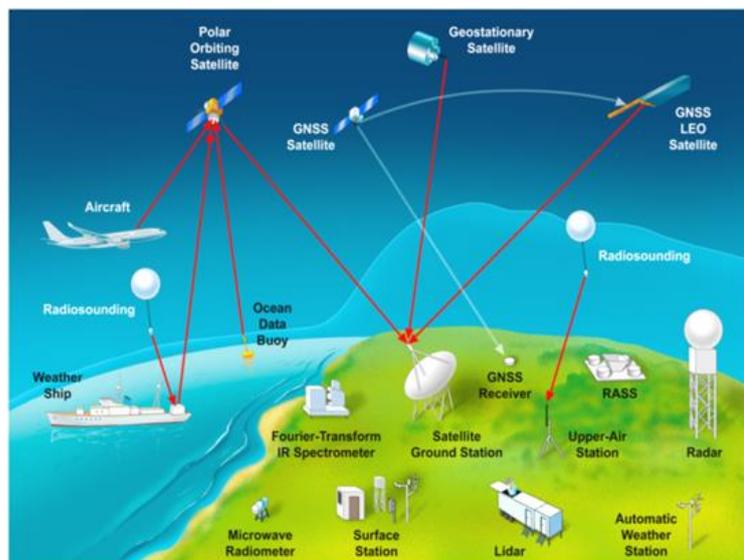


Рис. 1.1 Системы дистанционного зондирования атмосферы

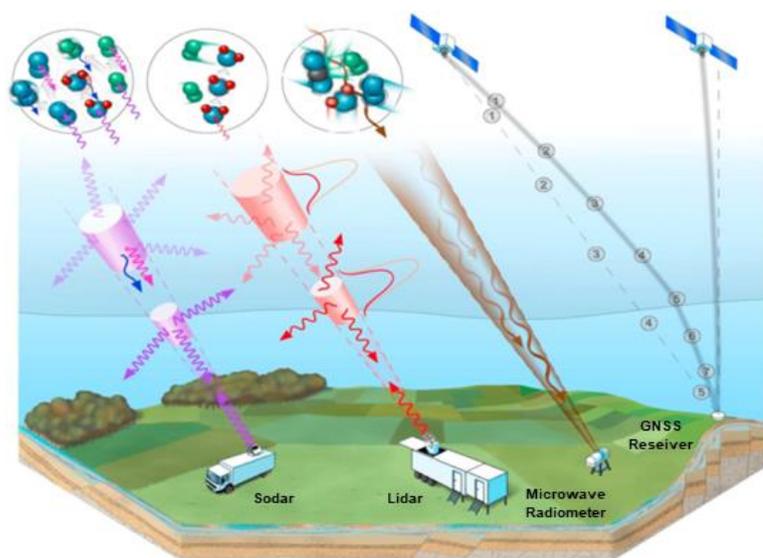


Рис. 1.2 Наземные системы дистанционного зондирования

Значительный вклад в развитие и становление методов микроволновой радиометрии внесли научные достижения Троицкого В.С., Жевакина С.А., Шифрина К.С., Дикке Р., Толберта К., Стилина Д., Нордберга В., Вествотера Е.Р., Башаринова А.Е., Горелика А.Г., Наумова А.П., Кутузы Б.Г., Щукина Г.Г., Фалина В.В., Троицкого А.В., Кадыгрова Е.Н., и др. Ведущие организации-разработчики микроволновых радиометров, в нашей стране: «Институт космических исследований РАН», «Институт прикладной астрономии РАН», «Институт радиотехники и электроники РАН», «Научно-исследовательский радиофизический институт», «Центральная аэрологическая обсерватория», «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова», «Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского», НПО «АТТЕХ» (г. Долгопрудный, Россия), за рубежом лидерами в производстве данных систем являются компании «Radiometrics corporation» (Boulder, США) и «Radiometer Physics GmbH» (Meckenheim, Германия) [5].

2. Микроволновые радиометрические исследования атмосферы

Микроволновая радиометрия является средством пассивного дистанционного зондирования атмосферы и оценки ее метеопараметров по результатам измерений собственного радиотеплового излучения атмосферы.

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 радиояркостных 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.

Предлагаемый вариант структурной схемы многочастотной микроволновой радиометрической системы дистанционного зондирования атмосферы, с использованием элементов радиофоники в тракте передачи сигналов промежуточной частоты, представлен на рис. 2.1. Внешний вид лабораторного оборудования радиофизического комплекса представлен на рис. 2.2.

