

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики  
Российской академии наук»

На правах рукописи



БУБНОВ Григорий Михайлович

**ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ ВОЛН МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА В  
АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ И МАТЕРИАЛАХ КРИОГЕННЫХ РЕФЛЕКТОРОВ**

Специальность – 1.3.4. Радиофизика

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук  
Вячеслав Фёдорович Вдовин

Нижний Новгород – 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ГЛАВА 1 Полевые и лабораторные исследования условий распространения радиосигналов СубТГц диапазона частот в атмосфере Земли .....	13
1.1 Роль СубТГц диапазона частот для развития спутниковой телекоммуникации, радиоастрономии и спектроскопии .....	13
1.2 Задачи и методы полевых исследований условий распространения радиосигналов СубТГц диапазона частот в атмосфере Земли.....	15
1.3 Задачи и методы лабораторных исследований спектральных характеристик прозрачности атмосферы в СубТГц диапазоне.....	18
1.4 Выводы к главе 1 .....	20
ГЛАВА 2 Модернизация и калибровка радиометрических комплексов «МИАП-2».....	21
2.1 Метод измерений и принцип работы радиометрического комплекса МИАП-2.....	21
2.1.1 Обзор методов измерения оптической толщины атмосферы в мм диапазоне ..	22
2.1.2 Аппаратурный комплекс МИАП-2 .....	26
2.2 Модернизация радиометрического комплекса и сопутствующих систем.....	32
2.2.1 Оценка погрешностей, связанных с диаграммой направленности рупорной антенны .....	32
2.2.2 Система удалённого доступа и жизнеобеспечения прибора при автономной работе под воздействием жёстких климатических условий .....	38
2.2.3 Автоматический метеорологический модуль радиометра МИАП-2 .....	40
Схема и принцип действия .....	41
Тестовые результаты.....	44
2.2.4 Повторная калибровка модуляторов-калибраторов.....	45
2.2.5 Волноводный фильтр для 3-мм канала радиометра для обсерватории Суффа. 48	
2.3 Новая методика расчёта оптической толщины по методу атмосферных разрезов.....	54
2.3.1 Алгоритм методики.....	56
А. Оценка оптимального времени накопления .....	56
Б. Измерение и фильтрация шумов аппаратуры .....	57
В. Коррелятор облачности.....	58

Г. Исключение инверсных углов .....	59
Д. Расчёт оптической толщины.....	60
2.3.2 Тестирование методики .....	61
2.3.3 Статистическая оценка результативности разработанной методики.....	62
2.4 Выводы к главе 2 .....	63
ГЛАВА 3 Повышение чувствительности и температурного диапазона резонаторного спектрометра мм и субмм диапазонов .....	66
3.1 Методика и принцип работы резонаторного спектрометра. Постановка задачи.....	66
3.2 Расчёт и модернизация квазиоптического тракта спектрометра. Снижение уровня паразитной интерференции.....	68
3.2.1 Расчёт поля на раскрыве рупора .....	68
3.2.2 Расчёт параметров пучка в квазиоптическом тракте.....	73
3.3 Модернизация узлов спектрометра и её результаты .....	74
3.3.1 Автоматизация системы регулирования амплитуды резонансной кривой .....	75
3.3.2 Электромеханическая система регулировки длины резонатора.....	77
3.3.3 Автоматизированная система термометрии квазиоптического резонаторного комплекса .....	79
3.3.4 Малошумящий усилитель постоянного тока для системы считывания отклика резонатора .....	80
3.3.5 Расчёт и модернизация тепловых криогенных интерфейсов.....	82
3.4 Выводы по главе 3 .....	86
ГЛАВА 4 Экспериментальные исследования потерь излучения СубТГц диапазона .....	88
4.1 Экспериментальное определение соотношения оптической толщины мм диапазона и количества осаждаемой воды (PWV) .....	88
4.2 Оценка эквивалентных частот радиометров по модели MPM Liebe.....	91
4.3 Исследования астроклимата в экспедиционных условиях.....	94
4.3.1 Классификация измерений астроклимата по длительности .....	95
4.3.2 Кратковременные исследования астроклимата в различных условиях.....	96
4.3.3 Долговременные исследования статистики астроклимата в режиме удалённого	

доступа .....	101
4.3.4 Обобщение результатов исследований астроклимата на различных площадках .....	105
4.4 Исследование спектра поглощения атмосферных газов на резонаторном спектрометре в СубТГц диапазоне .....	107
4.4.1 Особенности конфигурации резонаторного спектрометра для измерений спектров атмосферных газов.....	108
4.4.2 Результаты измерений спектров атмосферных газов .....	109
4.5 Исследование потерь на отражение от металлов и металлизированных покрытий для зеркал СубТГц диапазона.....	110
4.5.1 Измерения потерь на отражение материалов рефлекторов при криогенных температурах.....	110
4.5.2 Оценка влияния шумового вклада отражающей поверхности в шумовую температуру приёмников, проектируемых с использованием охлаждаемых рефлекторов	112
4.5.3 Измерения потерь на отражение образцов высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) на основе $YBa_2Cu_3O_7$ при криогенных температурах.....	113
4.6 Выводы по главе 4 .....	114
Заключение.....	116
Список сокращений и условных обозначений .....	120
Список литературы.....	121

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность.**

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 в коротковолновой части миллиметрового (ММ) и длинноволновой части субмиллиметрового (СубММ) диапазонов, объединяемых в последнее время в субтерагерцовый диапазон (СубТГц) частот 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-р<sup>1</sup>. Это направление продиктовано разными факторами, среди которых необходимость развития высокопроизводительных коммуникаций, радиоастрономии этого диапазона, систем безопасности и прочих приложений. Среди этих факторов есть и фундаментальные физические задачи: к примеру, потребности микроволновой спектроскопии, обнаружившей в ТГц и СубТГц диапазонах большое количество спектральных линий различных молекул. [1] Исследования спектральных характеристик атмосферных газов лежат в основе различных моделей поглощения, необходимых для расчёта теплового баланса Земли, а создание и модернизация аппаратуры для этих исследований является актуальным предметом научно-технических исследований.

В СубТГц диапазоне частот наблюдаются весьма интересные астрофизические явления, поэтому, в свете развития наземной радиоастрономии этого диапазона, весьма актуальна задача исследования условий распространения волн в атмосфере в полевых условиях с целью разведки новых мест для постройки наземных телескопов. Особенно актуальна задача создания и модернизации аппаратуры для экспедиционных исследований прозрачности атмосферы в СубТГц диапазоне частот.

В настоящее время радиоизлучение во многом используется для передачи информации на расстоянии, и направление к увеличению рабочих частот продиктовано потребностями в увеличении скорости передачи информации, которая, в свою очередь определяется теоремой Шеннона [2]. Согласно ей, пропускная способность радиоканала ограничивается шириной

---

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

полосы, а следовательно, и несущей частотой, а также шумами в канале передачи данных. Тем временем потребность в расширении передающих возможностей радиоканалов нарастает. Передача данных в СубТГц диапазоне является одним из перспективных направлений по возможному расширению пропускной способности радиоканала. Диссипация волн в атмосфере относится к шумам радиоканала и снижает его пропускную способность. Совокупность атмосферных условий, влияющих на пропускную способность радиоканала, земля-космос, а равно как и на качество астрономических наблюдений, называют астроклиматом. [3, 4] В разных диапазонах частот атмосфера по-разному влияет на излучение и разные атмосферные факторы относят к понятию астроклимата. К примеру, астроклимат оптического диапазона в большей степени определяется турбулентностью атмосферы, влияющей на стабильность изображения, а также облачностью и фоновой засветкой. В СубТГц диапазоне основным фактором астроклимата является интегральная прозрачность (или оптическая толщина) атмосферы ( $\tau$ , Непер), тесно связанная с интегральным влагосодержанием PWV (Precipitable Water Vapor, мм) и содержанием кислорода. [5] Измерение параметров астроклимата необходимо, как для предварительной разведки местности при выборе площадки для наземного радиотелескопа, так и для сопровождения работы уже построенного радиотелескопа или антенны космической связи. Используются также и модельные расчёты астроклимата по доступным наземным метеоданным, но их точность прогнозирования обычно не превышает 65% [6]. В зависимости от задачи, выбирается подходящая аппаратура и методы для измерения параметров астроклимата. В настоящее время в СубТГц диапазоне нет промышленных измерителей параметров астроклимата, поэтому конструирование аппаратуры и разработка методики измерения являются научно-исследовательскими задачами, отчасти решёнными в настоящей работе на примере модернизации 2-х канального Микроволнового измерителя атмосферного поглощения (МИАП-2). Изначально этот прибор проектировался для работы в условиях лаборатории (т.е. комнатных) и под наблюдением специалиста. Задача адаптации этого прибора к длительной автономной работе под открытым небом стала мотивацией к модернизации этого прибора.

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]. Для уточнения и пополнения первичных данных о поглощении излучения в спектральных линиях молекул компонент атмосферы в моделях, необходимо исследование спектральных свойств прозрачности атмосферы в лабораторных условиях. Спектрометры для этих целей имеют весьма разнообразный принцип действия и конфигурацию. Одним из наиболее точных и эффективных инструментов для исследования поглощения в атмосфере в СубТГц диапазоне является спектрометр на основе резонатора Фабри-Перо.

Конструирование таких инструментов на практике связано с множеством расчётных и конструкционных задач, некоторые из которых являются предметом исследования в настоящей работе. В конечном итоге, такие параметры, как стабильность температуры исследуемого газа, скорость снятия спектра, уровень паразитной интерференции и другие факторы драматически влияют на точность получаемых спектральных характеристик.

В совокупности исследования прозрачности атмосферы в лабораторных и полевых условиях дополняют друг друга, давая наиболее полную информацию об атмосферных условиях для целей радиоастрономии и телекоммуникации в СубТГц области спектра. Модельные расчёты позволяют вычислять некоторые параметры астроклимата из экспериментальных наблюдений и наоборот – экспериментальные спектроскопические данные составляют основу расчётов в модели поглощения. Аппаратура для обеих задач разная, но лишь объединяя усилия в обоих направлениях, можно получить наиболее полную картину о поглощающих свойствах атмосферы. В настоящей работе рассматриваются вопросы модернизации аппаратуры и развития методики для исследования прозрачности атмосферы: 2я глава посвящена аппаратуре и методике измерения астроклимата в полевых условиях, в 3й главе рассматривается модернизация резонаторного спектрометра для лабораторных исследований атмосферы, а в 4й главе на примере практических исследований объединены оба направления.

## **Цель 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** состоит в следующем:

- Впервые в ходе 11-ти экспедиций прямым измерением экспериментально исследован микроволновый астроклимат 22-х перспективных точек размещения субТГц инструментов на территории 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 выбору материала покрытия зеркальной системы и защитных радиационных экранов 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 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 ИЕЕЕ; 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 объем диссертации.**

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 10 таблиц.

**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 ней приводится краткий обзор по аналогичным приборам и методам, обсуждается роль СубТГц диапазона в развитии радиоастрономии, телекоммуникации и спектроскопии. Описывается постановка задачи исследований и взаимосвязь полевых и лабораторных исследований прозрачности атмосферы. Обосновывается общий подход к выбору тематики и проводимым исследованиям. Отмечается необходимость комплексного подхода к исследованиям прозрачности атмосферы, что определяет задачи модернизации соответствующей аппаратуры и разработки методики.

**Во второй главе** описывается модернизация, калибровка и разработка узлов радиометрических комплексов МИАП-2 для полевых исследований прозрачности атмосферы. Описывается разработанная методика обработки данных и её валидация.

**Третья глава** посвящена модернизации криогенного резонаторного спектрометра миллиметрового диапазона для лабораторных исследований прозрачности атмосферы.

**В четвёртой главе** объединены результаты лабораторных и полевых исследований прозрачности атмосферы. Приводятся результаты измерений астроклимата и этапов развития сопутствующих методов.

## **ГЛАВА 1 Полевые и лабораторные исследования условий распространения радиосигналов СубТГц диапазона частот в атмосфере Земли**

### **1.1 Роль СубТГц диапазона частот для развития спутниковой телекоммуникации, радиоастрономии и спектроскопии**

Обычно термину «ТГц волны» соответствует диапазон электромагнитных волн с частотой от 1 до 10 ТГц, следовательно СубТГц диапазон составит 0.1 – 1 ТГц. [9]. В категориях длин волн обычно определяют «миллиметровый» диапазон, т.е. волны длиной от 1 до 10 мм, а Субмиллиметровый составит от 0.1 до 1мм. В настоящей работе, с привязкой к решаемым задачам, речь пойдёт о диапазоне от 30 ГГц, где начинается осязаемое поглощение волн в атмосферных компонентах, до сотен ГГц, где заканчиваются интересы радиоастрономии и начинаются интересы ИК-инструментов. Стоит отметить, что в этом диапазоне наблюдаются самые интересные эффекты в астрофизике (отчасти из-за явления «THz GAP»[10]): Космический микроволновый шум, оставшийся от Большого взрыва; процессы формирования и развития звёзд; следы ранее невидимых космических объектов; эффект Сюняева-Зельдовича; процессы динамики джетов в квазарах и многие другие. В этом диапазоне самое интенсивное молекулярное поглощение в компонентах атмосферы, что определяет практические задачи спектроскопии мм диапазона: расчёт радиотеплового баланса Земли при использовании моделей поглощения в атмосфере [11]. Поглощение излучения СубТГц диапазона также ставит задачи исследования свойств самой атмосферы методами дистанционного зондирования [12, 13] и создания аппаратуры для этих целей [14, 15]. Развитие приёмной аппаратуры и инструментов СубТГц диапазона также необходимо для космических телекоммуникаций [2, 16] и систем безопасности [9].

Находясь на этапе освоения новых границ и свойств природы мы вынуждены работать и решать задачи в рамках крупных проектов, таких как МИЛЛИМЕТРОН, OPLIMPO [17, 18], Радиоастрон [19], ESMT [20], Программа развития наземной инфраструктуры для радиоастрономии, Программа развития Арктики, Программа перспективных научных исследований и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики, задачи международных сообществ IEEE, URSI и другие [21, 22]. Следует отметить существенное отставание России в вопросах научно-технических разработок в области СубТГц диапазона частот. Потребности этих проектов определяют фронт исследований, которые необходимо провести, в том числе в части исследования прозрачности атмосферы. Астрофизические исследования и задачи развития космических телекоммуникаций в СубТГц диапазоне требуют постройки новых наземных инструментов и модернизации старых для работ

в этом диапазоне. Эти задачи невыполнимы без предварительного исследования астроклимата [23, 24]. Подробнее о направлениях развития аппаратуры и методик исследований астроклимата изложено в разделе 1.2 и в Главе ГЛАВЕ 2.

