

На правах рукописи



Бубнов Григорий Михайлович

**ЛАБОРАТОРНЫЕ И НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПОГЛОЩЕНИЯ ВОЛН МИЛЛИМЕТРОВОГО
ДИАПАЗОНА В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ**

Специальность – 1.3.4
Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук Вдовин Вячеслав Фёдорович
Официальные оппоненты:	Доктор физико-математических наук Богод Владимир Михайлович кандидат физико-математических наук Розанов Сергей Борисович
Ведущая организация:	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Защита состоится «___» _____ 2021 года в «___» часов на заседании диссертационного совета 24.1.111.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН) по адресу: 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН и на сайте <http://cplire.ru/rus/dissertations/Bubnov/index.html>.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Кузьмин
Лев Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Развитие техники и технологий, связанных с использованием электромагнитных волн, так или иначе сталкивается с проблемой потерь этих волн в атмосфере Земли, в волноведущих трактах, антеннах, средах и материалах. Поглощение электромагнитных волн субтерцовом диапазоне частот (СубТГц, 0.1 - 1 ТГц) в последние два десятилетия стало одной из актуальных задач радиофизики. Исследования поглощающих свойств атмосферы необходимы для нужд радиоастрономии, телекоммуникаций, моделирования теплового баланса планеты и других практических приложений. Радиоволновая аппаратура и связанные с ней технологии развиваются по пути постепенного увеличения частот, и продвижение в направлении терагерцового (ТГц) диапазона является одним из ключевых приоритетов развития мировой и российской науки, зафиксированным Распоряжением Правительства РФ от 31 декабря 2020 г. № 3684-р¹. При этом для нужд радиоастрономии, телекоммуникаций, моделирования теплового баланса планеты и других практических приложений, необходимы практические исследования поглощающих свойств атмосферы. Передача данных в СубТГц диапазоне является одним из перспективных направлений по возможному расширению пропускной способности радиоканала, но диссипация волн в атмосфере снижает его пропускную способность. Часть настоящей работы посвящена исследованию микроволнового астроклимата, т.е. совокупности атмосферных условий, влияющих на пропускную способность СубТГц радиоканалов и на качество астрономических наблюдений. Аппаратура для исследования субТГц астроклимата не производится серийно, поэтому особенно актуальна задача создания и модернизации аппаратуры для экспедиционных исследований прозрачности атмосферы в СубТГц диапазоне частот.

Исследования прозрачности реальной атмосферы в полевых условиях тесно завязаны на математические модели атмосферного поглощения, основанные на лабораторных данных и квантовой механике, например MPM Liebe [7] или Moliere (Microwave Observation and Line Estimation and REtrieval) [8]. В их основе лежат базовые параметры поглощения, полученные методами лабораторной спектроскопии. В настоящей работе затрагиваются вопросы лабораторных исследований спектров поглощения атмосферных газов в субТГц диапазоне. В

¹ См. 3 абзац 9 страницы Программы фундаментальных научных исследований на долгосрочный период 2021-2030гг.

совокупности исследования прозрачности атмосферы в лабораторных и полевых условиях дополняют друг друга, давая наиболее полную информацию об условиях распространения радиосигналов в атмосфере Земли для целей радиоастрономии и телекоммуникации в СубТГц области спектра.

Цель диссертационной работы: Получение детальной информации о поглощении волн СубТГц диапазона частот в атмосфере Земли путём прямых измерений поглощения в полевых и лабораторных условиях для практических целей радиоастрономии, телекоммуникации и спектроскопии.

Реализация данной цели предполагает решение следующих **задач**:

1. Развитие СВЧ-радиометрических методов обработки данных астроклимата, полученных радиометрическим комплексом МИАП-2, с учётом физических свойств атмосферы, параметров аппаратуры и особенностей метода «атмосферных разрезов».

2. Модернизация микроволновых радиометрических комплексов МИАП-2 с целью расширения их функциональных возможностей и улучшения рабочих параметров. Создание аппаратно-программного комплекса системы удалённого доступа и адаптация радиометрического комплекса МИАП-2 к длительным автономным полевым наблюдениям.

3. Модернизация лабораторного резонаторного спектрометра для обеспечения проведения высокоточных исследований спектральных характеристик атмосферных газов в широком диапазоне температуры, давления и частот.

4. Полевые исследования временной изменчивости характеристик прозрачности атмосферы в миллиметровом диапазоне на различных площадках с целью сравнения их между собой и поиска наилучших астроклиматических условий.

5. Лабораторные исследования спектра поглощения волн СубТГц диапазона в атмосфере Земли в широком диапазоне температуры и давления.

6. Разработка методов расчёта поглощения в реальной атмосфере по метеопараметрам с использованием спектральных моделей поглощения. Поиск взаимосвязи экспериментальных данных о прозрачности атмосферы и метеопараметров.

Научная новизна:

- Впервые в ходе 11-ти экспедиций прямым измерением экспериментально исследован микроволновый астроклимат 22-х перспективных точек размещения субТГц инструментов на территории Северо-Восточного полушария. Среди исследованных площадок выявлены три лидирующие по астроклиматическим условиям площадки: плато Суффа, гора Муус-Хая и обсерватория ИСЗФ (Монды).

- Предложена и апробирована новая методика обработки данных астроклимата, позволяющая снизить на 30% ошибки расчёта оптической толщины, строить статистические диаграммы и анализировать данные.