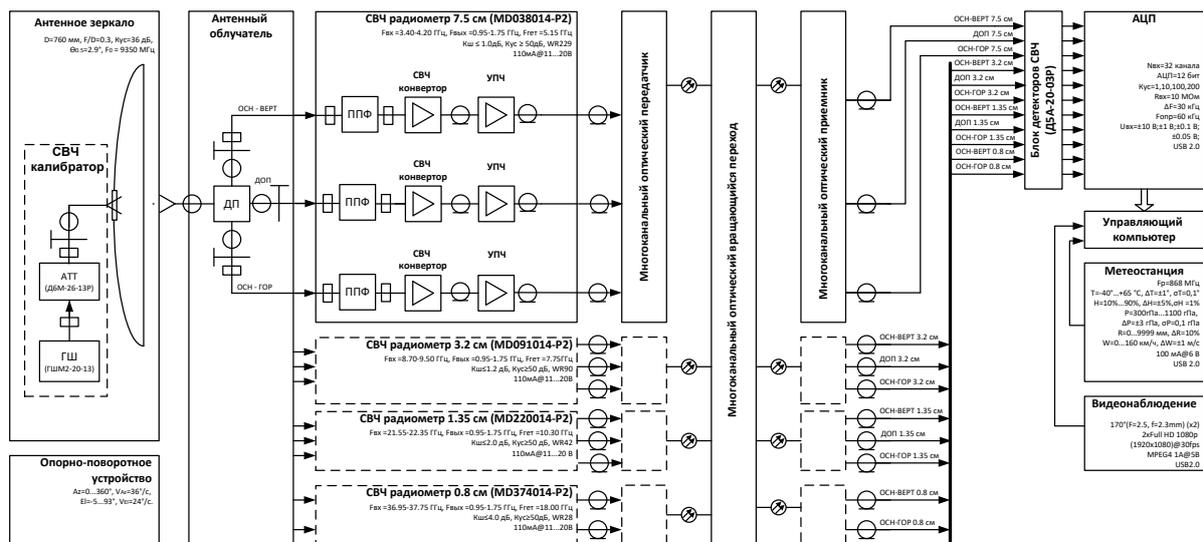


Рис. 2.1 Структурная схема многочастотной микроволновой радиометрической системы

Основные технические характеристики разработанной многочастотной микроволновой радиометрической системы представлены в таблице 2.1

Реализация в двухмодовом облучателе антенны (рис. 2.3) многочастотной микроволновой радиометрической системы трехканального приема по двум основным измерительным на вертикальной (V) и горизонтальной (H) поляризациях и дополнительному приемному каналу (Δ) на общее зеркало антенны определяет условия компенсации влияния фоновых шумов на результаты измерений с возможностью оценки поляризационных контрастов (рис. 2.4) [6].

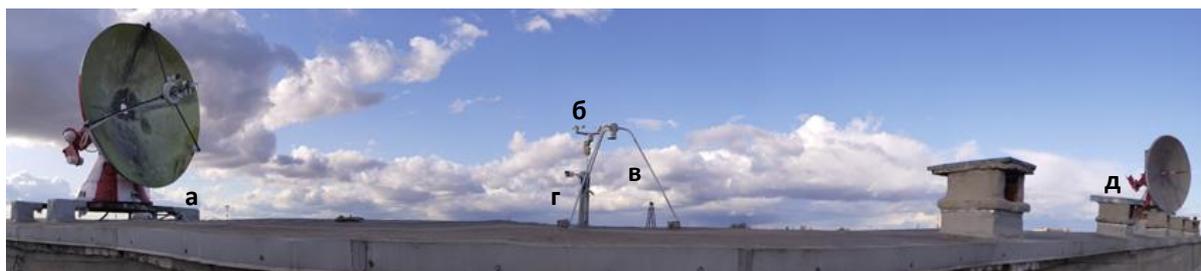


Рис. 2.2 Внешний вид радиофизического комплекса исследований атмосферы: а - многочастотная микроволновая радиометрическая система; б - цифровая метеостанция; в - флюксметр; г - видеонаблюдение; д - метеолокатор.