Привязка радиометрических измерений реальной атмосферы к метеопараметрам частично решается при помощи моделей атмосферного поглощения, например МРМ Liebe [25]. Эта модель, в свою очередь, базируется на экспериментальных данных спектральных характеристик атмосферных газов. Часть данной работы посвящена развитию аппаратуры для лабораторных исследований прозрачности атмосферных газов в СубТГц диапазоне с использованием методов резонаторной спектроскопии. [1] Эти методы хорошо известны, однако аппаратура для их реализации, применительно к исследованиям атмосферных газов в широком диапазоне температуры и давления, требует разработки новых инженерно-технических решений, в полной мере представленных в тексте диссертации.

Для решения прикладных задач спектроскопии требуется высокая точность моделей поглощения и заложенных в них спектроскопических данных. Даже небольшие ошибки могут привести к значительным неопределённостям в интерпретации результатов экспериментов по дистанционному зондированию Земли, расчётов теплового баланса планеты и других прикладных задач. Спектрометры СубТГц диапазона для исследования газов бывают различной конфигурации: спектрометры с радиоакустическим детектированием поглощения (РАД), резонаторные и видеоспектрометры, и другие. Преимуществом резонаторных спектрометров является, в том числе, большая длина пробега излучения при сравнительно небольших размерах чувствительного элемента. Это обеспечивает ему высокую чувствительность даже к слабому поглощению при возможности сохранения стабильности параметров исследуемой среды (температуры, давления, влажности). Процесс измерения спектров занимает от нескольких минут до нескольких часов, в течение которых параметры среды могут измениться, поэтому вопрос их стабильности стоит для спектроскопии весьма остро. Обеспечение стабильности параметров среды внутри и вокруг спектрометра во времени, а равно как и скорость снятия спектра являются одними из основных факторов, ограничивающих точность спектрометра. [1] Скорость снятия спектра обеспечивается путём автоматизации измерений (Раздел 3.3). При работе с широкополосными квазиоптическими элементами так или иначе возникает паразитная интерференция и рассогласование элементов. При использовании плёночной связи, размер пятна поля резонатора на пленке связи определяет размер возбуждающего луча. Для эффективного возбуждения эти размеры должны совпадать и должно выполняться согласование фазовых фронтов возбуждающего луча и поля в резонаторе. Это задается, соответственно, выходным диаметром и длиной рупора, который формирует возбуждающий луч из основной моды прямоугольного волновода. [26] Таким образом, задача расчёта и оптимизации волновых пучков

в таких спектрометрах также направлена на повышение чувствительности (Раздел 3.2).

В настоящей работе ставится задача разработки и реализации инженерно-технических решений, направленных на улучшение чувствительности, диапазона рабочих температур и других параметров спектрометра на примере резонаторного спектрометра, разработанного в ИПФ РАН [27–30]. Резонаторный спектрометр миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов впервые спроектирован в том виде, в котором он работает по настоящее время в 2008 году [31], и с тех пор он уже прошёл несколько этапов модернизации.

Поглощение волн в атмосфере в основном определяется, как сумма поглощения в кислороде, парах воды и в облаках. Меньшее влияние оказывают различные микропримеси, атмосферный озон и пр. Взаимосвязь этих величин хорошо известна для стационарных условий, это исключает нужду в новых лабораторных исследованиях, однако в реальной атмосфере возникают нюансы. Четвёртая глава посвящена компиляции результатов полевых и лабораторных исследований прозрачности атмосферы. Компиляция экспериментальных данных позволяет на практике выявить взаимосвязь величины поглощения в основных компонентах атмосферы с метеопараметрами, определяющими астроклимат.

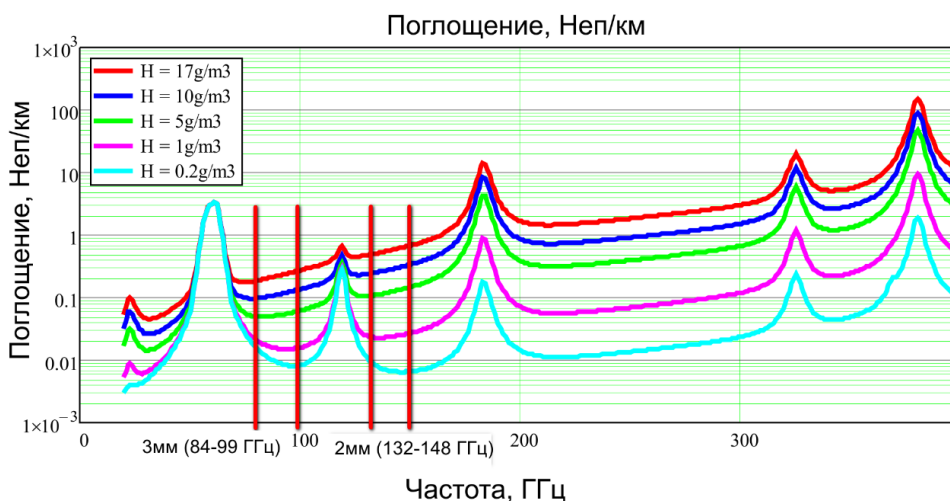
## **1.2 Задачи и методы полевых исследований условий распространения радиосигналов**

### **СубТГц диапазона частот в атмосфере Земли**

Условия распространения радиоволн СубТГц диапазона через атмосферу Земли влияют на качество связи с искусственными спутниками Земли и качество получаемых радиоастрономических изображений. Совокупность атмосферных условий, влияющих на условия распространения сигнала в атмосфере, называется астроклиматом. Задача исследования астроклимата актуальна, как для поиска новых мест для астрономии и спутниковой связи [23, 32, 33], так и для уже построенных инструментов с целью расширения их возможностей [6, 34–36], для анализа текущих параметров [37] или для корректировки рабочего диапазона частот на этапе проектирования обсерватории [38]. В каждом случае эта задача решается разными методами с разной аппаратурой: зачатую сам телескоп позволяет провести оценку прозрачности атмосферы [39, 40]. На действующих обсерваториях и станциях космической связи устанавливают автоматические комплексы для мониторинга состояния атмосферы: коммерчески доступные метеорологические инструменты [41], спектрофотометры [42] и профилометры [43, 44], а также специализированные инструменты, например [45, 46]. Радиометры космического базирования решают самые разнообразные задачи дистанционного зондирования Земли [47].

Особо интересен и в последнее время популярен СубТГц диапазон для задач дистанционного зондирования атмосферы [48]. Однако, ряд спектральных линий атмосферных компонент, главным образом вода и кислород, делают невозможным наземные астрономические

наблюдения в коротковолновой части диапазона и вносят заметное поглощение в длинноволновом участке этого диапазона. В СубТГц диапазоне все же имеется ряд окон



прозрачности (3 мм, 2 мм, 1.3 мм, 0.8 мм и т.д.), в которых и ведутся исследования с наземных телескопов (Рисунок 1.1).

Рисунок 1.1 – Спектр коэффициента поглощения волн СубТГц диапазона в атмосфере при стационарных условиях при различной абсолютной влажности [7].

В зависимости от назначения, радиометрические системы СубТГц диапазона настраивают либо на окна прозрачности, либо на склон линии поглощения. Когда необходимо знать свойства конкретной компоненты атмосферы, радиометрическая система настраивается на её характерную молекулярную линию поглощения, к примеру озона [49, 50]. Зачастую спектрометрические системы имеют несколько спектральных каналов, расположенных, к примеру, на склоне линии молекулярного поглощения кислорода [51] или воды [46]. Это позволяет, к примеру, получить профиль температуры в атмосфере [52]. В спектрометрах, как правило, используются узкополосные супергетеродинные приёмники. Наличие в них возможности частотного сканирования позволяет построить шумо-частотную характеристику вклада атмосферы. Узкополосные приёмники [53] позволяют оценить поглощение на конкретной частоте и в этом смысле работа с ними проще, поскольку нет необходимости в оценке эквивалентной частоты (см. раздел 4.2). Однако, узкополосные приборы проигрывают широкополосным по чувствительности. Эта аппаратура продуктивна для исследования метеорологических свойств атмосферы, например построения профиля температуры в тропосфере. Для широкополосных задач радиоастрономии и спутниковой телекоммуникации, форма линии поглощения играет вторичную роль и важно интегральное ослабление во всём окне прозрачности. Таким образом, широкополосный радиометр даёт оценку реальной картины прозрачности атмосферы, которая будет востребована для широкополосных задач радиоастрономии и телекоммуникации. У широкополосных радиометров, в свою очередь, тоже



есть свои недостатки, некоторые из которых рассмотрены в разделе (2.2.5).

Так или иначе в радиометрических системах встаёт вопрос калибровки и модуляции входного сигнала. В СубТГц диапазоне применяются квазиоптические модуляторы [49] или полупроводниковые структуры в волноводе основного сечения, т.н. модуляторы-калибраторы [54]. Квазиоптические модуляторы, как правило, больше в габаритах, чем их твердотельные аналоги, что затрудняет их использование в экспедиционной аппаратуре. Полупроводниковые модуляторы-калибраторы, выполненные в волноводе основного сечения, тоже имеют свои недостатки. Ввиду технологических ограничений, они хорошо работают только до частот порядка 150ГГц и требуют регулярной повторной калибровки. Вопросам калибровки и модуляции входного излучения посвящён раздел (2.2.4) в настоящей работе.

При разработке радиометров особое внимание уделяется термостабилизации элементов волноведущего тракта [55] и практика показала, что чем меньше элемент (или набор элементов), требующих термостабилизацию, тем проще её реализовать. Иногда в атмосферных радиометрах используют сверхпроводниковые приёмные структуры, тогда система термостабилизации должна поддерживать температуру в несколько Кельвин [56]. Заслуживает особого внимания экспедиционная аппаратура, поскольку к этим инструментам предъявляются высокие требования портативности, надёжности и ремонтпригодности. [57] В этом смысле лишние подвижные элементы (например, система наведения или квазиоптический модулятор), системы общей термостабилизации, а также лишние составные блоки и вес аппаратуры нежелательны. При разработке экспедиционной аппаратуры необходимо обеспечить её системой удалённого доступа, обеспечивающей не только удалённый контроль, но и автоматическое включение системы и выход её на связь в случае аварийного отключения. (см. раздел 2.2.2)

Известные методы измерения прозрачности атмосферы (см раздел 2.1.1) имеют свои недостатки, поэтому совершенствование методик расчёта параметров атмосферы по данным наблюдений является актуальной задачей радиофизики [52]. При этом нестабильность атмосферы является одним из основных источников шумов и погрешности [58]. В частности, использование метода «атмосферных разрезов» [59] в неоднородной атмосфере приводит к катастрофической ошибке измерений, а разработка радиометрической аппаратуры сталкивается с проблемами калибровки и реализации модуляционного режима. Совершенствование методики измерения и математических алгоритмов пост-обработки данных помогают повысить точность радиометрических измерений. [60] Значительная часть данной работы посвящена разработке методики измерения астроклимата в полевых условиях (2.3).

При выполнении натурных измерений новыми приборами, для оценки их работоспособности, полезно сравнивать измерения с результатами модельных расчётов и калиброваться по ним [61, 62]. Однако и модели, и спектральные измерения, на которых

основываются эти модели, в СубТГц диапазоне также являются предметом научного поиска [63]. Вторая часть работы посвящена модернизации спектрометра для исследований прозрачности атмосферы в лабораторных условиях.

### **1.3 Задачи и методы лабораторных исследований спектральных характеристик прозрачности атмосферы в СубТГц диапазоне**

Прецизионные измерения спектральных характеристик атмосферных газов с СубТГц диапазоне необходимы для создания и проверки моделей поглощения, например, MPM Liebe [7], HITRAN (High-resolution TRANsmission molecular absorption database) [64], GEISA (Gestion et Etude des Informations Spectroscopiques Atmosphériques = Management and Study of Atmospheric Spectroscopic Information) [65]. Эти модели и их производные (например, [66]) используются для решения практических задач по расчёту теплового баланса Земли, потерь в коммуникационном канале, для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и др. [67]. К задачам дистанционного зондирования, в том числе, относится исследование астроклимата: модельные расчёты позволяют привязать прозрачность атмосферы к метеорологическим (давление, температура, влажность) и геофизическим (высота над уровнем моря) параметрам. Чувствительность спектрометра является ключевым показателем, она зависит от многих факторов и определяется спецификой конкретного оборудования. Для спектрометров СубТГц диапазона для исследования атмосферных газов, можно выделить несколько общих критических факторов, влияющих на его чувствительность и точность: собственные потери, стабилизация частоты и частотное сканирование без разрыва фазы, точность измерения амплитуды отклика, точность поддержания условий термобарокамеры (давление, температура и влажность), скорость снятия спектра, механическая стабильность конструкции спектрометра, уровень паразитных отражений по конструкции камеры и другие [26]. Эти факторы в разной степени ограничивают чувствительность любого спектрометра ТГц диапазона, вне зависимости от принципа действия. К примеру, чем больше барокамера, тем сложнее обеспечить в ней стабильные условия. Процесс получения спектров, как правило, состоит из двух циклов измерений: измерения собственной характеристики резонатора (т.н. baseline) и измерения спектра образца. Этот процесс растянут во времени и чем выше стабильность параметров спектрометра (температуры, размеров конструкции и др.), тем выше точность получаемых спектров. С другой стороны, аналогичный эффект достигается путём уменьшения времени измерения спектра. Теоретический предел скорости записи спектра достигается путём сокращения времени простоя чувствительного спектрометра до нуля с одной стороны, и установкой максимальной скорости сканирования по частоте – с другой [26]. В настоящей работе рассматривается процесс модернизации резонаторного спектрометра СубТГц диапазона, но, при должном подходе, предложенные

разработки могут быть применены на спектрометре любого типа. Резонаторный спектрометр отличается высокой точностью, широким диапазоном частоты, температуры, давления и влажности. Проблема температурной и механической стабильности касается, пожалуй, всех спектрометров. Для улучшения этих параметров весь спектрометр погружают в масляную ванну или фиксируют на массивной медной раме [1]. Помимо термостабилизации рабочей области спектрометра (резонатор или ячейка), применяют также устройства термостабилизации источника излучения и волноводного тракта. Они, в сочетании с системой ФАПЧ, позволяют добиться максимальной стабильности частоты излучения и волнового «портрета» спектрометра, определяющего уровень паразитной интерференции. Поскольку картина интерференции непостоянна во времени (от эксперимента к эксперименту), она не вычитается с собственной характеристикой спектрометра и тем самым вносит дополнительные шумы в запись спектра. Источником интерференции являются элементы квазиоптического тракта: герметичные окна термобарокамеры, элементы связи и пр.