- Модернизация микроволнового лабораторного резонаторного спектрометра позволила достичь уникальной чувствительности по коэффициенту поглощения $4 \times 10^{-9} \text{ см}^{-1}$ в диапазоне частот 45-500 ГГц и давлений 10-1000 мм рт. ст.

- На модернизированном резонаторном спектрометре впервые получены экспериментально и предоставлены разработчикам криогенной антенны Миллиметрон значения коэффициентов отражения излучения СубТГц диапазона при криогенных температурах для образцов металлов и металлических покрытий: медь, алюминий, золото, серебро, а также для коммерческого высокотемпературного сверхпроводника.

- На модернизированном резонаторном спектрометре впервые экспериментально наблюдался спектр димера воды в миллиметровом диапазоне длин волн при температурах от 7 до 49°C и давлении от 4 до 43 мм.рт.ст.

Практическая значимость

- Широкий географический охват исследований астроклимата позволил экспериментально выявить особенности микроволнового астроклимата в различных климатических зонах и высотах над уровнем моря, а также сравнить параметры астроклимата в разных местах по данным одного прибора. Опубликован для публичного доступа полный массив полученных за 10 лет экспериментальных данных.

- Экспериментально получена зависимость интегральной прозрачности атмосферы от высоты места наблюдений.

- На основе результатов исследований астроклимата на плато Суффа, выработаны рекомендации по корректировке проектного рабочего диапазона телескопа РТ-70 до значений не короче 3 мм и целесообразности установки

дополнительного субТГц телескопа (на окна прозрачности атмосферы 3 мм и короче) малого диаметра (12-20 м) в окрестности Суффы на высоте более 3км.

- На основе результатов измерений потерь на отражение выработаны рекомендации по разработке зеркальной системы криогенного космического телескопа Миллиметрон.

- Проведены измерения спектров атмосферных газов с уникальной точностью, что позволило пополнить спектральные базы данных в моделях атмосферного поглощения.

Основные положения, выносимые на защиту.

1) Впервые методом прямых радиометрических измерений исследованы параметры прозрачности атмосферы в миллиметровом диапазоне длин волн на перспективных площадках для строительства радиоастрономической обсерватории СубТГц диапазона и/или наземного терминала дальней космической связи в Северо-Восточном полушарии. Показано, что среди исследованных площадок наилучшими по астроклиматическим условиям являются площадки: плато Суффа, гора Муус-Хая и обсерватория ИСЗФ (Монды).

2) Масштабная модернизация радиометрических комплексов МИАП-2 позволила вести с их помощью длительные исследования астроклимата в труднодоступных местах в режиме удалённого доступа. Созданное оборудование позволило провести надежные измерения астроклимата с суммарной наработкой свыше 45 000 часов.

3) Разработанная методика обработки данных астроклимата позволила снизить ошибку расчёта оптической толщины атмосферы на 30% по сравнению с классическим методом «атмосферных разрезов».

4) Расширение рабочего диапазона температуры в резонаторном спектрометре, а также оптимизация структуры и термостабилизация квазиоптического тракта позволили достичь чувствительности спектрометра порядка $4 \times 10^{-9} \text{ см}^{-1}$ в диапазоне 45 – 500 ГГц. Впервые проведённые прямые измерения потерь на отражение от металлов и металлизированных покрытий при криогенных температурах демонстрируют преимущество зеркал, изготовленных из чистых металлов (меди, алюминия, золота или серебра) по сравнению с ВТСП.

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие в: организации, подготовке и проведении экспедиций по исследованию микроволнового астроклимата; измерениях спектров атмосферных газов и потерь на отражение на резонаторном спектрометре мм и субмм диапазонов; создании модернизированной версии криогенного резонаторного спектрометра СубТГц диапазона; измерениях потерь на отражение излучения СубТГц диапазона от металлов и металлизированных покрытий при криогенных температурах.

Автор лично: модернизировал радиометрический комплекс МИАП-2 для длительных автономных измерений астроклимата; занимался обработкой данных астроклимата, полученных на приборах МИАП-2, а также разработал и протестировал алгоритм обработки данных астроклимата; занимался организацией экспедиций по исследованию астроклимата, в том числе в рамках своих проектов РФФИ и IEEE; всего успешно провёл 11 экспедиций, в том числе 7 в роли руководителя; выполнил работы по модернизации спектрометра мм и субмм диапазонов в части обеспечения термостабилизации рабочего объёма и контроля температуры, а также электродинамической оптимизации квазиоптического тракта.

Достоверность полученных результатов

подтверждается согласием экспериментальных результатов измерений параметров астроклимата с доступными метеорологическими, зондовыми, спутниковыми и радиометрическими данными, когда такое сравнение возможно. Результативность работы методики обработки данных астроклимата критически оценена на экспериментальных данных. Результаты модернизации резонаторного спектрометра подтверждаются высокоточными измерениями спектров атмосферных газов и потерь на отражение, которые валидировались по аналогичным измерениям на других спектрометрах.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации докладывались на

- Всероссийских семинарах по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн в 2013, 2016 и 2019 годах
- Всероссийской радиоастрономической конференции «ВРК-2014», 22-26 сентября 2014, г.Пушино

- The International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT) в 2014, 2018 и 2019 годах
- 4 всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 2015
- Всероссийской Микроволновой конференции в 2016, 2018 и 2020 годах
- 32nd URSI GASS, Montreal, 19-26 August 2017
- Всероссийской Астрономической конференции, 2017г
- International Suffa Workshop, 2018, 2020
- LCN Workshop. с 2011 по 2018 год (дважды в год)
- Конференции TERA в 2018 и 2020 годах
- IEEE COMSAC 2019, November 4-6, 2019
- Конференции METANANO, 2020
- Всероссийской конференция "Наземная астрономия в России. XXI век", 2020 год

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на семинарах НИЦ КН НГТУ и ИПФ РАН.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 55 научных работ, включая 11 статей в рецензируемых изданиях, входящих в список ВАК и/или базы Web of Science, Scopus или РИНЦ. 43 работы представлено в материалах российских и международных конференций, из них 18 входят в базы цитирования Web of Science и/или Scopus. Один патент на программу для ЭВМ.