Таблица 2.1

Параметр	Значение			
1. Длина волны, λ см.	7.5	3.2	1.35	0.8
2. Радиометрическая чувствительность ΔT , при постоянном времени интегрирования $\tau = 1$ с.	0.03	0.04	0.05	0.07
3. Полоса пропускания, Δf 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, Δ	H, V, Δ	H, V, Δ	H, V

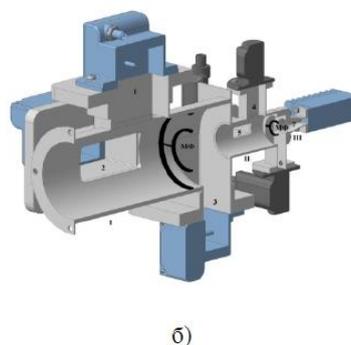
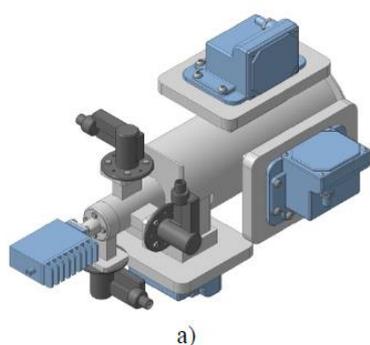


Рис. 2.3 Двухмодовый облучатель многодиапазонной микроволновой радиометрической системы с компенсацией фонового излучения: а) внешний вид; б) внутреннее строение

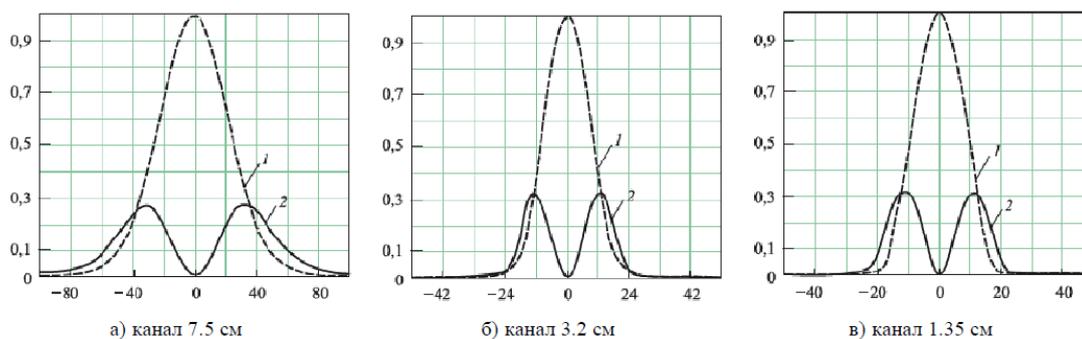


Рис. 2.4 Диаграммы направленности многоволнового двухмодового облучателя: 1 – волна H_{11} (ОСН – канал), 2 – волна E_{01} (ДОП – канал)

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.

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, разработки 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 радиофоники. Результаты экспериментальных исследований радиотеплового излучения атмосферы за март 2024 г., представлены на рис. 2.5.

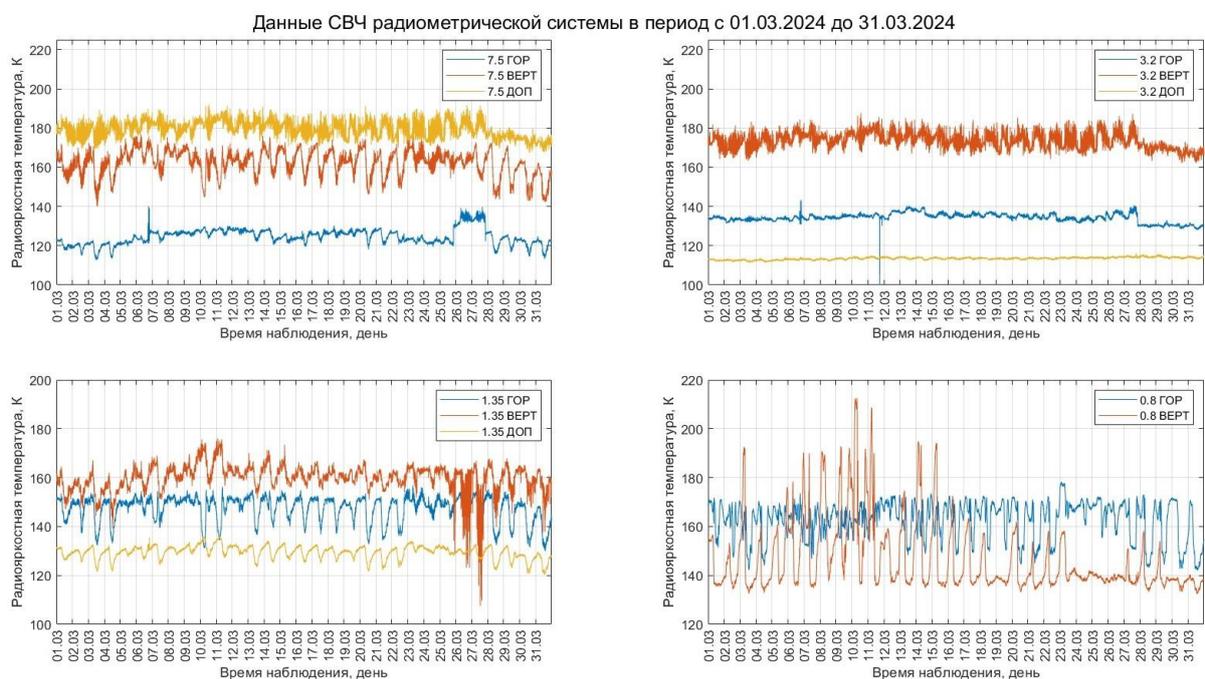


Рис. 2.5 Радиотепловое излучение атмосферы за март 2024 г.