В настоящее время разработанный в ИПФ РАН резонаторный спектрометр является продуктом постоянной модернизации, на каждом из её этапов улучшались те или иные эксплуатационные показатели спектрометра. Первые измерения лабораторной атмосферы проходили на резонаторном спектрометре в 1999г. [28]. При этом чувствительный элемент – резонатор Фабри-Перо – находился в открытом виде на лабораторном столе, и условия измерений соответствовали комнатным. Дальнейшее развитие этого прибора позволило расширить диапазон сначала температуры, а потом температуры, давления и влажности измеряемого воздуха. Первое простое инженерное решение позволило получить собственную характеристику ненагруженного резонатора с достаточно большой точностью: квазиоптический резонатор закрыли полиэтиленовым пакетом, заполненным инертным газом или сухим азотом. [68] Однако, эти измерения были весьма ограничены в диапазоне температуры и влажности, и, кроме того, стабильность поддержания температуры определялась температурой в комнате, а потом в кунге (лабораторный вагон) на крыше ИПФ. Поэтому вскоре возникла концепция «двух резонаторов» и установка, часто называемая «холодильник». Это один из примеров применения простых и эффективных инженерных решений для получения хорошего научного результата: два резонатора, помещённых в корпус обычного бытового холодильника, решали проблему осаждения влажности на зеркалах: величина поглощения волн на «запотевшем» зеркале просто вычиталась в ходе обработки. Корпус бытового холодильника выступал в роли термостата, в котором поддерживались стабильные условия по температуре и влажности [69]. (Рисунок 1.2) Это позволило получить результаты мирового уровня в части спектроскопии атмосферы мм диапазона, в том числе был экспериментально измерен разрешённый спектр димера воды в мм диапазоне [26, 70].



Рисунок 1.2 – Резонаторный спектрометр с измерительным элементом в холодильном шкафу и в полиэтиленовой ёмкости [69].

Дальнейшее развитие эта установка получила благодаря серии международных проектов, в том числе в проекте «МИЛЛИМЕТРОН» [71]: для проектирования его зеркальной системы, было необходимо точно знать потери на отражение от металлов, металлизированных поверхностей и сверхпроводников при криогенных температурах, т.е. от 4К. Очевидно, для реализации криогенных температур, корпуса бытового холодильника в качестве термостата стало недостаточно. В настоящей работе рассматривается модернизация резонаторного спектрометра, направленная на реализацию ряда важных экспериментов для проекта «МИЛЛИМЕТРОН». В ходе модернизации была сконструирована вакуумная камера, которая вмещала оба резонатора в медном кожухе, а криогенная машина замкнутого типа обеспечила температуру до 4К на образце. [72] В дальнейшем вакуумная камера была модернизирована до термобарокамеры, в которой по настоящее время проводятся измерения атмосферных газов в широком диапазоне температур и давлений. Процесс совершенствования этой вакуумной камеры продолжается до сих пор. В ходе эксплуатации всегда возникали новые пути улучшения эксплуатационных параметров оборудования. Приведём работы, которые были выполнены в ходе подготовки настоящей диссертации и подробнее описаны в главе 3.

#### 1.4 Выводы к главе 1

Таким образом, исследователи и разработчики приёмо-передающей аппаратуры ТГц диапазона встречаются с рядом физических ограничений, свойственных природе распространения этих волн. Эти ограничения, в частности, связаны с потерями ТГц излучения на пути следования от источника к приёмнику: в атмосфере Земли и в волноведущих структурах. Настоящая работа призвана внести свой вклад в развитие индустрии ТГц волн в части разработки аппаратуры и методов для исследования потерь ТГц волн. Такие приборы не производятся промышленно, поэтому их разработка сама по себе является научно-исследовательской задачей,

представленной в настоящей работе на примере модернизации радиометрического комплекса МИАП-2 (глава 2) и резонаторного спектрометра (глава 3). Методы исследования потерь излучения в атмосфере Земли известны с середины 20 века, но они не лишены недостатков. Совершенствование этих методов приводит к появлению новых методик, одна из которых представлена в настоящей работе на примере методики обработки данных, полученных методом атмосферных разрезов (глава 2).

Разработка аппаратуры не имеет смысла без её практического применения для нужд фундаментальной и прикладной науки, хотя определенная фундаментальная компонента и самостоятельная научная значимость содержится и в разработке новых приборов и методик. Важна и задача полевых испытаний, которые позволяют выявить и ликвидировать недостатки создаваемой аппаратуры. Полевые испытания и измерения, выполняемые на разработанной аппаратуре в течение 9 лет (с 2012 по 2021гг), представлены в главе 4. Более подробно обзор научных задач в области разработки аппаратуры ТГц диапазона представлен в обзорных статьях [73, 74].

## **ГЛАВА 2 Модернизация и калибровка радиометрических комплексов «МИАП-2»**

Глава посвящена модернизации радиометрических комплексов МИАП-2 (Микроволновый Измеритель Атмосферного Поглощения 2-х канальный). Всего было изготовлено два аналогичных прибора: первый - в 2011 году для обсерватории «Суффа», а второй – в 2012 году для экспедиции на г. Мус-Хая (Якутия). В ходе эксплуатации обоих комплексов проводились различные работы по модернизации и ремонту, однако большая часть Главы 2 посвящена второму комплексу МИАП-2 (Мус-Хая), используемому нами в экспедициях. К примеру, до модернизации второй комплекс работал только в одноканальном режиме (3мм) и только в помещении при постоянном присмотре специалиста. После модернизации, завершённой к экспедиции на Северный Кавказ в 2020 году, получился экспедиционный инструмент с метеостанцией, способный работать автономно под открытым небом в экстремальных метеоусловиях в течение продолжительного времени – более года.

### **2.1 Метод измерений и принцип работы радиометрического комплекса МИАП-2**

Существует несколько способов определения оптической толщины атмосферы, каждый из них обладает своими преимуществами и недостатками. В данном разделе будет дано общее представление о методах измерений, о принципе работы МИАП-2 и недостатках, которые предполагается разрешить в ходе диссертационной работы.

### 2.1.1 Обзор методов измерения оптической толщины атмосферы в мм диапазоне

Задачу практического определения оптической толщины атмосферы в мм диапазоне можно решить либо путём расчёта по различным моделям при помощи данных аэрозондирования, либо дистанционным, который сводится к определению яркостной температуры атмосферы в определенных участках спектра электромагнитного излучения тем или иным способом. В настоящее время известны три основных методики определения оптической толщины атмосферы:

- Метод Бугера, основанный на измерении интенсивности излучения некоего эталонного внеатмосферного источника (обычно Солнца) при различных зенитных расстояниях до последнего в течение светового дня. Вместе с зенитным расстоянием меняется толщина слоя атмосферы, через который проходит излучение, а по изменению интенсивности излучения можно вычислить оптическую толщину атмосферы.[75]
- Метод «разрезов», основанный на измерении собственного теплового излучения атмосферы под различными углами над горизонтом. (см, например, [59, 76])
- Метод «абсолютного» измерения яркостной температуры под постоянным углом над горизонтом. [77]

Среди представленных, наиболее практичным с точки зрения портативности аппаратуры является метод «разрезов», на котором и основана работа радиометра МИАП-2. Метод Бугера требует точного наведения антенны радиометра на известный внеатмосферный источник, то есть наличия полноповоротной монтировки и её устойчивого крепления. Однако, этот метод позволяет измерить поглощение даже в облачную погоду [78]. Сложность использования метода абсолютных измерений состоит в калибровке сигнала. На низких частотах (примерно меньше 100 ГГц) широко используются калиброванные источники шума, модуляторы-калибраторы и прочие волноводные элементы. Калибровку сигнала на частотах выше 100 ГГц проще реализовать с использованием чернотельных эталонов с известной температурой и коэффициентом серости, при этом переключение производится квазиоптическими механизмами. Для термостатирования эталонов зачастую применяется жидкий азот, требуется хорошая теплоизоляция и отдельный термостат. Наиболее удачным решением калибровки входного сигнала является использование твердотельных модуляторов-калибраторов, установленных в волноводе основного сечения, но сами эти устройства сложны, а их характеристики непостоянны (подробнее в 2.2.4) [54]. Проблема модуляции входного сигнала примерно одинакова для всех методов. Прибор, работающий по методу атмосферных разрезов оказывается наименее прихотлив к способу установки и доставки, он лучше других подходит для автономной работы и вполне ремонтпригоден.

В простейшем случае для определения оптической толщины методом атмосферных

разрезов достаточно использовать приращение радиояркой температуры на двух зенитных углах относительно опорной области с яркой температурой, близкой к термодинамической температуре приземного воздуха (в направлении горизонта). Однако, в радиометре МИАП-2 производится сканирование атмосферы по 5-ти зенитным углам, что, в сочетании с разработанным методом обработки данных, повышает точность измерений оптической толщины. Для создания общего представления о методе «атмосферных разрезов», опишем простейший случай для двух углов.

Величину яркой температуры собственного излучения атмосферы в зависимости от угла возвышения от Зенита можно представить в виде [79]:

$$T_{я}(v, \theta) = T_{cp}(1 - e^{-\tau(v) \sec \theta}) \quad (2.1)$$

где:  $T_{cp}$  – некоторая средняя температура равномерно нагретой атмосферы, дающей в направлении  $\theta$  то же излучение, что и атмосфера с действительным распределением температуры  $T(h)$ . В приближении плоскостной атмосферы, что справедливо при  $\theta \leq 85^\circ$ , получено выражение для  $T_{cp}$  [79]:

$$T_{cp} = \frac{\int_0^\infty \alpha(v, h) T(h) e^{-\int_0^h \alpha(v, h') \sec \theta dh'} \sec \theta dh}{\int_0^\infty \alpha(v, h) e^{-\int_0^h \alpha(v, h') \sec \theta dh'} \sec \theta dh} \quad (2.2),$$

где:  $\alpha(v, h)$  – суммарный коэффициент поглощения.

Для конкретных видов зависимостей  $\alpha(v, h)$  и  $T(h)$ , а именно  $\alpha(v, h) \sim e^{-h/H}$  и  $T(h) = T_0 - bH$  ( $H$  – характеристическая высота,  $b$  – градиент убывания температуры в тропосфере,  $T_0$  – температура приземного воздуха) в работе [80] были получены зависимости:

$$T_{cp} = T_0 - bH \frac{s(\tau)}{e^{\tau \sec \theta} - 1} \quad (2.3)$$

$$T_{я} = T_0(1 - e^{-\tau(v) \sec \theta}) - bH s(\tau) e^{-\tau(v) \sec \theta} \quad (2.4)$$

Здесь: 
$$s(\tau) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\tau^k}{k * k!}$$

В [80] дан расчёт  $T_{cp}$  в зависимости от различных значений  $\tau$ .

Метод «разрезов» для миллиметрового диапазона впервые был рассмотрен в [59]. Он основан на сравнении приращений яркостных температур  $T_{я}(\theta_1, v)$  и  $T_{я}(\theta_2, v)$  двух участков атмосферы при различных зенитных углах  $\theta_1$  и  $\theta_2$  относительно известной температуры некоторой опорной области. В качестве опорной области обычно используют излучение атмосферы в направлении на горизонт, т.е. чтобы яркостная температура атмосферы в направлении антенны была близка к температуре приземного слоя воздуха  $T_0$ . В этом случае выходной сигнал радиометра пропорционален:

$$\varepsilon_0 = T_0(1 - \beta)\eta + T_0^{(\delta)}\eta\beta + T_0(1 - \eta) \quad (2.5),$$

где  $T_0$  и  $T_0^{(\delta)}$  – усреднённые интенсивности фона по телесному углу главного лепестка диаграммы направленности антенны и по остальному пространству соответственно,  $\beta$  – коэффициент рассеяния антенны вне главного лепестка,  $\eta$  – КПД антенны.

Выходные сигналы радиометра в направлении  $\theta_1$  и  $\theta_2$  пропорциональны:

$$\begin{aligned} \varkappa_1 &= T_{\text{cp}}^{(1)}(1 - e^{-\tau(v)\sec\theta_1})(1 - \beta)\eta + T_1^{(\delta)}\eta\beta + T_0(1 - \eta) \\ \varkappa_2 &= T_{\text{cp}}^{(2)}(1 - e^{-\tau(v)\sec\theta_2})(1 - \beta)\eta + T_2^{(\delta)}\eta\beta + T_0(1 - \eta) \end{aligned} \quad (2.6),$$

В этом выражении  $T_{\text{cp}}^{(1)}$  и  $T_{\text{cp}}^{(2)}$  – средние температуры в направлении  $\theta_1$  и  $\theta_2$ ,  $T_1^{(\delta)}$  и  $T_2^{(\delta)}$  – температуры, описывающие фоновые шумы антенны.

Для нахождения  $\tau(v)$  составим отношение:

$$\frac{\varkappa_0 - \varkappa_1}{\varkappa_0 - \varkappa_2} = \frac{T_0 - T_{\text{cp}}^{(1)}(1 - e^{-\tau(v)\sec\theta_1}) + (T_0^{(\delta)} - T_1^{(\delta)})\frac{\beta}{1 - \beta}}{T_0 - T_{\text{cp}}^{(2)}(1 - e^{-\tau(v)\sec\theta_2}) + (T_0^{(\delta)} - T_2^{(\delta)})\frac{\beta}{1 - \beta}} \quad (2.7)$$

Заметим, что в этом случае необходимо вычислить  $T_{\text{cp}}$ , задавшись определённой моделью атмосферы.

Поправка, определяемая последними членами числителя и знаменателя (2-7) может быть учтена лишь в результате дополнительных измерений, т.к. реальное распределение фона зависит не только от величины поглощения, но и от местных предметов. Кроме того, не известна заранее диаграмма направленности вне главного лепестка.

Метод «разрезов» при всех его достоинствах основывается на т.н. «плоско-слоистой» модели строения атмосферы. В случае наличия примесных газов это может приводить к ошибкам, связанным с неточностью знания распределения поглощающих примесей по высоте. В этом методе атмосфера принимается изотермической, то есть с постоянной температурой по горизонтальным координатам, что может внести (в зависимости от погоды) дополнительную погрешность. Кроме того, модель линейно убывающей с высотой температуры тоже является верной лишь в некотором приближении. А именно – на высоте тропопаузы (10-20км), где ещё есть немного ( $\sim 0,01\text{г/м}^3$ ) водяных паров, температура перестаёт падать с высотой, а в стратосфере напротив, начинает расти. На температурном профиле зачастую наблюдается не только существенная нелинейность, но и т.н. температурная инверсия, когда в нижней тропосфере с увеличением высоты, температура растёт. Все эти явления определяются погодными условиями и вносят свою долю погрешности в общую картину измерений. Однако практика показывает, что суммарная погрешность измерений, проведённых методом «разрезов», при грамотном проведении эксперимента, не превышает 10%.