Структура и состав работы.

Диссертационная работа состоит из четырёх глав, введения, заключения, библиографического списка из 155 наименований (включая научные труды автора), а также списка основных сокращений. Общий объём диссертации составляет 130 страниц, в том числе 74 иллюстрации и 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика диссертационной работы: раскрывается актуальность темы работы, её цели и задачи, приводится практическая значимость работы, а также состояние вопроса на сегодняшний день и место исследований автора в кругу близких работ. Приведены формальные данные о диссертационном исследовании: апробация и публикации, личный вклад автора, положения, выносимые на защиту, структура работы и пр.

Первая глава носит обзорный характер. В **разделе 1.1** описывается постановка задачи исследований. Обосновывается общий подход к выбору тематики и проводимым исследованиям.

Раздел 1.2 посвящён обзору задач и методов полевых исследований условий распространения СубТГц волн в атмосфере Земли. Отмечается необходимость поиска площадок для строительства наземной радиоастрономической станции мм и субмм диапазонов. Для предварительной разведки астроклимата этих площадок необходимо создание экспедиционной аппаратуры и развитие радиометрических методов измерения астроклимата. Приведены примеры радиометрической аппаратуры для исследования атмосферы в различных диапазонах частот. Описывается концепция модернизации радиометрического комплекса МИАП-2 с учётом обзора аналогичных инструментов. Кроме того, развитие методов исследования астроклимата завязано на модели поглощения и спектральные исследования атмосферы в контролируемых лабораторных условиях.

В разделе 1.3 описываются задачи и методы лабораторных исследований поглощения в атмосферных газах. Одним из наиболее точных инструментов для исследования спектральных характеристик поглощения является квазиоптический резонаторный спектрометр. Описывается предыстория создания резонаторного спектрометра и его состояние на момент начала исследований. Приведён обзор проблем и ограничений подобных спектрометров, а также предложены возможные технические решения для повышения чувствительности и разрешающей способности резонаторного спектрометра. Описываются его возможности по вариации условий измерений, в частности по диапазону температур и давлений, их стабильности во времени. Отмечается необходимость модернизации резонаторного спектрометра в части расширения температурного диапазона и повышения повторяемости измерений. Составляется план исследований и разработок, необходимых для реализации поставленных задач.

Во второй главе описывается разработка узлов и модернизация двухканального радиометрического комплекса миллиметрового диапазона для измерения атмосферного поглощения в натурных экспериментах.

В разделе 2.1 приводится описание методики измерений, конструкция и схемы прибора, принцип его работы, его технические характеристики. Описываются схемотехнические решения СВЧ-трактов, приводятся схемы управления и сбора данных с описанием их назначения и принципа работы. На рисунке 1 представлена функциональная схема двухканального радиометра МИАП-2.

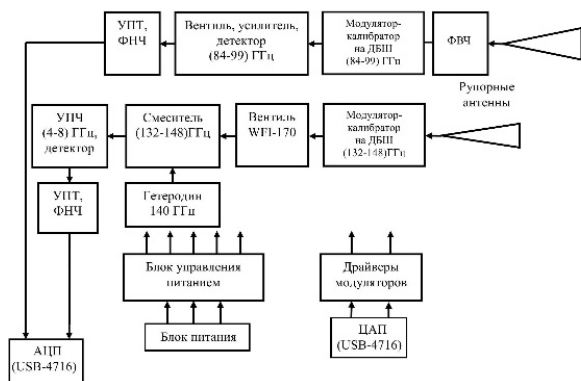


Рисунок 1 – Функциональная схема блока приемников МИАП-2

В разделе 2.2 приводится описание шагов модернизации радиометрических комплексов МИАП-2 поэтапно. Описывается организация удалённого доступа, как способа управления радиометром и сбора данных. Приводится расчёт и испытание волноводных фильтров, устанавливаемых в 3-х мм канал радиометра на плато "Суффа". Установка модулятора-калибратора на входе 2-х мм канала позволила вести наблюдения в двух окнах прозрачности атмосферы. Приводится расчёт и измерение параметров рупорно-линзовых антенн. Описывается разработка автоматической погодной станции (рисунок 2) в качестве дополнения к радиометру МИАП-2.



Рисунок 2 - Внешний вид метеостанции

Раздел 2.3 посвящён разработке адаптивного метода обработки данных, получаемых при помощи «атмосферных разрезов» (блок-схема алгоритма представлена на рисунке 3). Известным недостатком метода атмосферных разрезов является невозможность корректной работы в условиях облачности, а также со значительным шумом приёмника. Оба фактора приводят к драматическим ошибкам при вычислении оптической толщины. Разработанный метод (алгоритм) включает в себя 5 этапов. Алгоритм успешно отработан на измерениях при помощи МИАП-2. Разработанная методика позволила снизить ошибку расчёта оптической толщины атмосферы на 30% по сравнению с классическим методом «атмосферных разрезов».