3. Исследование метеорологических параметров приземного слоя атмосферы

Цифровая метеостанция (рис. 3.1), предназначенная для сбора и отображения основных метеорологических параметров в месте расположения 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.

Месячный ход (март 2024 г.) приземных метеопараметров атмосферы (температура и влажность) в месте установки многочастотной микроволновой радиометрической системы представлен на рис. 3.2.

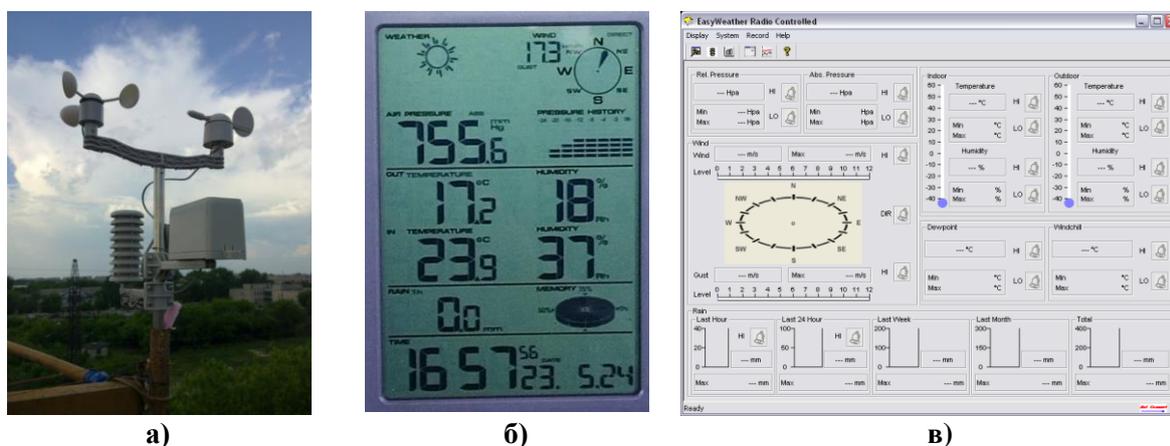


Рис. 3.1 Цифровая метеостанция: а - внешние датчики, б - контроллер управления, в - программа сбора и отображения результатов