Методика реализуется различными специализированными и стандартными радиометрическими инструментами. Причем последние могут осуществлять мониторинг атмосферного поглощения практически одновременно с рутинными радиоастрономическими



наблюдениями. Показания прозрачности атмосферы вычисляются, как побочный результат при ведении радиисточника по небосводу под разными углами над горизонтом. Однако наилучшие по точности результаты можно достичь только на специализированном инструменте. Кроме точности, неоспоримым преимуществом специализированного оборудования является возможность проведения предварительных экспедиционных исследований с целью выбора площадки, где пока еще нет ни телескопа, ни радиометра.

Такой инструмент был разработан в ИПФ РАН – ЗАО «Гиком» по заказу Нижегородского технического университета в рамках научной программы Мегагранта (Постановление Правительства РФ № 220 от 9 апреля 2010 г., договор № 11.G34.31.0029). Свои первые экспедиционные измерения этот прибор продемонстрировал летом 2012 года в экспедиции на г. Мус-Хая в Якутии, проводимой по той же программе Мегагранта. Автору настоящей работы принадлежит разработка методики обработки данных астроклимата, модернизация и калибровка комплекса, в том числе доработка его для целей долговременных автономных измерений с учётом особенностей расположения оборудования – под открытым небом, а также организация и участие в нескольких экспедициях по исследованию астроклимата.

Описываемый в данной главе прибор МИАП-2 подробно представлен в публикациях [81, 82] и предназначен для непрерывного мониторинга оптической толщины атмосферы на волнах 2 мм и 3 мм. По этим данным возможна оценка основного параметра астроклимата – влагосодержания атмосферы, что позволяет с определенной степенью точности рассчитать поглощение в других окнах прозрачности мм и субмм диапазонов. Было изготовлено два экземпляра прибора. Первый прибор, после тестовых измерений в Нижнем Новгороде, был установлен на плато Суффа (Узбекистан) в районе площадки строительства радиотелескопа РТ–70 в ноябре 2013г [83, 84] (и ссылки в них). Вторым прибором служит основным измерительным средством в серии из нескольких экспедиций по исследованию атмосферного поглощения в различных точках России и мира - претендентах на установку ТГц телескопа.

Прибор позволяет проводить измерения оптической толщи атмосферы, как методом атмосферных разрезов, так и на основе абсолютных измерений яркостной температуры неба. В обоих методах измеряемой физической величиной является яркостная температура собственного излучения атмосферы, связанная с поглощением через уравнение переноса излучения. Используемые методы измерений и физические принципы, на которых они базируются, подробно описаны в работе [80].

### 2.1.2 Аппаратурный комплекс МИАП-2

Измеритель представляет собой радиометрическую систему, включающую в себя два радиометра (в общем корпусе) на частоты (84 – 99) ГГц и (132 – 148) ГГц, опорно-поворотное устройство (ОПУ) и систему управления, сбора и обработки данных на базе персонального компьютера (ПК) и модуля ЦАП – АЦП с цифровыми вводами и выводами через интерфейс “USB – 4716” фирмы Advantech. Оба радиометра оснащены линзовыми антеннами с коническим облучателем. Линзы изготовлены из фторопласта и ограничены с одной стороны гиперболической поверхностью и плоской - с другой. Апертуры линз – 100 мм и 65 мм в диаметре, а фокусное расстояние – 178.5 мм и 115.5 мм для 3-х мм (84 – 99) ГГц и 2-х мм (132 – 148) ГГц каналов соответственно. Каждая из граничных поверхностей имеет просветление, которое выполнено в виде периодических круговых концентрических канавок (гофр) [85], обеспечивающих коэффициент отражения во всем рабочем диапазоне каждого из радиометров не более 0.5%. Рупорные облучатели представляют собой расфазированные рупора конической формы с изломом. Ширина диаграммы направленности антенн (с линзой) по половинному уровню мощности в обоих диапазонах составляет около 2.5°.

Функциональная схема блока радиометров приведена ниже (Рисунок 2.1). Радиометр диапазона (84 – 99) ГГц состоит из приемника прямого усиления с детектированием на основной частоте. Использование в радиометре приемника прямого усиления позволило в значительной степени избавиться от паразитного сигнала, свойственного супергетеродинным приемникам миллиметрового диапазона со смесителем на входе и обусловленного модуляцией и приемом комбинационных и шумовых составляющих излучения гетеродина. Уровень паразитного сигнала рассматриваемого приемника составляет не более 5 К (приведенный к антенной температуре). Управление модулятором в реальном времени и синхронный сбор данных осуществляются с помощью ноутбука через модуль USB - 4716. Частота модуляции – около 36 Гц. Шумовая температура приемника около 1300 К. Конструктивно приемник выполнен в виде неразборного моноблока, содержащего МШУ на InP чипе, цепь согласования импеданса и детектор на ДБШ (диод с барьером Шоттки) [86–89].

Твердотельный приемник радиометра диапазона (132 - 148) ГГц выполнен по супергетеродинной схеме и собран из дискретных компонентов - гетеродин на диоде Ганна со встроенным умножителем частоты на 2, балансный смеситель на ДБШ, усилитель промежуточной частоты (УПЧ) и детектор диапазона (4 - 8) ГГц.

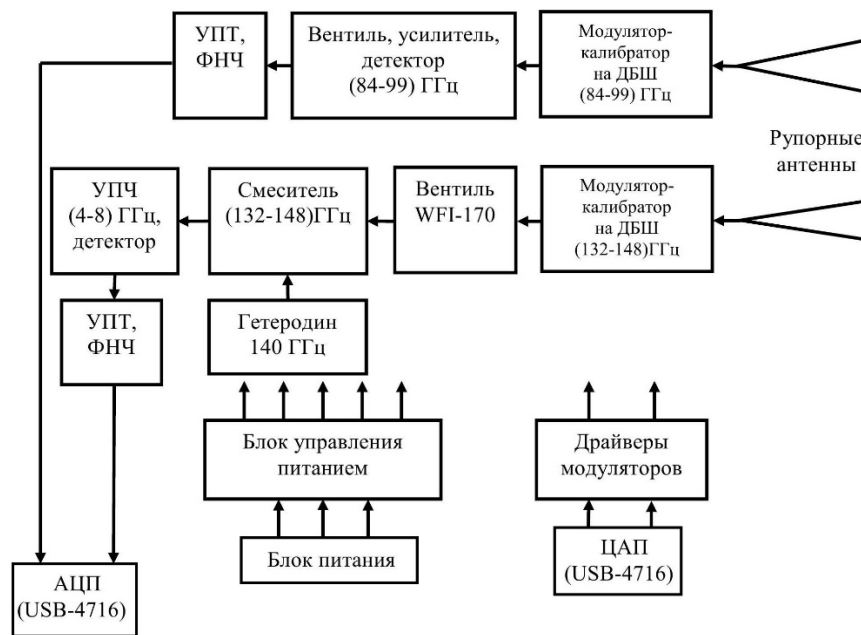


Рисунок 2.1 - Функциональная схема блока приемников [81].

На входе приемника 2 мм установлен широкополосный вентиль WFI-170 производства «Научно-исследовательского института полупроводниковых приборов», г. Томск. Его необходимость продиктована значительным уровнем паразитного сигнала, обусловленного, в основном, недостаточной спектральной чистотой излучения гетеродина, паразитные составляющие которого модулируются модулятором, частично отражаются от антенны обратно в тракт и принимаются аналогично полезному сигналу. Без вентилia приведенный к антенной температуре уровень паразитного сигнала составлял около 400 К, применение вентилia позволило снизить его почти в 10 раз. Шумовая температура радиометра с учетом вклада вентилia и антенного тракта составляет примерно 5800 К.

Усилители постоянного тока (УПТ) и фильтры низкой частоты (ФНЧ) с частотой среза 4.5 кГц служат для согласования уровня и спектра напряжения с выходов квадратичных детекторов с динамическим диапазоном и частотой выборки АЦП модуля USB-4716.

### **Особенности работы модулятора-калибратора (МК) в радиометре МИАП-2.**

Одним из наиболее эксклюзивных и сложных элементов волноводных трактов приёмников является модулятор-калибратор производства «Микран», г. Томск. Модулятор-калибратор (далее - МК) представляет собой микроэлектронный прибор, проходная характеристика которого зависит от поданного на него напряжения. Особенности этой характеристики позволяют закрывать и открывать МК, т.е. осуществлять модуляцию ВЧ-сигнала, а также генерировать калибровочное излучение. Прибор выполнен на основе цепочек последовательно-параллельно включенных диодов с барьером Шоттки (ДБШ), установленных в волноводе основного сечения. Состояние МК зависит от управляющего тока, который подаётся

на него с ЦАП через драйвер. Последний служит для преобразования управляющего напряжения ЦАП в ток модулятора, его стабилизации и защитного ограничения. Модуляторы-калибраторы обоих диапазонов аналогичны и установлены в обоих каналах на входе, управление ими и сбор данных также осуществляются через модуль USB – 4716, модуляция обоих каналов радиометра осуществляется синхронно.

В отсутствие управляющего тока МК открыт, и сигнал с входного рупора подаётся на вход приёмника с минимальными потерями (порядка 1.5 дБ на длине волны  $\lambda=3\text{мм}$ ). В этом состоянии напряжение на выходе УПТ радиометра пропорционально яркостной температуре неба на соответствующем зенитном угле.

При подаче управляющего тока холодной нагрузки  $I_{х.н.}$  (6-8 мА), МК запирается по входу (до 20дБ), а его эквивалентная яркостная температура падает до  $T_{х.н.}$  (155-180 К). Это состояние служит “холодной” точкой калибровки радиометра.

Под воздействием управляющего тока величиной  $I_{закр}$  (60-70 мА) МК сохраняет закрытое состояние, но при этом повышает свою шумовую температуру до 300К и выше. Это состояние служит “тёплой” точкой калибровки радиометра. На рисунке (Рисунок 2.2) представлен общий вид выходной характеристики модулятора-калибратора 3мм диапазона. Характеристика получена при условии, что приёмный рупор радиометра закрыт чёрным телом комнатной температуры. По оси X – управляющий ток МК, по оси Y – яркостная температура, измеряемая радиометром. Градуировка выходного напряжения УПТ проведена путём пропорциональной калибровки по излучению чёрного тела при комнатной температуре (310К) и по температуре жидкого азота (78К).

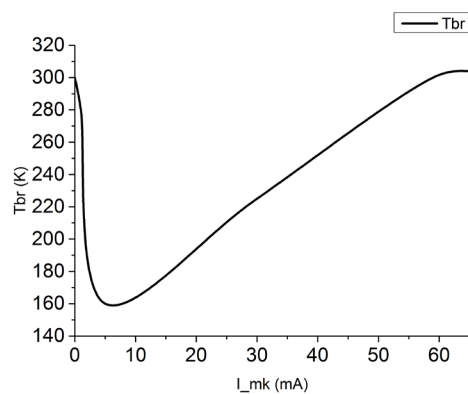


Рисунок 2.2 – Выходная характеристика Модулятора-калибратора 3мм диапазона по результатам оценочных измерений на МИАП-2.

Режим абсолютной калибровки по умолчанию реализован на зенитном угле  $81.36^\circ$ , однако этот параметр можно изменять перед началом измерений. Частота модуляции = 36 Гц, другими словами, модулятор изменяет своё состояние каждые 12 мс. Осциллограммы управляющего

напряжения модулятора и напряжения УПТ в процессе измерений иллюстрируется ниже (Рисунок 2.3).

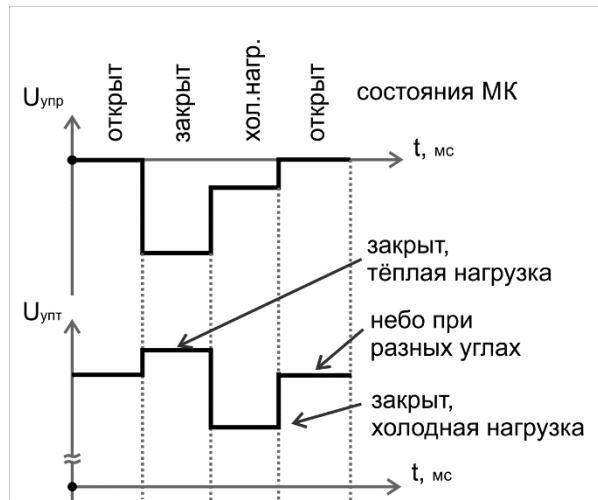


Рисунок 2.3 – Осциллограммы напряжений драйвера МК и УПТ.

При осуществлении атмосферных разрезов приёмник работает в модуляционном режиме, то есть пропускается фаза “холодной нагрузки”. Напряжение УПТ поступает напрямую в АЦП. Режим модуляционного приёма и усреднения сигнала осуществляются программно.

В этом разделе описаны лишь некоторые особенности использования МК в данной модели радиометра, необходимые для данной работы. Подробно принцип работы и конструкция МК на ДБШ описаны в работе [54]. Реальные параметры тока и эквивалентных температур подбираются индивидуально для каждого образца МК, а их первичная калибровка осуществляется по двум внешним согласованным нагрузкам, находящимся при комнатной температуре и при температуре кипящего азота. В рамках диссертационной работы проводилась повторная калибровка МК (описана в разделе 2.2.4).

#### **Система автоматизации измерений.**

Функциональная схема системы автоматизации измерений представлены ниже (Рисунок 2.4). Блок управления питанием имеет систему автоматики, обеспечивающей последовательное включение и выключение питающих напряжений приемников с задержками порядка сотен миллисекунд (по рекомендации изготовителей компонентов).



Рисунок 2.4 - Функциональная схема системы автоматизации [79]

Блок приемников смонтирован на опорно-поворотном устройстве, которое состоит из опорного каркаса, плоского поворотного зеркала овальной формы и системы привода зеркала на базе шагового двигателя (Рисунок 2.5). Управление приводом по заданной программе осуществляется через цифровые порты модуля USB – 4716, пределы изменения зенитного угла наблюдений 0 - 90 градусов, шаг – 0.7 градуса. В рабочем состоянии для защиты от климатических воздействий блок приемников и поворотное зеркало закрываются кожухом из нержавеющей стали с радиопрозрачным фторопластовым окном.