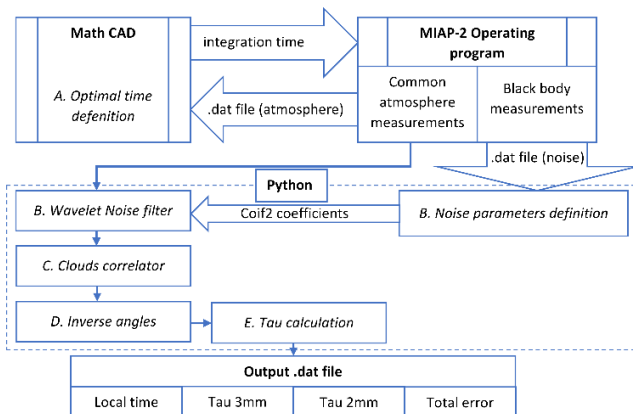


Рисунок 3 - Блок-схема методики

Третья глава посвящена модернизации криогенного резонаторного спектрометра миллиметрового диапазона с целью проведения лабораторных исследований поглощения волн в атмосфере.

В разделе 3.1 приведен принцип работы квазиоптического резонаторного спектрометра субТГц диапазона, его параметры и структурная схема. Обсуждаются возможные пути улучшения параметров спектрометра для измерений параметров атмосферных газов для нужд атмосферной спектроскопии и для измерения потерь на отражение от металлов и металлизированных поверхностей при криогенных температурах. Приводятся перечень факторов, влияющих на чувствительность спектрометра, среди которых интерференция в волноводном тракте и температурный «дрифт» элементов спектрометра.

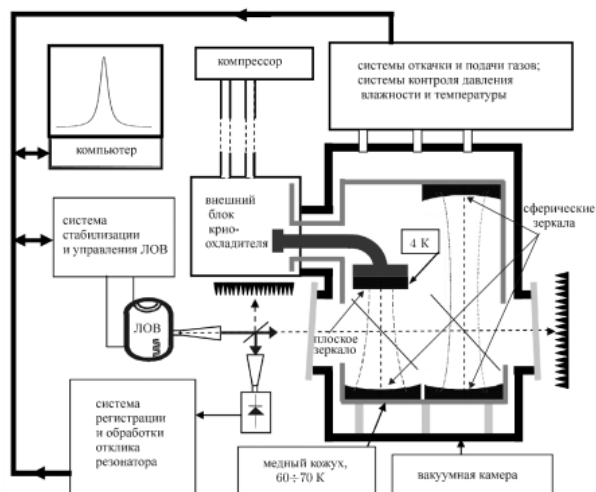


Рисунок 4 - Функциональная схема резонаторного спектрометра

Раздел 3.2 посвящён расчётам квазиоптического тракта и разработке рекомендаций по его модернизации. В частности, были смоделированы рупорные антенны и получены их параметры. Далее, используя ключевые параметры рупорных антенн в ближней зоне, были рассчитаны параметры квазиоптических Гауссовых пучков в спектрометре. В результате показано, что паразитная интерференция возникает из-за рассогласования параметров пучка, приходящего в резонатор и собственного пучка резонатора, а также в результате отражения от узких окон резонатора.

В разделе 3.3 описана модернизация проводимых узлов резонатора и её результаты. Кроме квазиоптической части спектрометра, был выполнен ряд инженерных доработок, направленных в первую очередь на автоматизацию и ускорение процесса записи спектра, что в результате привело к повышению стабильности спектрометра и повторяемости результатов. В частности, была предложена и реализована схема управления механическим аттенуатором при помощи шагового двигателя. В результате оптимизации квазиоптического тракта снижена амплитуда паразитной интерференции на 46%. Уменьшено время записи спектра с нескольких часов до нескольких минут. Достигнута чувствительность порядка $4 \times 10^{-9} \text{ см}^{-1}$ в диапазоне 45 – 500 ГГц при контролируемом давлении в диапазоне 10-1000 Торр и температуре в диапазоне -30 .. +60°C.

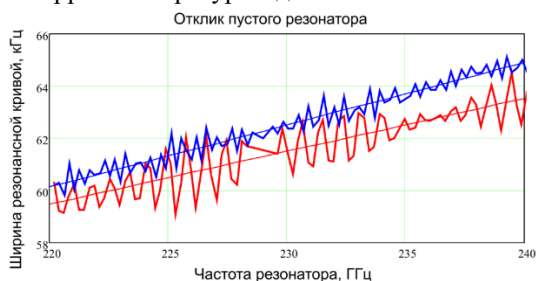


Рисунок 5 – Собственная частотная характеристика пустого резонатора: красный (внизу) – до модернизации, синий (вверху) – после модернизации (-46% СКО).

В четвёртой главе представлены экспериментальные результаты исследований потерь излучения СубТГц диапазона.

Раздел 4.1 посвящён экспериментальным исследованиям взаимосвязи интегральной влажности и оптической толщины, как основных параметров астроклимата субТГц диапазона. Их соотношение выражается формулой:

$$\tau_{tot}(\lambda, h, W, Q) = \alpha(\lambda) \cdot \exp(-h/h_0) + \beta(\lambda) \cdot W + \gamma(\lambda) \cdot Q$$

где τ_{tot} - наблюдаемая оптическая толщина (Неп),

h - высота над уровнем моря (км),

h_0 - характеристическая высота кислорода = 5.3 (км),

W - количество осаждаемой воды, PWV (мм),

Q - водозапас облаков (кг/м³),

α - кислородная часть поглощения на уровне моря (Неп),

β - удельное поглощение в парах воды (Неп/мм),

γ - удельное поглощение в облачности (Неп·м³/кг).