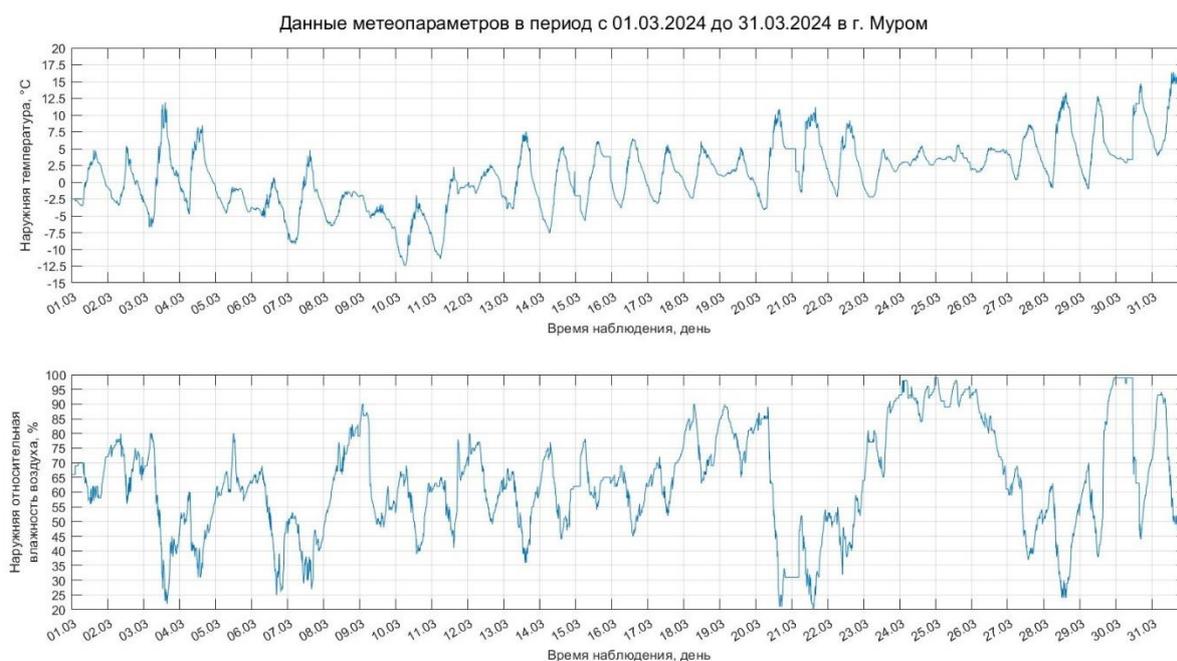


Рис. 3.2 Метеорологические параметры приземного слоя атмосферы за март 2024 г.

4. Система контроля за состоянием облачности

Система видеонаблюдения (рис. 4.1), предназначена для визуального контроля состояния облачности 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=2,3 mm) (x 2), качество видео 2 x Full HD 1080 p (1920 x 1080) @ 30 fps, 2x HD 720 p (1280 x 720) @ 30 fps, формат записи MPEG 4, коммутация с компьютером HDMI или USB 2.0.



Рис. 4.1 Информация с камер видеонаблюдения

5. 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 грозových очагов.

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

Датчик напряженности электростатического поля (рис. 5.1) 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 5.1.



Рис. 5.1 Измеритель напряженности электрического поля атмосферы

Таблица 5.1

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 ДНП, не более, В·А	6

Электростатический генератор (рис. 5.2) содержит расположенные в непосредственной близости параллельно одна от другой экранирующую (крыльчатка) и измерительную пластины. Крыльчатка укреплена на валу двигателя и вместе с корпусом заземлена. Измерительная пластина неподвижно закреплена на изоляторах. Над крыльчаткой расположена маска в виде пластины с прорезями, повторяющими форму лопастей крыльчатки. Измерения в последовательном коде, поступают на цифровой выход устройства (рис. 5.3).