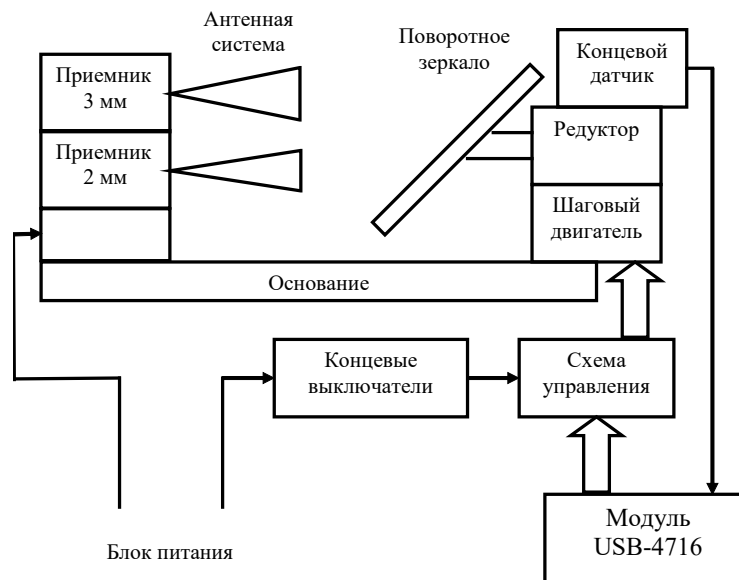


Рисунок 2.5. – Функциональная схема опорно-поворотного устройства. [81]

Система управления, сбора и обработки данных обеспечивает работу комплекса в режиме циклических наблюдений в заданное время (цикл – однократная оценка оптической толщи атмосферы).

Обслуживающая программа позволяет при запуске ввести необходимые данные о требуемых углах наблюдений, времени усреднения данных, длительности наблюдений,

периодичности и продолжительности циклов, метеоусловиях. Далее наблюдения проходят в полностью автоматическом режиме и не требуют присутствия оператора. Зависимость поглощения от времени записывается в текстовый файл, в котором также содержатся данные о параметрах аппаратуры и условиях наблюдений и отображается на экране монитора в виде графиков. Подключение к сети Интернет даёт возможность передать управление радиометром удалённому пользователю при помощи программы TeamViewer или удалённого рабочего стола MS Windows. Эти программные средства позволяют не только программировать радиометрический комплекс на измерения и собирать результаты, но и устанавливать драйвера, устранять ошибки и в целом обслуживать программную часть комплекса в режиме удалённого управления.

Питание комплекса осуществляется от сети 220 В, 50 Гц. Ниже (Рисунок 2.6) приведена фотография смонтированных на ОПУ блока приемников и антенной системы.



Рисунок 2.6 – Внешний вид радиометрических комплексов МИАП-2.

Слева – первый экземпляр МИАП-2, установленный на плато «Суффа».

Справа – второй экземпляр МИАП-2, используемый в экспедициях.

**Постановка задачи** в данном разделе продиктована условиями, в которых должен эксплуатироваться радиометрический комплекс МИАП-2, и состоит в следующем:

- Провести комплексную оценку источников погрешностей и ошибок. Разработать методику обработки данных таким образом, чтобы минимизировать ошибки неоднородности атмосферы и случайный разброс данных.
- Создать метеокomплекс, позволяющий записывать метеопараметры в автоматическом режиме и избавляться от наледи на радиопрозрачном окне.
- Разработать инженерно-технические решения, обеспечивающие сохранность оборудования и возможность ведения измерений под воздействием суровых климатических факторов, таких как осадки всех видов и разной степени интенсивности, ветра до 30 м/с, температуры от -30 до +50 °С и высокой влажности. Защитить чувствительные элементы от

прямого попадания солнечных лучей.

- Обеспечить возможность проведения наблюдений под удалённым контролем через Интернет.
- Провести калибровку прибора по чернотельным эталонам, а также путём сравнения его показаний с показаниями других источников информации (атмосферного зондирования, спутниковых данных, радиометра водяного пара и других источников метеоданных).

## **2.2 Модернизация радиометрического комплекса и сопутствующих систем**

Необходимость в модернизации и обслуживании радиометрического комплекса МИАП-2 (Мус-Хая) возникала перманентно в ходе его эксплуатации. Прежде всего, эти шаги продиктованы условиями эксплуатации: автономная работа под открытым небом в течение длительного времени. Совершенствовалась и методика измерений, и методика обработки данных с целью получения наиболее достоверных сведений о прозрачности атмосферы. С другой стороны, было необходимо сохранить преемственность измерений, чтобы ранее полученные данные можно было сравнивать с новыми, полученными после модернизации.

### **2.2.1 Оценка погрешностей, связанных с диаграммой направленности рупорной антенны**

При проведении «атмосферных разрезов» важно знать ширину диаграммы направленности (ДН) приёмной рупорной антенны, чтобы наиболее оптимальным образом запрограммировать зенитные углы, время накопления и другие параметры наблюдений. Расчёты оптической толщины проводятся при допущении, что градиент яркостной температуры в пределах ДН рупора много меньше приращения яркостной температуры от одного зенитного угла к другому. Рупорные антенны проектировались по методике, изложенной в [90], а линзы к ним - [91], однако их характеристики на практике ранее не проверялись. В настоящем разделе протестирована одна из антенн (3мм диапазона) с целью убедиться в совпадении расчётов с реальной шириной ДН, а также с целью оценки погрешностей, связанных с формой ДН.

Исследуемая рупорная антенна является коническим расфазированным рупором с изломом и корректирующей линзой. Метод определения направленных характеристик таких рупорных антенн подробно описано в [92] и называется «метод вышки». С переходом в мм область спектра его название утратило актуальность, ибо для достижения достаточной точности измерений, нет необходимости устанавливать антенны на вышки, достаточно лишь обеспечение условия дальней зоны и минимума отражений. Условием дальней зоны (зоны Фраунгофера) является выполнение неравенства:



$$r \geq 2 \frac{d^2}{\lambda} \quad (2.8),$$

где:  $r$  – расстояние от источника исследуемой антенны,  $d$  – размер апертуры исследуемой антенны (в нашем случае – диаметр линзы),  $\lambda$  – рабочая длина волны.

Таблица 2.1 – Расчётные параметры рупора диапазона 3мм.

№	Параметр		Диапазон значений	Ед. изм.
1	Длина волны	$\lambda$	0.33	см
2	Ширина ДН главного лепестка (-3дБ)	$\Delta\theta$	2.5	°
3	Уровень боковых лепестков		<20	дБ
4	Диаметр апертуры (линзы)	$d$	10	см
5	Материал линзы - фторопласт	$n_f$	1.41	-
6	Фокусное расстояние	$S$	17.5-18.5	см
7	Коэффициент, отвечающий за форму вершины ДН. (в данном случае плоская)	$n$	1.5, 2.5, 3.5	-

Согласно неравенству (2.8), минимальное расстояние зоны Фраунгофера составляет ~ 6 м. Для оценки параметров ДН, в ИПФ РАН был собран измерительный стенд, состоящий из генератора на ЛОВ, уголкового отражателя и поворотного механизма. Уголкового отражателя расположен на расстоянии порядка 50 м, то есть условие дальней зоны заведомо выполняется.

Схема измерительной установки представлена ниже (Рисунок 2.7). Вся приёмная и передающая аппаратура расположена в одной комнате, а «дальним» источником является уголкового отражатель, расположенный на крыше соседнего здания.

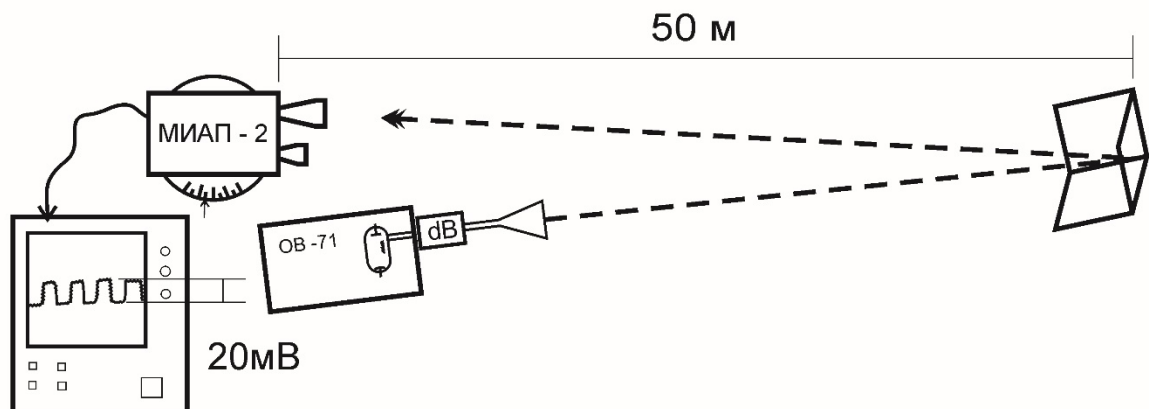


Рисунок 2.7 – Схема измерительной установки ДН рупора [93].

Передача и приём сигнала осуществляется через открытое окно. Источником непрерывного излучения служит генератор на лампе обратной волны ОВ-71 с блоком питания, обеспечивающим относительную стабильность излучения по частоте ( $\pm 0.05$  ГГц). Стабильность

по амплитуде достаточная для проведения измерений в модуляционном режиме. Выход генератора выполнен в виде волновода 3-мм диапазона основного сечения 1.2 x 2.4 мм, в котором распространяется основной тип волны. На выходе источника установлен поляризационный аттенюатор со шкалой ослабления 0 – 35 дБ, на котором закреплён пирамидальный передающий рупор. Передающий рупор направляется на угловой отражатель, который отражает сигнал ровно в обратную сторону, то есть обратно в окно (Рисунок 2.8). На таком отдалении при размере углового отражателя 40 x 40 см, он является точечным источником, то есть формой ДН передающей антенны можно пренебречь. Отражённый обратно сигнал измеряется при помощи исследуемого радиометра, который включён в режим модуляционного приёма и подключён к осциллографу. Сигнал отображается на экране осциллографа в виде меандра, амплитуда которого пропорциональна напряжению на детекторе 3-мм канала. Радиометр закреплён на поворотной площадке с градусным нониусом. Точность установки угла  $\sim 10'$ .

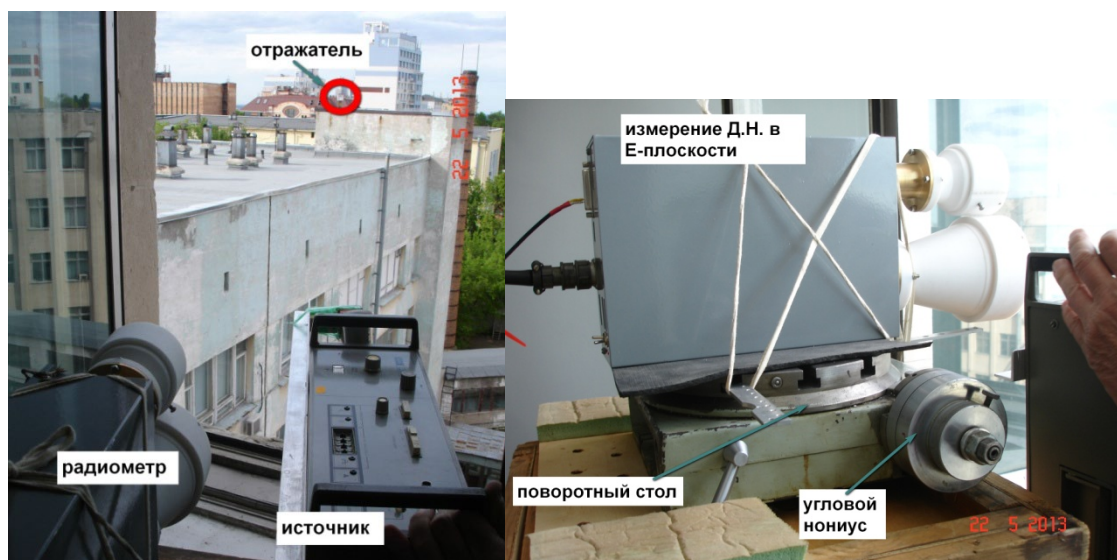


Рисунок 2.8 – Фотографии измерительной установки [93].

Процесс измерения ДН состоит из нескольких этапов. В первую очередь производится визуальная юстировка передающей и приёмной антенн на отражатель. Затем производится окончательная юстировка по максимуму сигнала: сначала передающую антенну, затем приёмную. Прежде чем начать запись точек, необходимо провести обзорное «сканирование» диаграммы чтобы убедиться в наличии сигнала основного лепестка и первых боковых лепестков, узнать положение первых и вторых «нулей» ДН. Далее производится запись точек через каждые  $30''$  начиная с первого «нуля». Для исключения влияния нелинейности вольт-ваттной характеристики детектора на результат эксперимента, выходной уровень сигнала с радиометра поддерживается постоянным на уровне 20 мВ при помощи аттенюатора на передающей антенне, а его показания записываются. В данном случае очевидна линейная связь переданного и принятого сигналов,

поскольку коэффициент отражения углового отражателя не зависит от падающей на него мощности. Таким образом получается таблица показаний аттенюатора от угла поворота приёмника. Далее эта таблица нормируется и размещается на графике вершиной ДН в «0». Ниже (Рисунок 2.9) отображены результаты построения диаграмм направленности в плоскости Н на 2-х частотах – 85 и 90.5 ГГц. Каждая из диаграмм снималась дважды: слева направо и наоборот. Повторяемость результатов позволяет сделать вывод о достаточной стабильности генератора по мощности в процессе измерений. На значениях около  $-7$  град и  $+6$  град. наблюдаются некие нестационарные интерференционные выбросы на уровне  $-20$  дБ. Они, вероятнее всего, связаны с паразитными отражениями сигнала в помещении. В плоскости Е были получены аналогичные результаты.

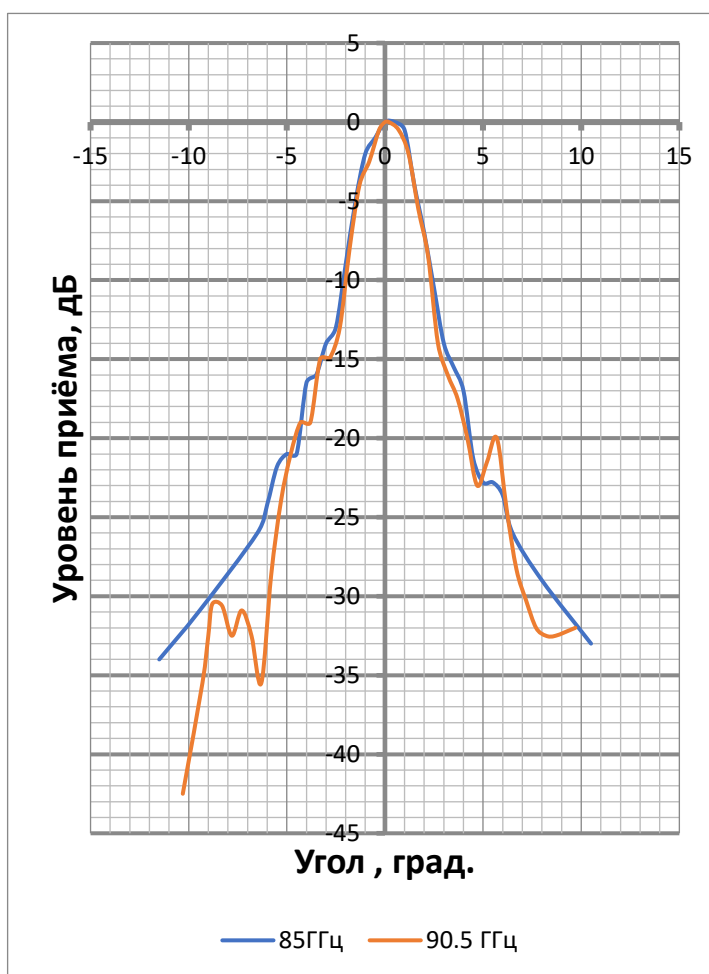


Рисунок 2.9 – ДН в плоскости Н на частотах 85 и 90.5 ГГц [93].