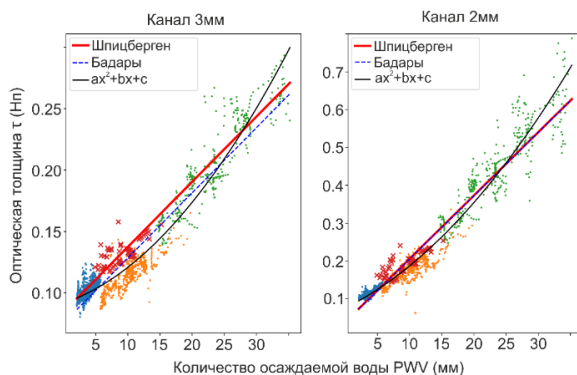


Рисунок 6 - Экспериментальная взаимосвязь оптической толщины мм диапазона и количества осаждаемой воды (PWV).

В эксперименте радиометр МИАП-2 вёл регулярные измерения оптической толщины τ в непосредственной близости с инструментом, измеряющим интегральную влажность W (Рисунок 6). В результате двух экспериментов с различными измерителями W на различных площадках определены значения коэффициентов α и β (Таблица 1).

Таблица 1. Коэффициенты удельного поглощения в окнах прозрачности 3мм и 2мм.

Окно прозрачности	Эквивалентная частота f , ГГц	Удельное поглощение в кислороде на уровне моря α , Неп	Удельное поглощение в парах воды β , Неп/мм
3 мм	79.7	0.086 ± 0.001 (1.3%)	0.0053 ± 0.00067 (12.7%)
2 мм	134	0.042 ± 0.003 (8%)	0.0167 ± 0.0017 (9.9%)

В разделе 4.2 приведён теоретический расчёт эквивалентных частот радиометрических приёмников с учётом ранее полученных в эксперименте коэффициентов удельного поглощения при помощи модели распространения MPM Liebe с учётом реальных высотных профилей атмосферы. Для большинства расчётов оценка эквивалентных частот измерения оптической толщины радиометром МИАП-2 (Мус-Хая) составляет: 79.7 ГГц и 134 ГГц для каналов 3мм и 2мм соответственно (Таблица 1).

Раздел 4.3 посвящён исследованиям астроклимата в экспедиционных условиях с использованием разработанного оборудования. Они перманентно велись в ходе всего диссертационного исследования. Описаны результаты наблюдений астроклимата, накопленные в течение 9-ти лет в различных точках Восточном полушарии. В ходе 11-ти экспедиций получены уникальные данные по радиопрозрачности атмосферы, в ряде мест собрана годовая статистика. На рисунке 7 представлены медианные значения оптической толщины, измеренные комплексами МИАП-2 в течение всего периода эксплуатации. Показано, что среди исследованных площадок наилучшими по астроклиматическим условиям являются площадки: плато Суффа, гора Муус-Хая и обсерватория ИСЗФ (Монды).

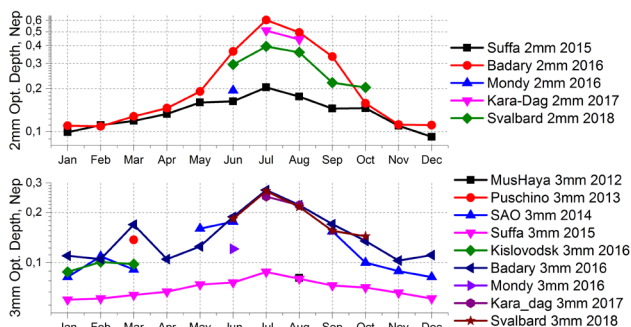


Рисунок 7 - Сравнение результатов долговременных наблюдений оптической толщины в 2мм и 3мм окнах прозрачности

В разделе 4.4 посвящён исследованиям спектров атмосферных газов. Одна из наиболее острых проблем спектроскопии атмосферных газов состоит в природе континуального поглощения и в количественном определении вклада димера воды в это поглощение. Возможность экспериментального наблюдения разрешённого спектра димера воды в мм диапазоне была показана в 2007 году, а на модернизированном резонаторном спектрометре удалось впервые наблюдать его разрешённый вращательный спектр в условиях близких к атмосферным. Особый интерес представляет линия вращательного спектра кислорода с центром около 118 ГГц. Модели, которые ранее использовались для описания формы этой линии не согласовывались с данными эксперимента. Измерения, проведённые на резонаторном спектрометре, позволили получить спектр кислорода с достаточной точностью, чтобы пересмотреть модель профиля поглощения этой диагностической атмосферной линии.