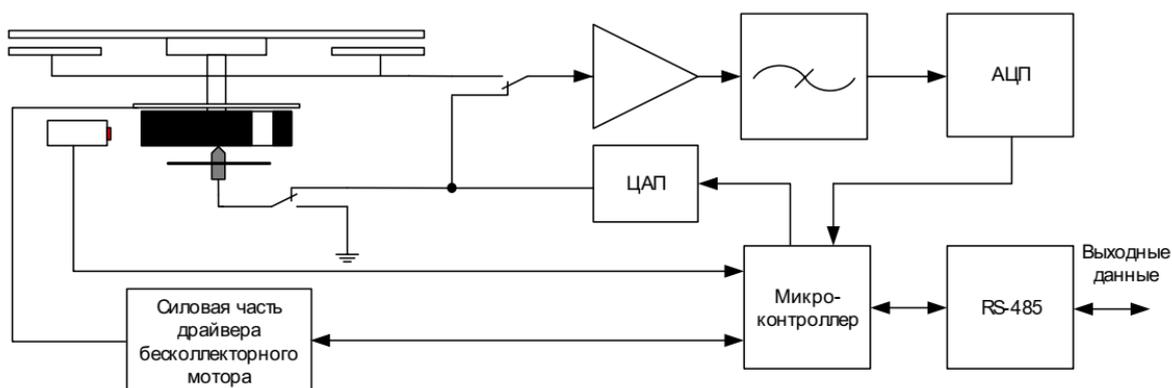


Рис. 5.2 Структурная схема датчика напряженности электростатического поля

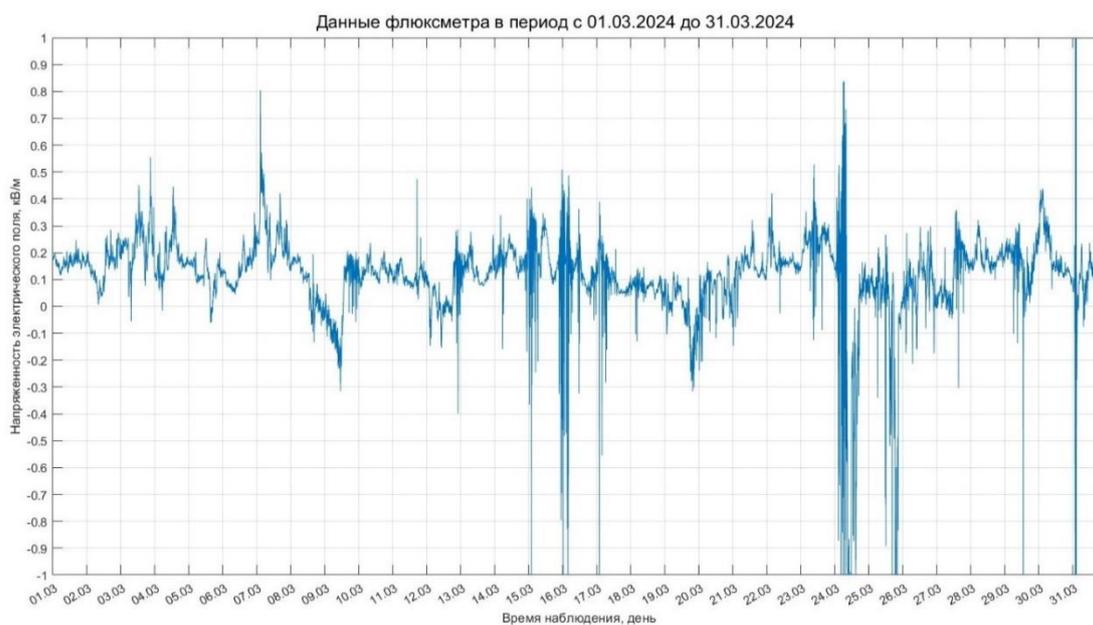


Рис. 5.3 Напряженность электрического поля атмосферы за март 2024 г.

6. Пассивно-активная метеорологическая радиолокация атмосферы

Основным недостатком пассивной (СВЧ радиометрической) метеоролокации является невозможность определения пространственных размеров различных облачных или иных образований (например – зоны осадков), их дальности [9-11].

В случае активной метеоролокации существенной проблемой является отсутствие однозначных связей между радиолокационной отражаемостью и водностью облаков и осадков, что обусловлено в основном сильной зависимостью радиолокационной отражаемости от спектра размеров и скоростей падения капель (зависимость от d^6) [12].

Для использования достоинств пассивного и активного методов и компенсации недостатков неоднократно предлагалось использовать совместно оба метода при осуществлении метеонаблюдений.

В 70-х годах XX в. Г.Г. Щукиным были сформулированы принципы построения пассивно-активных радиометеорологических систем. В соответствии с этим методом средняя водность облака вдоль направления зондирования определялась по отношению водозапаса облака вдоль направления визирования, определяемого с помощью пассивного канала (радиометра) и протяженности зондируемой зоны облака (дождя), определяемой с помощью активного канала (радиолокатора) [13].

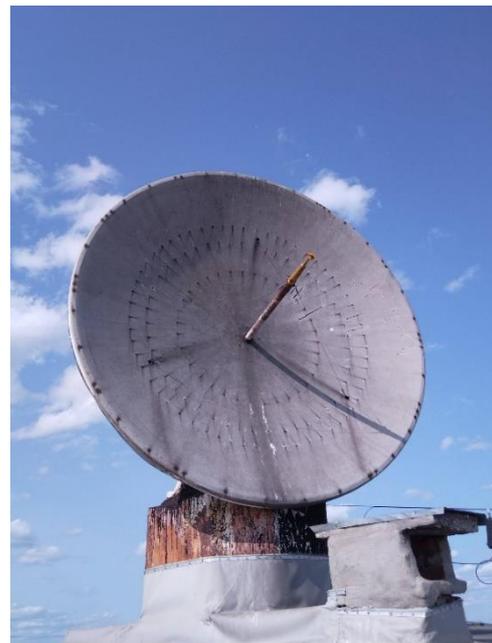
Основным каналом получения информации о состоянии метеобъекта являлся пассивный канал, а активный канал использовался для определения расстояния до выявленного объекта, его геометрических размеров. В связи с этим принципы пассивно-активного зондирования изначально базировались на методиках, используемых при пассивном мониторинге. Прикладное применение ПАРЛС – выявление зон возможного обледенения летательных аппаратов [14].

Для стационарного комплекса на крыше института была установлена вторая антенная колонка от СОН-4, причём дополнительно между опорной рамой и колонкой был оборудован «постамент», обеспечивающий установку антенны диаметром 3 м. Внешний вид пульта управления показан на рис. 6.1 а, антенная система – на рис. 6.1 б.

Основные тактико-технические характеристики ПАРЛС приведены в таблице 6.1.