Уровень первых боковых лепестков ДН настолько мал, что мощности передатчика оказалось недостаточно для того, чтобы их обнаружить. Учитывая диапазон работы аттенюатора, они не превышают  $-35$  дБ, что лучше, чем расчётный параметр (Таблица 2.1). Для оценки наихудших параметров антенной системы далее рассматривается ДН, взятая на нижней частоте – 85 ГГц.

ДН аппроксимирована функцией Гаусса со следующими параметрами:

$$A(\theta) = a \cdot e^{-b(\theta-c)^2} + d \quad (2.9)$$

где:  $a = 29.58$ ;  $b = 0.0682$ ;  $c = 0$ ;  $d = -29.6$ ;

а также функцией «Синус Котельникова»:

$$A(\theta) = a \frac{\sin(b\theta)}{\theta} + c \quad (2.10)$$

где:  $a = 50$ ;  $b = 0.52$ ;  $c = -26.8$ ;

Из (2.9) и (2.10) легко найти ширину ДН: она составляет  $2.49^\circ$  и  $2.77^\circ$  соответственно. С учётом относительно небольшой точности измерений в целом, это хороший результат, совпадающий с техническим заданием (см Таблица 2.1).

Ниже построены аппроксимирующие кривые ДН вместе с результатами измерений. На нижнем графике приведён остаток после аппроксимации. Усреднённая ошибка аппроксимации по Гауссу составляет 0.59 дБ, а по  $\sin(x)/x$  – 0.75 дБ, поэтому в дальнейшей работе будем ориентироваться на аппроксимацию по Гауссу.

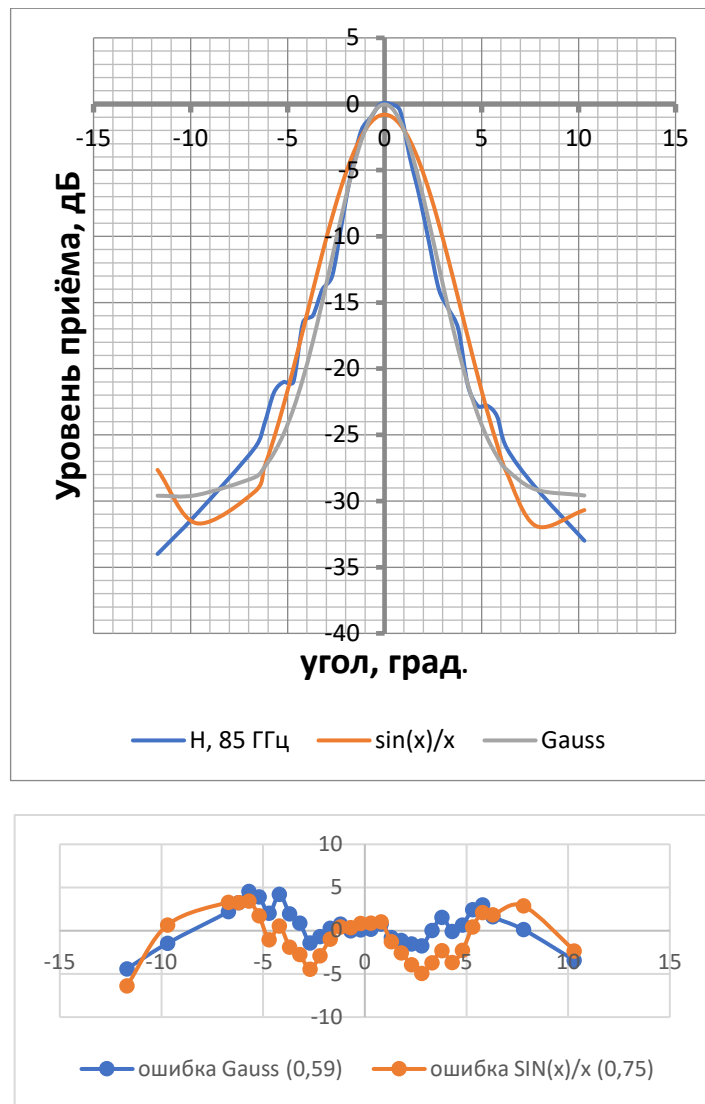


Рисунок 2.10 – Вверху: аппроксимация ДН. Внизу: остаток от аппроксимации.

В процессе измерений оптической толщины методом атмосферных разрезов предполагается, что градиент яркостной температуры по пятну зрения антенны пренебрежимо мал [77]. Для проверки этого, построим свёртку Гаусса ДН с яркостной температурой в зависимости от угла места:

$$dT(\theta, \tau) = \frac{\int_{-1.25}^{1.25} P(\varphi) T(\varphi - \theta, \tau) d\varphi}{\int_{-1.25}^{1.25} P(\varphi) d\varphi} \quad (2.11)$$

где  $dT(\theta, \tau)$  – ошибка усреднения яркостной температуры по углу, К

$P(\varphi)$  – доля мощности ДН, отн.ед (от 0 до 1)

$T(\theta, \tau)$  – яркостная температура неба на разных углах (ф-ла (2.1)), К

$\varphi$  – угол отстройки ДН, град

$\theta$  – зенитный угол, град.

На рисунке ниже (Рисунок 2.11) представлена зависимость (2.11) для разных значений оптической толщины. Видно, что в пределах используемых углов абсолютное значение

отклонения яркостной температуры в пятне от температуры в точке не превышает  $\pm 3$  К, т.е. не больше 10 %, а в среднем она меньше 0.1 К.

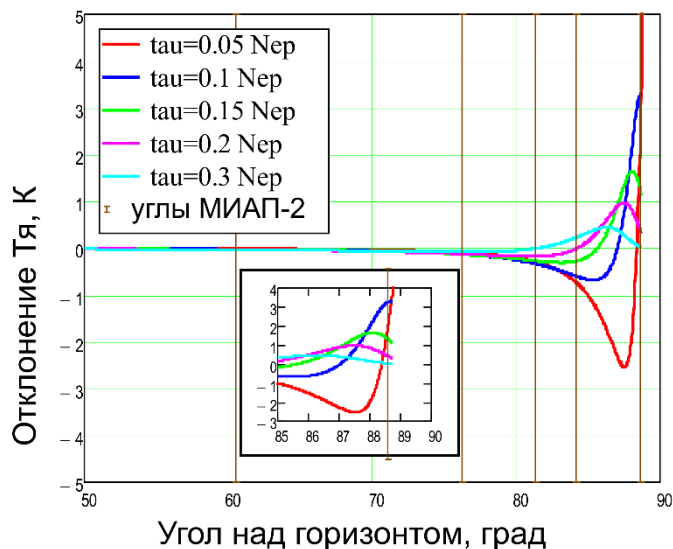


Рисунок 2.11 – Ошибка по яркостной температуре в зависимости от угла места.

Расчёт оптической толщины производится по всем 6-ти углам (включая Зенит), поэтому даже относительно большие (в пределах 10 %) отклонения значений яркостной температуры на нижнем угле ( $88.6^\circ$ ) вносят минимальную погрешность в результат вычислений.

При расчёте оптической толщины также не учитывается сферическая форма атмосферы, при которой яркостная температура на нижних углах отличается от экспоненциальной (формула (2.1)). Опыт работы с МИАП-2 показывает, что погрешности определения оптической толщины, возникающие из-за сферичности атмосферы и из-за усреднения яркостной температуры в пятне зрения антенны, пренебрежимо малы по сравнению с остальными факторами. Одними из ключевых факторов, вносящих погрешность, является облачность, неоднородность атмосферы, а также шум элементов самого приёмника.

### 2.2.2 Система удалённого доступа и жизнеобеспечения прибора при автономной работе под воздействием жёстких климатических условий

Для осуществления долговременных циклов мониторинга необходима организация удалённого доступа, поскольку постоянно находиться в месте наблюдений зачастую невозможно, тем более что в этом нет острой необходимости. Изначально этот прибор проектировался для работы в условиях лаборатории (т.е. комнатных) и под наблюдением. Этот раздел посвящён разработке в внедрению систем, позволивших превратить этот лабораторный прибор в полноценный экспедиционный инструмент, обладающий достаточной степенью автономности. Разработка этих систем велась последовательно, и по мере накопления опыта внедрялись те или иные доработки. В конечном итоге, за всё время наблюдений в режиме

удалённого доступа (около года каждый цикл) наблюдалось лишь несколько нештатных случаев, требующих присутствия оператора, большинство из которых связано с перебоями в электроснабжении или сети Интернет (т.е. связаны с внешними факторами). Также наблюдались программные сбои. Они связаны в первую очередь с ошибками в драйверах прибора USB 4716, возникающих при продолжительной работе. Кроме того, наблюдалось несколько случаев частичного или полного выхода из строя дискового накопителя (винчестера) ПК. Их можно объяснить пониженным давлением на высоте более 2км. Эти обстоятельства послужили хорошим опытом для будущих доработок.

В качестве программного обеспечения, реализующего удалённое управление, используется бесплатная версия программы TeamViewer 10 и/или функция удалённого рабочего стола MS Windows. Это позволило управлять измерениями и собирать результаты в любое время из любого места, при наличии связи с сетью Интернет. Подобная схема была реализована впервые на обсерватории САО РАН в 2014 году [94] и открывает большие перспективы для дальнейших исследований. На рисунке ниже (Рисунок 2.12) представлен интерфейс удалённого управления. Это окно отображает рабочий стол компьютера управляющего радиометром с интерфейсными окнами программы управления.

Для проведения долгосрочных автономных измерений была проведена герметизация корпуса радиометров и теплоизоляция всего прибора. В результате удалось уменьшить колебания температуры внутри прибора, что положительно сказывается на стабильности работы модуляторов-калибраторов и других элементов радиометров. Спроектирован и изготовлен воздушный обогреватель, который позволяет избавиться от снега и наледи на радиопрозрачном окне прибора. Обогреватель изготовлен из 8-ми резисторов и 2-х вентиляторов на алюминиевой раме, он обеспечивает около 36 Вт тепловой мощности при питании от 12 В. Управляется удалённо через интерфейс метеостанции.

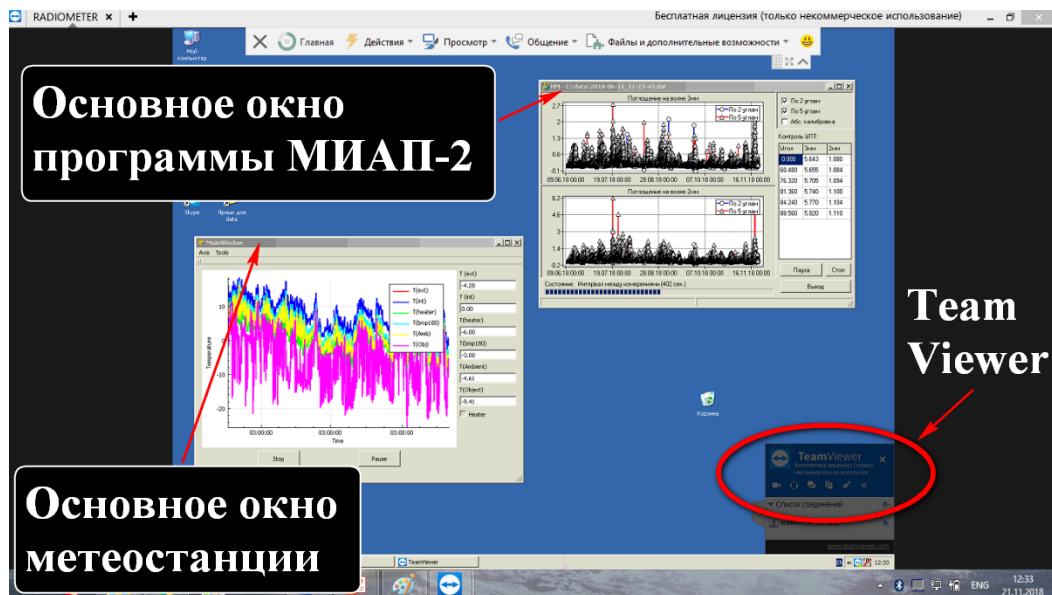


Рисунок 2.12 – Интерфейс удалённого компьютера через программу TeamViewer10.

Модернизация оборудования в части автономности и стойкости к воздействию неблагоприятных погодных условий позволила впервые провести длительные циклы исследований астроклимата мм диапазона на обсерваториях БТА (Северный Кавказ) и Бадары (респ. Бурятия). Измерения в обсерватории БТА САО РАН легли в основу высокорейтинговой статьи [94], а измерения в Бадарах апробированы на четырёх конференциях [95–97] и опубликованы в [98]. Нет сомнений в том, что без успешного применения продуманных инженерных решений было бы невозможно получить столь качественные научные результаты.

### 2.2.3 Автоматический метеорологический модуль радиометра МИАП-2

Для полноценного мониторинга астроклимата недостаточно только измерений прозрачности в атмосфере. В обработке и статистических оценках всегда участвуют данные с различных метеостанций и спутников, дополняя картину оценки астроклимата. Долгое время мы довольствовались лишь данными с ближайших метеостанций, выкладывающих данные в открытые источники. Их отдалённость от точки наблюдений зачастую вносила разногласия в оценке метеоусловий и их связи с прозрачностью атмосферы. Эти обстоятельства продиктовали необходимость создания собственного метеорологического модуля, дополняющего функционал радиометра МИАП-2. Ряд требований, в том числе запись по USB, возможность фиксации облачности, функция управления исполнительными механизмами, а также стоимость коммерческих образцов побудили нас к проектированию и изготовлению собственной метеостанции с расширенным функционалом. Перечень функций метеостанции, принятый на этапе проектирования: измерение температуры, давления и влажности воздуха; фиксация количества осадков и оценка облачности; оценка уровня освещённости; измерение температур



деталей радиометра по термодатчикам; включение и выключение воздушного обогревателя по программируемому сценарию; передача данных и настройка по USB; влагостойкий корпус. Модуль разрабатывался как дополнение к имеющейся аппаратуре и не подразумевает работу отдельно от прибора МИАП-2.