Раздел 4.5 посвящён исследованиям потерь на отражение от материалов криогенных рефлекторов, проводимых на резонаторном спектрометре. Проведены исследования образцов основных металлов, используемых в качестве отражающих материалов: медь различной степени чистоты, алюминий и алюминиевая фольга различной степени чистоты, бериллий, золотое и серебряные покрытия. Показано, что реальные потери на отражение больше расчётных для чистых металлов, и они существенно зависят от чистоты материала и его кристаллической решётки, что особенно выражено при криогенных температурах. Потери на отражение на частоте 230 ГГц образца из особо чистой меди уменьшились после отжига и составили около $0.5 \cdot 10^{-3}$ при 4К. Потери на золотом гальваническом покрытии составили около $0.6 \cdot 10^{-3}$ при 4К. На образце ВТСП показано (Рисунок 8), что потери на отражение резко падают при наступлении сверхпроводимости, но абсолютное их значение остаётся на уровне $7 \cdot 10^{-3}$ на частоте 230 ГГц при температуре 4К, то есть примерно на порядок выше, чем у чистых металлов.

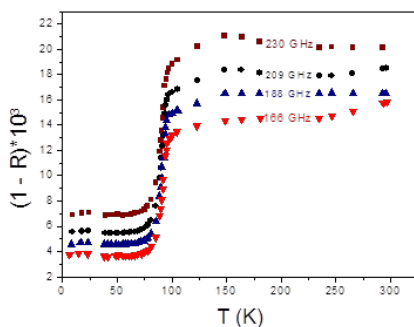


Рисунок 8 - Температурная зависимость потерь на отражение образца ВТСП на разной частоте

В заключении формулируются основные итоги и результаты работы, состоящие в следующем:

- На основе лабораторных радиометрических комплексов МИАП-2 создан мобильный автономный аппаратно-программный комплекс для измерения атмосферного поглощения в диапазоне частот 84 - 99 и 132 - 148 ГГц. Два комплекта комплекса, обладая высокой надежностью и устойчивостью к воздействию внешних факторов, в течение 9 лет были использованы для измерения астроклимата с суммарной наработкой свыше 45 000 часов.

- Разработана, апробирована и внедрена новая методика расчёта микроволнового астроклимата, позволившая уменьшить ошибку расчёта оптической толщины на 30% по сравнению с классическим методом «атмосферных разрезов».

- По результатам исследований астроклимата 22-х точек на территории Северо-Восточного полушария с использованием модернизированного радиометрического комплекса выявлены три лидирующие площадки по астроклиматическим условиям: плато Суффа, вершина Мус-Хая и обсерватория ИСЗФ (Монды).

- Сформулированы рекомендации по возможному размещению субТГц радиотелескопов будущей российской программы развития ММ астрономии и по требованиям к точности поверхности главного зеркала строящегося радиотелескопа РТ-70 на плато Суффа. В частности, доказана нецелесообразность доработки 70 метрового телескопа на высоте 2400 м до плановых рабочих длин волн 0.8 мм, и целесообразность дополнения проекта малым субММ зеркалом Ø 13-20 м размещаемом на Суффе на высоте 3200 м.

- Модернизирован резонаторный спектрометр миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов: оптимизирован квазиоптический тракт, снижена амплитуда паразитной интерференции на 46%, уменьшено время записи спектра с нескольких часов до нескольких минут. Достигнута чувствительность порядка $4 \times 10^{-9} \text{ см}^{-1}$ в диапазоне 45 – 500 ГГц при контролируемом давлении в диапазоне 10-1000 Торр и температуре в диапазоне -30 .. +60°C.

- На модернизированном автором спектрометре получены спектры поглощения волн мм диапазона в атмосфере и впервые экспериментально наблюдался спектр димера воды в миллиметровом диапазоне длин волн при температурах от 7 до 49°C и давлении от 4 до 43 мм.рт.ст.

- На модернизированном спектрометре проведены измерения потерь на отражение в диапазоне частот 150 – 250 ГГц и температур 4 – 300 К от зеркал из ВТСП, меди, алюминия, бериллия, золота и серебра, позволившие дать рекомендации по оптимальным покрытиям криогенного зеркала телескопа Миллиметрон и исключить из проекта вариант зеркала из ВТСП. Показано, что наиболее оптимальным материалом покрытия криогенных субТГц рефлекторов является золотое гальваническое покрытие с потерями около $0.6 \cdot 10^{-3}$ при 4К.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

Публикации в журналах из перечня ВАК, также входящих в базы цитирования Web of Science и Scopus:

1. Криовакуумный резонаторный комплекс / В.В. Паршин, Е.А. Серов, Г.М. Бубнов, В.Ф. Вдовин, М.А. Кошелев, М.Ю. Третьяков // Изв. ВУЗов Радиофизика, № 56, т.8-9, стр.614-621. 2013г. 10.1007/s11141-014-9458-0
2. Димер воды и атмосферное континуальное поглощение / М.Ю. Третьяков, М.А. Кошелев, Е.А. Серов, В.В. Паршин, Т.А. Одинцова, Г.М. Бубнов // Успехи физических наук. №184(11) стр. 1199–1215. 2014г. 10.3367/UFNr.0184.201411c.1199
3. Двухволновый измеритель радиопрозрачности атмосферы миллиметрового диапазона / В.И. Носов, О.С. Большаков, Г.М. Бубнов, В.Ф.Вдовин, И.И. Зинченко, А.С.Марухно, П.Л. Никифоров, Л.И. Федосеев, А.А.Швецов // Приборы и техника эксперимента. 2016, №. 3, стр. 49–56. 10.1134/S0020441216020111
4. Результаты измерения астроклимата в коротковолновой части мм диапазона на плато Суффа // Г.М. Бубнов, Ю.Н. Артеменко, В.Ф. Вдовин, Д.Б. Данилевский, И.И. Зинченко, В.И. Носов, П.Л. Никифоров, Г.И. Шанин, Д.А.Раупов // Изв. Вузов Радиофизика, № 59, Т.8-9, Стр.852-861, 2016г. 10.1007/S11141-017-9745-7
5. Результаты наблюдений астроклимата на Крымском полуострове в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн. / М.И. Агафонов, Г.М. Бубнов, И.Т. Бубукин, В.Ф. Вдовин, Р.В. Горбунов, И.И. Зинченко, В.А. Лапченко, В.И. Носов, А.Л. Панкратов, И.В. Ракуть // Астрофизический Бюллетень, 2018, том 73, № 3, с. 412–417
6. Согласованное определение интегральной влажности и эффективной оптической толщины атмосферы в мм диапазоне с использованием широкополосных радиометров / Г.М. Бубнов, В.Ф. Григорьев, И.И. Зинченко, П.М. Землянуха, Г.Н. Ильин, Д.М. Кабанов, В.И. Носов, и В.Ф. Вдовин // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2019. – Т. 62. – №. 12. – С. 920-931. 10.1007/s11141-020-10027-x
7. Сверхпроводниковые приёмники для космических, аэростатных и наземных субтерагерцовых радиотелескопов / Балега Ю.Ю., Барышев А.М., Бубнов Г.М., Вдовин В.Ф., Вдовичев С.Н., Гунбина А.А., Дмитриев П.Н., Дубрович В.К., Зинченко И.И., Кошелев В.П., Лемзяков С.А., Нагирная Д.В., Рудаков К.И., Смирнов А.В., Тарасов М.А., Филиппенко Л.В., Хайкин В.Б.,

Худченко А.В., Чекушкин А.М., Эдельман В.С., Юсупов Р.Я., Якопов Г.В. // Известия ВУЗов. Радиофизика – 2020. – Т. 63 – № 7 – С.533–556.

Публикации в зарубежных рецензируемых журналах, входящих в Международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и/или Web of Science:

8. Searching for New Sites for THz Observations in Eurasia / Grigoriy M. Bubnov, Evgeniy B. Abashin, Oleg S. Bolshakov, Stepan Yu. Dryagin, Victor K. Dubrovich, Andrey S. Marukhno, Vladimir I. Nosov, Vyacheslav F. Vdovin and Igor I. Zinchenko // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, Volume: 5, Issue: 1, pp.64-73, 2015. 10.1109/TTHZ.2014.2380473

9. Reflectivity of metals in the millimeter wavelength range at cryogenic temperatures / V. Parshin, E. Serov, G. Bubnov // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol 64, Issue 11, 2016 pp. 3828-3838. 10.1109/TMTT.2016.2609411

10. New frontiers of modern resonator spectroscopy. / Maksim A. Koshelev, Igor I. Leonov, Evgeny A. Serov, Alena I. Chernova, Aleksandr A. Balashov, Grigoriy M. Bubnov, Member, IEEE, Aleksandr F. Andriyanov, Aleksandr P. Shkaev, Vladimir V. Parshin, Andrei F. Krupnov, and Mikhail Yu. Tretyakov. // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, Volume: 8 Issue: 6 pp: 773 – 783, 2018. DOI: 10.1109/TTHZ.2018.2875450.

11. Terahertz Reflectivity of YBa₂Cu₃O_{7-σ} at Cryogenic Temperatures / Vladimir Parshin, Evgeny Serov, Grigoriy Bubnov, Vyacheslav Vdovin, Andrey Nikolenko, Ilya Lesnov, Aleksandra Gunbina, Andrey Smirnov, Vladimir A Malginov, Dmitry Dolzhenko, Dmitry Khokhlov // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, December 2020 Volume: 30, Issue: 8. pp 1-5. 10.1109/TASC.2020.2994964

Публикации в сборниках материалов конференций, входящих в Международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и/или Web of Science:

12. Search for New Sites for THz Observations in Eurasia / Grigoriy M. Bubnov, Vyacheslav F. Vdovin, Igor I. Zinchenko, Vladimir I. Nosov, Evgeniy B. Abashin, Oleg S. Bolshakov, Stepan Yu. Dryagin and Andrey S. Marukhno // The 25th International Symposium on Space Terahertz Technology. 27-30 April 2014 Moscow, Russia. p.76.

13. Cryogenic resonator spectrometer for satellite reflectivity investigation at millimeter and terahertz bands / Evgeny A. Serov, Vladimir V. Parshin, Gregory M.

Bubnov, and Vyacheslav F. Vdovin // The 25th International Symposium on Space Terahertz Technology. 27-30 April 2014 Moscow, Russia. p.37.

14. Data rates of SubTHz wireless telecommunication channels / G.M. Bubnov, I.V. Lesnov and V.F. Vdovin // 10th International Workshop 2017 “Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications” 02012, EPJ Web Conf. Volume 149, 2017

15. Millimeter-wave astroclimate investigations on Badary observatory near Baikal Lake / Grigoriy M. Bubnov, Vyacheslav F. Vdovin, Vladimir Yu. Bukov, Timofey A. Makarov, Gennadiy N. Il'in, and Igor I. Zinchenko // 32nd URSI GASS, Paper F6-1(2225), Montreal, 19-26 August 2017

16. A refined method of the data processing for astroclimate measurements in mm-waves / Grigoriy M. Bubnov, Vyacheslav F. Vdovin, Peter M. Zemlyanukha and Igor I. Zinchenko // Proc. of 29th IEEE International Symposium on Space Terahertz Technology, Pasadena, California, USA, March 26-28, 2018 p105.