а)



б)

Рис. 6.1 Метеорологический радиолокатор: а – приемо-передающее и контрольное оборудование, б – модернизированная антенная система

Таблица 6.1 - Характеристики ПАРЛС

Параметр	Значение
Активный канал	
1. Импульсная мощность, кВт	9...14
2. Длительность зондирующих импульсов, мкс	3,5
3. Рабочая длина волны, см	3,2
4. Минимальная чувствительность, дБ/мВт	-103
5. Дальность обнаружения, км	
в пассивно-активном режиме	175
в активном режиме	350
6. Метеопотенциал с антенной диаметром 3000 мм, дБ (стационарный вариант)	283
7. Метеопотенциал с антенной диаметром 760 мм, дБ (мобильный вариант)	274
Пассивный канал	
8. Чувствительность, К	0,3
9. Постоянная времени интегрирования, с	1
10. Коэффициент шума, дБ	не хуже 4,5
11. Развязка от активного канала, дБ	160±7

Результаты математической обработки тестовых пассивно-активных метеорологических исследований зимней атмосферы, приведены на рис. 6.2.

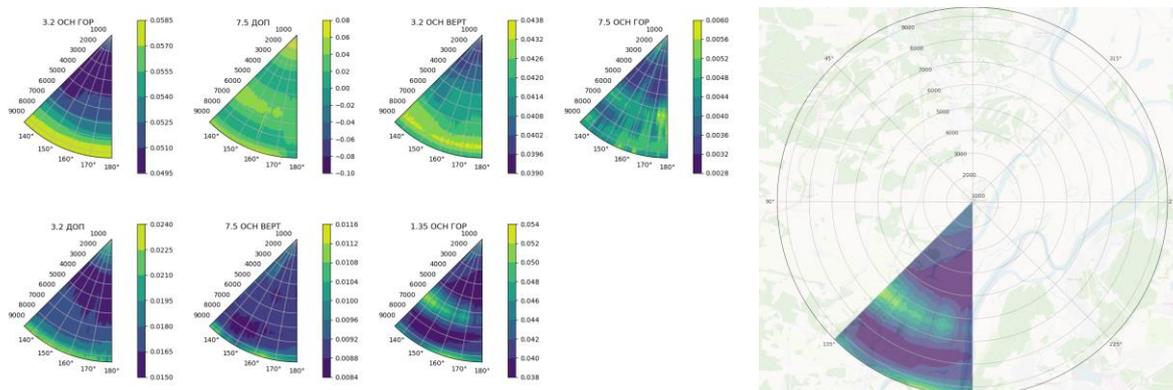


Рис.6.2 Результаты пассивно-активных метеорологических исследований атмосферы

7. Перспективы введения оптического измерительного канала в состав комплексной системы радиофизических методов исследования параметров атмосферы

Существенное развитие лазерной техники в последние десятилетия послужило основой разработки и внедрения коммерчески доступных систем дистанционного измерения параметров атмосферы, водной среды и земной поверхности. В зависимости от вида взаимодействия излучения с веществом, возможно извлечение широкого спектра разнородной информации о состоянии и составе изучаемого объекта или среды, в которой он находится [15].

Наибольшее распространение получили лидарные системы анализа атмосферы на предмет распределения аэрозольного и химического состава воздуха, а также скорости и направления ветра. Исследование аэрозольно-газового состава воздуха особенно важно

в задачах экологического мониторинга зон, связанных с опасными производствами и глобальным переносом загрязняющих веществ, в том числе парниковых газов.

Параметры атмосферы, такие как скорость и направление ветра, видимость, плотность и высотность облачных слоев, изменяются как во временном, так и в пространственном масштабе, что может приводить к формированию опасных метеорологических явлений.

Газовая компонента атмосферы, представляющая наибольший интерес при обнаружении загрязняющих веществ, может быть охарактеризована методом дифференциального поглощения, который основан на многоволновом зондировании и соответствующей обработке данных. Особенности спектрального поглощения различных молекул обуславливают выбор рабочих длин волн [16].

Прогнозирование распределения опасных веществ в атмосфере невозможно без информации о текущей скорости ветра и ее изменчивости во времени и пространстве. Увлекаемые потоком воздуха частицы, на которых происходит рассеяние зондирующего излучения, вызывают доплеровский сдвиг обратно рассеянного излучения.

Несмотря на высокую информативность и эффективность метеолидаров, они не лишены существенных недостатков, ограничивающих область их применения. В частности, в условиях интенсивной облачности, туманов и плотных тучевых образований дальность действия лидаров ограничивается прямой видимостью. Они также теряют свою эффективность при сильных осадках в виде дождя или снега. Эти ограничения не позволяют считать метеолидары всепогодными измерительными средствами. В то же время ряд ответственных применений, в т. ч., обеспечение безопасности авиаперевозок, требуют эффективной работы зондирующих метеосистем в существенно более широких диапазонах атмосферных состояний вплоть до интенсивных осадков различных типов, штормов, снежных ураганов и песчаных бурь.