### Схема и принцип действия

За основу электронной части метеостанции был взят стандартный микроконтроллер Arduino NANO, снабжённый периферийными устройствами. Принципиальная схема изображена ниже (Рисунок 2.13). Программирование и передача данных осуществляется через USB с помощью стандартных программ для Arduino. Язык программирования основан на C++. Датчики температуры и влажности воздуха DHT22, датчики температуры Dallas 18b20, ИК-датчик облачности MLX90614ESF и датчик давления BMP180 подключены по цифровым интерфейсам I<sup>2</sup>C, One Wire и Single Wire. Датчики освещённости и дождя собраны на основе компаратора и имеют аналоговый выход (0-5В) и настраиваемый цифровой выход. Модуль реле содержит два отдельных реле, управляемых с логических выходов Arduino. Всё логическое управление и сбор данных осуществляются в Arduino и в ПК передаются только цифровые данные.

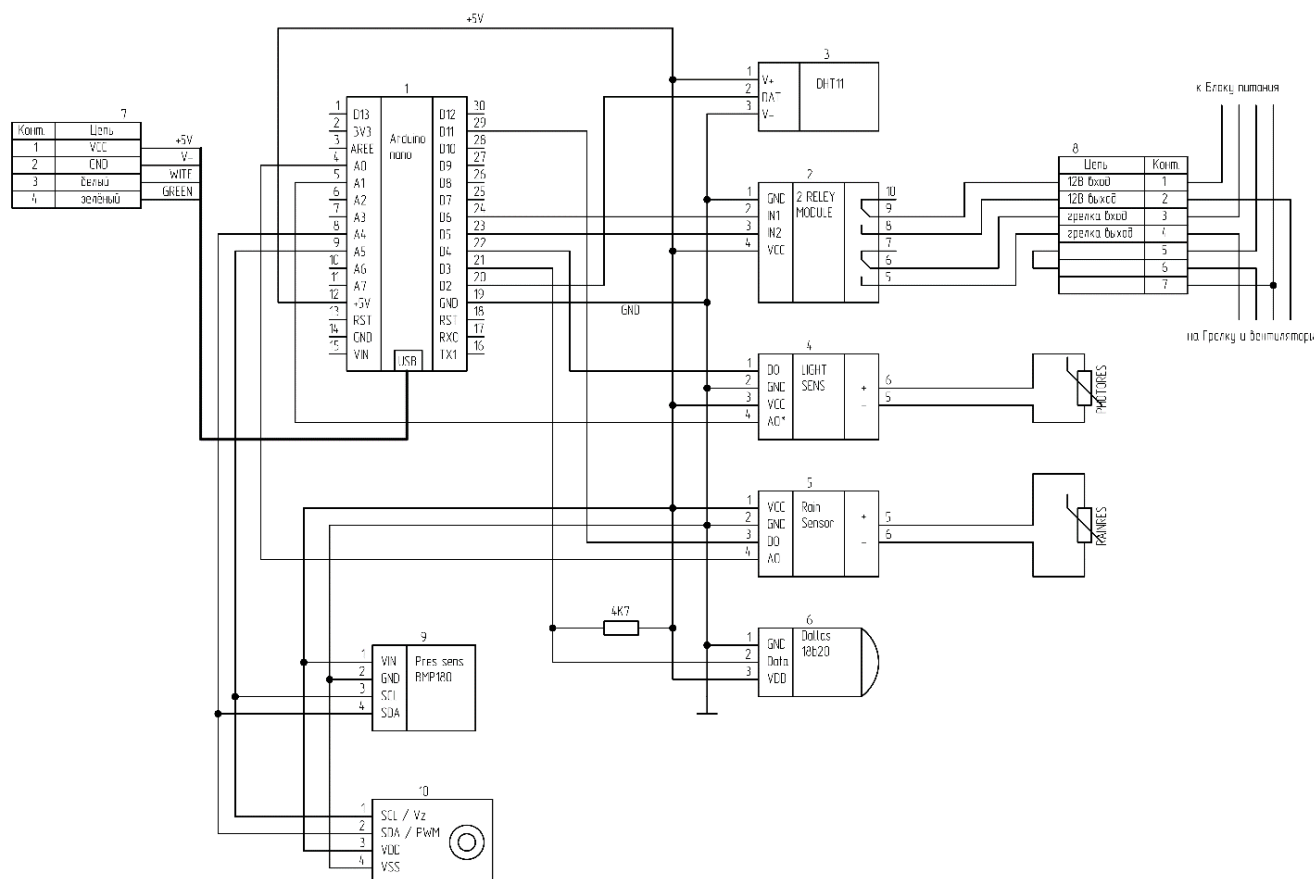


Рисунок 2.13 - Эскизная схема метеостанции

Разберём подробнее работу модулей и их параметры. Цифровой модуль датчика

влажности и температуры DHT22 типа AM2302 позволяет измерять относительную влажность в диапазоне 0 - 100 % с погрешностью  $\pm 2\%$ , температуру воздуха от  $-40$  до  $+80$  °C с погрешностью  $\pm 0.5$ °C. Передача данных осуществляется по последовательному цифровому интерфейсу Single Wire по запросу от ведущего устройства. Термодатчики Dallas 18b20 работают по интерфейсу One Wire и подключаются параллельно. Каждое устройство имеет свой уникальный 64-х битный адрес, что позволяет добавлять практически любое количество термодатчиков на одну общую

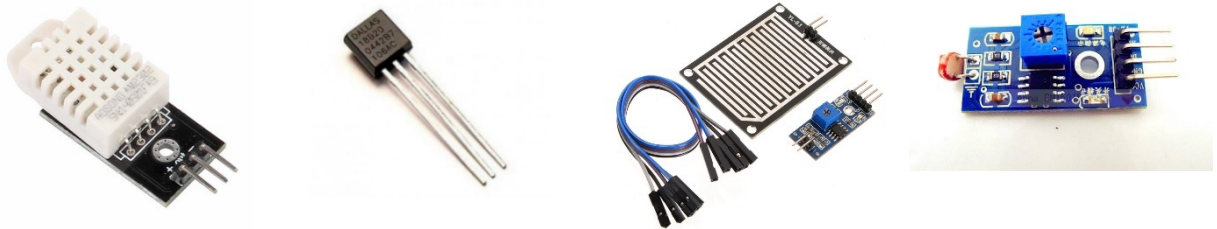


Рисунок 2.14 – Датчики метеостанции (слева направо): датчик влажности и температуры воздуха DHT22; датчик внутренних температур узлов Dallas 18B20; датчик осадков FC-37; Датчик освещённости.

линию. Диапазон измеряемых температур от  $-55$ °C до  $+125$  °C, с разрешением  $0.1$  °C и абсолютной точностью  $\pm 0.5$  °C. В метеостанции задействовано пока всего два термодатчика: один измеряет температуру модулятора-калибратора внутри корпуса радиометров, а второй расположен на воздушном обогревателе, но их количество может быть дополнено при необходимости. Датчики освещённости и дождя собраны на основе компараторов LM393, которые работают с резистивными чувствительными элементами – фоторезистором для датчика освещённости и резистором FC-37 в виде открытого меандра для датчика дождя. Эти датчики не калиброваны, проводят измерения в относительных величинах и нужны лишь для общей оценки погодных условий. Напряжение с резистивного чувствительного элемента сравнивается с опорным, задаваемым подстроечным резистором. Так же имеется аналоговый выход со шкалой от 0 до 5В, который соединяется с аналоговым входом платы Arduino. Калибровка этих сенсоров осуществляется эмпирическим путём. Цифровой датчик давления BMP180 фирмы Bosch включает в себя непосредственно датчик давления, датчик температуры для самокалибровки и стабилизатор питания. Диапазон измеряемого давления от 300 до 1100 гПа с точностью 0.06 гПа. Передача данных осуществляется по общей линии через цифровой интерфейс I<sup>2</sup>C.

Датчик облачности реализован на основе ИК-сенсора MLX90614ESF и эмпирической методики обработки данных. Сенсор чувствителен к ИК-излучению в диапазоне от 5.5 до 14 мкм с широкой диаграммой направленности (около 90°). Диапазон измеряемой яркостной температуры от  $-70$  до  $+380$ °C (203K – 653K) с точностью  $0.5$ °, значение температуры передаётся в цифровом виде на управляющее устройство. Методика основана на сравнении яркостной

температуры неба с физической температурой окружающей среды. Чем холоднее небо относительно приземного воздуха, тем меньше облаков и наоборот. Эта методика позволяет получить количественную оценку облачности в относительных единицах, а эмпирическая калибровка в ходе тестовых испытаний позволяет связать эти относительные единицы с реальной облачностью.

Модуль реле состоит из двух реле SRD-05VDC-SL-C, которые срабатывают от напряжения питания. По входу с контроллера реле развязаны оптопарой. Ток коммутируемой цепи до 10А.

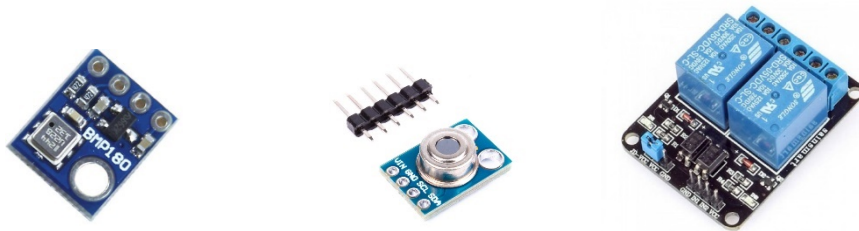


Рисунок 2.15 – Датчик давления Bosch BMP180; ИК-сенсор MLX90614; модуль сдвоенного реле.

Конструкция метеостанции (Рисунок 2.16) представляет собой единый модуль с встроенными датчиками и герметичными разъёмами. Датчик давления расположен внутри корпуса, но связан с атмосферой через отверстие. Герметичный алюминиевый корпус имеет продолговатую форму и располагается на корпусе блока приёмников так, чтобы датчики облачности, освещённости и дождя находились под открытым небом, а датчик влажности и температуры прикрыт кожухом радиометра. Проводка термодатчика проложена в отверстии в дне корпуса (через это же отверстие внутренний объём корпуса соединён с атмосферой). По бокам находятся два герметичных разъёма: USB и на питание отопителя.



Рисунок 2.16 – Внешний вид метеостанции

Алгоритм работы метеостанции довольно простой: микроконтроллер опрашивает датчики через заданный интервал времени и пересылает по USB набор значений, а программа на ПК записывает их в текстовый файл, сопровождая датой и временем. Таким образом формируется табличный файл с метеоданными, который можно прочитать при помощи блокнота, MathCAD,

MS Excel или других средств обработки. Алгоритм включения обогревателя радиопрозрачного окна задаётся при запуске метеостанции и может быть изменён. Во время работы обогревателя контролируется его температура, чтобы предотвратить перегрев.

Интерфейс на ПК создан на языке программирования C++ в среде разработки QT Framework и позволяет программировать интервал измерений, задавать любую логику управления исполнительными механизмами и рассчитывать параметры атмосферы. Питание метеостанции осуществляется от USB (5В), а воздушный обогреватель работает от отдельного импульсного блока питания 12В.

Параметры, измеряемые при помощи метеостанции приведены ниже: Таблица 2.2.

Таблица 2.2 – Основные параметры метеостанции.

Параметр	Датчик	Величина	Точность
Температура воздуха	DHT22 (AM2302)	-40 до +80 °С	разрешение 0.1°С точность ±0.5°С
Влажность воздуха		0-100 %	разрешение 0.1% точность ±2%
Атмосферное давление	BMP180	300 - 1100 гПа	точность 0.06 гПа
Температура деталей	Dallas 18b20	-55°С до +125°С	разрешение 0.1°С точность ±0.5°С
Освещённость	LM393 + фоторезистор	0 – 1024 отн. ед.	
Дождь	LM393 + FC37	0 – 1024 отн. ед.	
Облачность	MLX90614ESF	-70 .. +380°С (203К – 653К) по яркостной температуре	± 0.5°
Напряжение питания	от USB	5 В, <100 мА	
Коммутируемый ток		2 x 10А	

### Тестовые результаты

Изготовленная метеостанция прошла тестовые испытания в Нижнем Новгороде и практически сразу была отправлена на архипелаг Шпицберген в составе радиометрического измерительного комплекса, где проявила себя с наилучшей стороны.

Точность измерения базовых метеопараметров – температуры воздуха и различных деталей комплекса, атмосферного давления и влажности – определяется заводскими параметрами самих датчиков, которые приведены выше. Точных метрологических испытаний не проводилось, однако показания калиброванного метеоприбора WXT510 (Vaisala), находящегося рядом с метеостанцией, отличались от показаний метеостанции незначительно.

Оценки интенсивности облачности производится пропорционально разнице приземной температуры воздуха и яркостной температуры неба по ИК-датчику MLX90614. Принципиально эта методика продемонстрировала свою работоспособность, но процесс интерпретации результатов продолжает совершенствоваться и требует доработок. Яркостная температура неба

по датчику MLX90614, работающему на длине волны 4.4-15мкм, служит индикатором облачности. Разница яркостной температуры и температуры приземного воздуха  $\Delta T_{IR} = T_{air} - T_{IR}$  (К) обратно пропорциональна степени облачности. Ниже (Рисунок 2.17) представлена хронологическая запись  $\Delta T_{IR}$  с оптической толщиной. Видно, что падение значений оптической толщины 16-го и вторую половину 19 июля сопровождается резким увеличением  $\Delta T_{IR}$ , и наоборот 17 – 18го июля. Это соответствует уходу и приходу сплошной облачности в месте наблюдений.