17. Svalbard astroclimate research: expedition and first results / Grigoriy Bubnov, V.F. Vdovin, P.M. Zemlyanukha, V.S. Okunev, V.F. Grigor'yev // Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications (TERA-2018) N.Novgorod, October 22 - 25, 2018. EPJ Web of Conferences 195, 09002 (2018).

18. Accurate broadband THz molecular spectroscopy / Krupnov A.F., Belov S.P., Tretyakov M.Yu., Golubiatnikov G.Yu., Parshin V.V., Koshelev M.A., Serov E.A., Vilkov I.N., Makarov D.S., Bubnov G.M., Leonov I.I., Chernova A.I., Andriyanov A.F., Shkaev A.P. // Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications (TERA-2018) N.Novgorod, October 22 - 25, 2018. EPJ Web of Conferences 195, 06005 (2018)

19. Investigation of the influence of the location on the rate of Sub THz space communications channels / I.V. Lesnov, G.M. Bubnov and V.F. Vdovin // Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications (TERA-2018) N.Novgorod, October 22 - 25, 2018. EPJ Web of Conferences 195, 09004 (2018).

20. Astroclimatic studies of the sites for forthcoming radio astronomical observatories / Grigoriy M. Bubnov, Peter M. Zemlyanukha, Valeriy F. Grigor'yev, and Vyacheslav F. Vdovin // Proc. of 30th IEEE International Symposium on Space Terahertz Technology, Gothenburg, Sweden, Apr 15-17, 2019 p.96.

21. New stage of the Suffa Submm Observatory in Uzbekistan Project / Yury N. Artemenko, Yury Yu. Balega, Andrey M. Baryshev, Gregory M. Bubnov, Andrey Etnaer, Nikolay S. Kardashev, Vadim G. Gimmelman, Thijs M. de Graauw, Shuhrat A. Eghamberdiev, Boris L.Kogan, Nikolay N. Kolachevsky, Valery P. Koshelets, Gerbert Lagerweij, Ilya V. Lesnov, Larissa N. Likhacheva, Sergey F. Likhachev, Gennady I.

Shanin, Yury A. Schekinov, Vyacheslav F. Vdovin, and Igor I. Zinchenko // Proc. of 30th IEEE International Symposium on Space Terahertz Technology, Gothenburg, Sweden, Apr 15-17, 2019 p.124.

22. The Suffa project and high capacity channels for deep space communications systems incorporating cryogenic elements / Yurii Artemenko, Grigoriy Bubnov, Valery Grachev, Alexandra Gunbina, Stefan Dryagin, Alexander Eliseev, Ilya Lesnov, Maria Mansfeld, Alexander Pilipenko, Gennady Shanin, Vyacheslav Vdovin // IEEE COMSAC 2019, November 4-6, 2019.

23. Sub-terahertz Data Channels: Evaluation of Perspectives / Vyacheslav Vdovin, Ilya Lesnov, Grigoriy Bubnov // 2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE), Istanbul, Turkey, 2020, pp. 1-3.

24. Millimeter-wave astroclimate studies in the North Caucasus: Expedition and first results / Grigoriy M. Bubnov, Andrey S. Marukhno, Marat G. Mingaliev, Anastasia P. Markova, Nikolay I. Shatsky, Olga V. Voziakova, Vyacheslav F. Vdovin, Peter M. Zemlyanukha, Igor I. Zinchenko // Proc. SPIE 11582, Fourth International Conference on Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection, and Applications, 115821W (17 November 2020).

25. Observations of astro-climate with the broad band radiometer using the atmospheric dip method / Grigoriy Bubnov, Vyacheslav Vdovin, Peter Zemlyanukha, and Igor Zinchenko // METANANO 2020, AIP Conference Proceedings, Dec. 2020, vol. 2300, no. 1, p. 020014.

26. Development and research of sub-terahertz astronomy and telecommunication equipment / Gregory Bubnov, Alexandra Gunbina, Ilya Lesnov, Maria Mansfeld, Fedor Kovalev, Roman Alekseev, Anastasiya Korobeynikova, Sergey Vdovichev, and Vyacheslav Vdovin // METANANO 2020, AIP Conference Proceedings, 2020, vol. 2300, № 1, P. 020013-1 - 020013-4

27. Analysis of the Millimeter-Band Astroclimate at the Caucasus Mountain Observatory / Marukhno A.S., Bubnov G.M., Vdovin V.F., Voziakova O.V., Zemlyanukha P.M., Zinchenko I.I., Mingaliev M.G., and Shatsky N.I. // Всероссийская конференция "Наземная астрономия в России. XXI век", Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, 21 – 25 Сентября, 2020 года.

28. On the Eurasian submillimeter telescopes project (ESMT) / Vladimir Khaikin, Mikhail Lebedev, Vladimir Shmagin, Igor Zinchenko, Vyacheslav Vdovin, Grigoriy Bubnov, Valerian Edelman, Grigory Yakopov, Artem Shikhovtsev, Gianpietro

Marchiori, Massimiliano Tordi, Ran Duan, Di Li // 2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC), 2020, pp. 47-51

29. Analysis of variations in factors of specific absorption of sub-Terahertz waves in the earth's atmosphere / Bubnov Grigoriy, Vyacheslav Vdovin, Vladimir Khaykin, Pascal Tremblin, Philippe Baron // 2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC), 2020, pp. 229-232.