Возможность работы, зондирующей метеосистемы во всепогодных условиях может быть достигнута путем объединения нескольких частотных диапазонов: оптического и радиочастотного [17].

Длины волн радиочастотных систем зондирования атмосферы больше оптических на 3-4 порядка. Это обуславливает большую проникающую способность радиоизлучения в условиях плотных атмосферных образований, дождя и штормов, однако делает их практически бесполезными в чистой атмосфере, поскольку центры рассеяния – частицы мелкодисперсного аэрозоля и пыль – оказываются чрезвычайно малыми для эффективного рассеяния радиочастотного излучения. Радиочастотные метеолокаторы наиболее эффективны в условиях неблагоприятных погодных условий при малой дальности видимости [18].

Средства дистанционного зондирования атмосферы в оптическом и радиочастотном диапазонах находят широкое применение в аэронавигации, технологиях обеспечения безопасности полетов, метеорологии, экологии, климатологии и в иных сферах. Лидарные и радиолокационные системы имеют общие принципы функционирования. Несмотря на эту общность, их традиционно разделяют в зависимости от используемого частотного диапазона электромагнитного излучения. Следствием такого разделения становится разделение их функциональных возможностей и решаемых задач.

Таким образом, можно связать характерные значения отражаемости метеорологических радаров с коэффициентом обратного рассеяния и ослабления атмосферы для лидара, поскольку детектируемый сигнал в обоих случаях формируется рассеянием и отражением на частицах в атмосфере.

С учетом этих особенностей взаимодействия излучения с аэрозолем логичным выглядит совмещение двух измерительных систем на основе лидара оптического

диапазона и радиодиапазона с одинаковым пространственным и временным разрешением, обеспечивающие всепогодность измерений [19].

Заключение

Работы в рамках проекта РФФ 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.

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

- включение методов и устройств 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.

Комплексное использование оптического и радиочастотного излучения при атмосферном мониторинге может привести к синергетическому эффекту и существенному расширению возможностей комплексных систем дистанционного зондирования атмосферы.

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.
9. Щукин Г.Г., Булкин В.В. Метеорологические пассивно-активные радиолокационные системы: монография. – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2009. - 166 с.
10. Щукин Г.Г., Булкин В.В. Метеорологическая пассивно-активная радиолокация /Радиотехника и электроника, 2011, том 56, № 5. - С. 549-572.
11. Гинеотис С.П., Фалин В.В., Костров В.В., Булкин В.В., Первушин Р.В., Васильцов И.М. Метеорологический пассивно-активный комплекс / Радиометеорология: Труды VII Всесоюзного совещания. - Л.: Гидрометеиздат, 1989. - С.122-124.
12. Ермаков И.В., Гинеотис С.П. Метод повышения электромагнитной совместимости в пассивно-активном радиолокаторе / Достижения радиоэлектроники и автоматики - народному хозяйству // Тезисы докладов Республиканской НТК. – Свердловск: 1985. - С.9.
13. Фалин В.В., Первушин Р.В., Щукин Г.Г., Гинеотис С.П., Николаев В.А., Канарейкин Д.Б. Бортовая пассивно активная радиолокационная станция / Труды ГГО, 1991, Вып. 535. С.61-65.
14. Фалин В.В. Радиометрические системы СВЧ. - М.: Луч, 1997. - 440 с.
15. Rostokin I.N., Fedoseeva E.V. Rostokina E.A. Karyayev V.V. Morozov O.G., et al. Design features of microwave photonic radars. // Proc. SPIE 11516, Optical Technologies for Telecommunications 2019, 115160L (22 May 2020); doi: 10.1117/12.2566327 Proc. of SPIE Vol. 11516 115160L-1-6.
16. Щукин Г.Г., Борейшо А.С., Жуков В.Ю., Ильин М.Ю., Коняев М.А. Лидарно-радиолокационный метеорологический комплекс. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015; 58 (10-3): - С.100 - 103.
17. Борейшо А.С., Коняев М.А., Ким А.А., Михайленко А.С. Перспективы оптикорadiочастотных систем дистанционного зондирования атмосферы. // Фотоника, том 15 № 1 2021.
18. Исследование оптических характеристик перистых облаков с аномальным обратным рассеянием / И. В. Самохвалов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 8. - С. 63 - 67.
19. Zhukov V.Y., Shchukin G.G., Rostokin I.N. Improvement of the all-weather profiler. // Journal of Physics: Conference Series 2140 (2021) 012029.