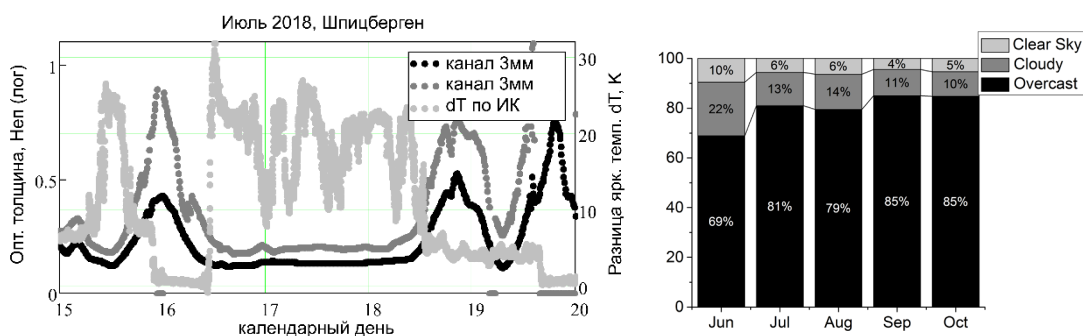


Рисунок 2.17 - Слева: яркостная температура неба по датчику MLX90614 в сравнении с оптической толщиной мм диапазона. Справа: интенсивность облачности по MLX90614

Кроме того, в условиях ясного неба оптическая толщина мм диапазона хорошо коррелирует с приземной влажностью. Значения PWV, пересчитанные из оптической толщины мм диапазона, совпадают со значениями PWV по фотометру, расположенному в г. Баренцбург в 3.5км от места наших наблюдений.

Статистические значения облачности (Рисунок 2.17 справа) построены на основе эмпирической методики, в которой значения  $\Delta T_{IR}$  разделяются на три интервала: от 0К до 18К соответствует пасмурной погоде, от 18К до 27К – переменной облачности и более 27К – ясному небу. Принцип разбиения строился на том, чтобы показания облачности по датчику MLX90614 совпали с показаниями метеосводки по сервису Meteoblue. Методика опробована впервые и, разумеется, требует доработок и совершенствования процедуры интерпретации результатов.

#### 2.2.4 Повторная калибровка модуляторов-калибраторов.

Модулятор-калибратор (МК) формирует опорный сигнал для калибровки радиометра, а его величина зависит от управляющего тока. Ввиду старения внутренней структуры МК, его заводская калибровка сбивается, и необходимо проводить её повторно. МК является уникальным, штучным изделием и утверждённого регламента долгосрочного обслуживания для него не предусмотрено, поэтому процесс калибровки является научно-технической задачей.

### Анализ состояния и калибровка МК после 3-х лет работы.

Для анализа состояния МК к выходу УПТ радиометра и выходу ЦАП подключается осциллограф, а входной рупор закрывается чернотельными эталонами, находящимися при комнатной температуре и температуре кипящего азота поочерёдно. При этом радиометр включается в режим измерения по абсолютной калибровке. Процедура повторяется отдельно для каждого канала радиометра. Осциллограммы напряжений УПТ и ЦАП с тёплым чернотельным эталоном приведены на рисунке ниже (Рисунок 2.18). Курсор 1 выставлен на напряжение УПТ, соответствующее «тёплой нагрузке» МК, Курсор 2 соответствует «холодной нагрузке». Третье состояние (где не выставлен курсор) соответствует открытому состоянию МК, т.е. в данном случае примерно 292К (комнатная температура).

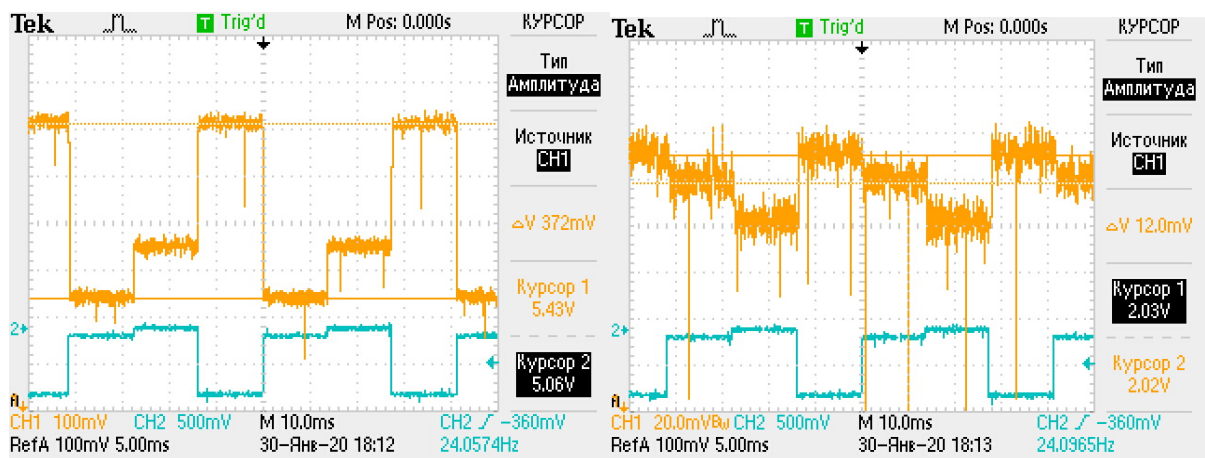


Рисунок 2.18 – Осциллограммы напряжений перед калибровкой МК в 3мм канале (слева) и 2мм канале (справа): УПТ (верхняя жёлтая линия) и ЦАП (нижняя голубая линия). Чернотельный эталон с температурой 292К на входе.

Аналогичным образом анализируются осциллограммы напряжений с чернотельным эталоном при температуре жидкого азота на входном рупоре (Рисунок 2.19). Курсор 2 выставлен на напряжение УПТ при открытом МК, т.е. соответствующее 78К.

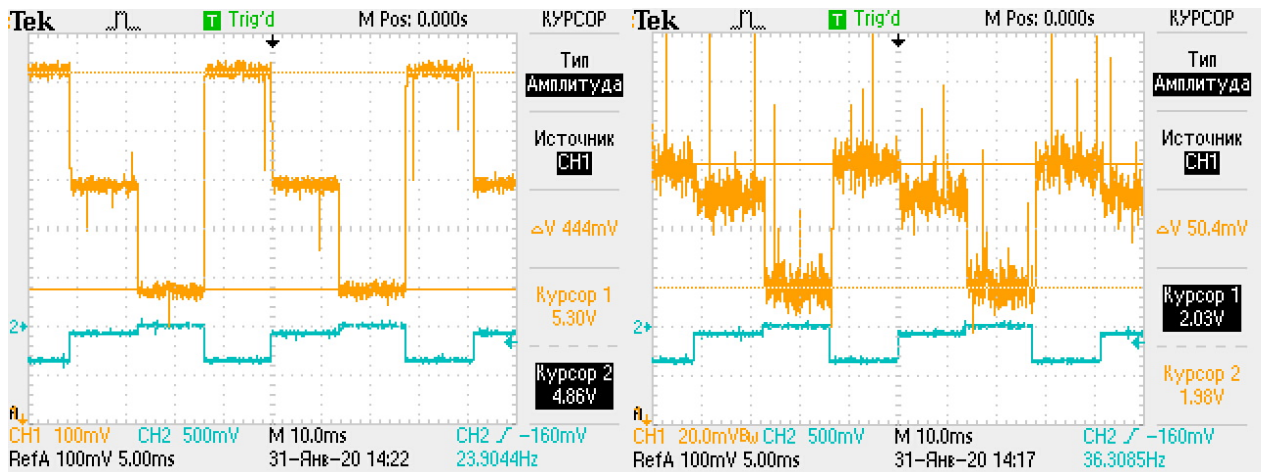


Рисунок 2.19 – Осциллограммы напряжений перед калибровкой МК в 3мм канале (слева) и 2мм канале (справа): УПТ (верхняя жёлтая линия) и ЦАП (нижняя голубая линия). Чернотельный эталон азотной температуры на входе.

Анализ осциллограмм приведён в таблице ниже (Таблица 2.3). Напряжение УПТ пропорционально яркостной температуре на входе радиометра. При наличии двух эталонов с известной яркостной температурой (78К и 292К) шкала напряжений УПТ легко градуируется в яркостную температуру по чернотельным эталонам на входе. По этой шкале вычисляются калибровочные яркостные температуры МК в состояниях «холодная нагрузка» и «тёплая нагрузка». Калибровочные значения вносятся в операционную программу радиометра МИАП-2 и дальнейший расчёт оптической толщины происходит с новыми коэффициентами.

Таблица 2.3 – Анализ состояния МК до и после калибровки

Режим	3мм			2мм		
	значение ЦАП (/10А)	напряжение на УПТ, В	Т я. экв. К	значение ЦАП (/10А)	напряжение на УПТ, В	Т я. экв. К
Открыт, T = 292 К (чёрное тело комнатной температуры)	0.000	5.16	<b>292</b>	0.000	2.00	<b>292</b>
Открыт, T = 78 К (черное тело азотной температуры)	0.000	4.86	<b>78</b>	0.000	1.98	<b>78</b>
Закрит, тёплая нагрузка	0.700 / 0.180	5.43/5.19	484/313	0.242/0.600	2.03/не изменилось	322/не изменилось
Закрит, холодная нагрузка	0.080	5.06	212	0.060	2.02	289

В результате анализа осциллограмм, выявлены следующие недостатки:

- Слишком большие значения яркостной температуры МК в закрытом состоянии в канале 3мм. По рекомендации производителя, значение «тёплого эталона» должно быть близко к комнатной температуре.

- Обнаружено слабое запираение МК канала 2мм в закрытом состоянии.
- Значение «холодной нагрузки» в канале 2мм всего на 10К меньше комнатной температуры – этого явно недостаточно для корректной работы абсолютной калибровки в 2мм канале.

Первые два недостатка могут быть устранены путём корректировки рабочих токов МК. Величины  $I_{х.н.}$  и  $I_{закр}$  задаются в файле конфигурации в разделе [ЦАП] в условных величинах: разделив указанное в файле значение на 10, получится ток МК в Амперах.

В таблице через дробь написаны скорректированные значения соответствующих величин после калибровки. Снижено значение тока в закрытом состоянии МК 3мм диапазона с 70мА до 18мА, это снизило «тёплую» калибровочную температуру с 484К до 313К. В 2мм канале поднят запирающий ток с 24мА до 60мА, это повысило запирающую способность МК в закрытом состоянии.

Таким образом, проведена повторная калибровка модулятора-калибратора при помощи чернотельных эталонов разной температуры. Дальнейшая настройка режима абсолютной калибровки проводится на работающем приборе путём выставления в окне программы соответствующих опорных температур. Однако, даже после повторной калибровки МК корректное использование режима абсолютной калибровки затруднительно. В небольших пределах калибровка изменяется от температуры МК и со временем, ввиду старения микроструктуры ДБШ. Это требует их термостабилизации и периодической (хотя и довольно редкой) повторной калибровки. Ввиду неопределённости и непостоянности параметров МК, реализация радиоаппаратуры на его основе является весьма сложной задачей. Паразитные отражения, неопределённость физической температуры структуры ДБШ, изменение коэффициентов пропускания и отражения МК и другие побочные свойства МК делают затруднительным проектирование радиоаппаратуры с ним.

### **2.2.5 Волноводный фильтр для 3-мм канала радиометра для обсерватории Суффа**

Параметры радиометрического комплекса МИАП-2 подробно описаны в разделе 2.1.2. Среди прочих, немаловажным является амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) приёмников. Форма АЧХ и крутизна спада чувствительности на краях рабочей полосы определяют точность значения количества осаждаемой воды, пересчитываемой из данных оптической толщины. Различают узкополосные и широкополосные радиометры, зачастую они решают разные задачи. С точки зрения исследований атмосферы это деление принято считать по сравнению полосы приёма с шириной окна прозрачности, склоном линии или иной исследуемой особенностью спектра атмосферы. Поскольку форма АЧХ приемной системы радиометра существенно отличается от идеальной, то существует проблема неопределённости



эквивалентной частоты, приписываемой измеренным оптическим толщинам. В свою очередь неопределенность в знании эквивалентных частот приводит к существенным ошибкам при пересчете значений оптической толщины в интегральную влажность. В этом смысле принятое ограничение рабочих частот паспортными данными является чисто условным. Форма АЧХ определяет коэффициенты удельного поглощения в парах воды и в кислороде, характеризующие степень захвата полосой приёмника крыльев резонансных линий поглощения в атмосферных газах.

В отношении радиометра МИАП-2 справедливо рассматривать рабочие каналы по отдельности. 2-х миллиметровый канал выполнен по супергетеродинной схеме, и его полоса определяется частотой гетеродина и полосой фильтра ПЧ, а поэтому фиксирована довольно жёстко. 3-х миллиметровый канал работает в режиме прямого усиления и детектор собирает всё, что приходит в широкой полосе усилителя, что увеличивает его чувствительность. В отличие от гетеродинного приёмника, для ограничения полосы в приёмнике прямого усиления требуется установка дополнительных фильтрующих устройств: квазиоптических, волноводных или схемотехнических. Их схемотехническое исполнение, согласование по входу и выходу и качество изготовления, в свою очередь, определяют АЧХ приёмника в целом. МШУ чип в 3мм канале был выбран с полосой 75-105 ГГц, а у импедансно согласующей цепи была задана и реализована полоса 78-102 ГГц. Таким образом, рабочая полоса у модуля, установленного в приёмнике "Мус-Хая" получилась 84-99 ГГц по уровню -3 дБ, а у установленного в приёмнике на плато Суффа, рабочая полоса не была измерена.

После ввода в эксплуатацию и проведения тестовых измерений на обсерватории «Суффа», в радиометре МИАП-2 была выявлена некоторая особенность 3мм канала. Количество осаждаемой воды при расчёте из оптической толщины по 3мм каналу получается заметно выше, чем по данным измерений в 2 мм диапазоне. По всей видимости, это вызвано попаданием интенсивной полосы кислорода на 60 ГГц в АЧХ приёмника по причине некачественного исполнения фильтрующего каскада в усилителе. Как следствие, приёмник регистрирует излишнее поглощение. Паспортный диапазон частот твердотельного приёмника заявлен как 84-99 ГГц, но эти параметры требуют подтверждения. Если фильтрующий каскад выполнен некачественно, то полоса приёма в большей степени ограничена сечением волновода со стороны нижних частот, нежели входным фильтром.

При обработке это можно учесть, умножив кислородную часть поглощения в 3мм канале на коэффициент  $X$ , определяемый из условия, что количество осаждаемой воды  $W$  по обоим каналам должно быть одинаково:

$$\begin{aligned}\tau_{2\text{мм}} &= \tau_{\text{кислород}} + \alpha_{2\text{мм}} \cdot W \\ \tau_{3\text{мм}} &= \tau_{\text{кислород}} \cdot X + \alpha_{3\text{мм}} \cdot W\end{aligned}\quad (2.12)$$

По результатам рутинных измерений оптической толщины по МИАП-2, в зависимости от погодных условий (только в ясную погоду), значения коэффициента  $X$  варьируются в пределах:

$$X = 2.3 \pm 0.2$$

Однако вариативность коэффициентов удельного поглощения с температурой, а в особенности кислородной составляющей, не позволяет подобрать универсальный коэффициент  $X$ , который подходил бы ко всем сезонам. Учёт влияния полосы кислорода методами пост-обработки также затрудняется из-за зависимости кислородной части поглощения от высоты и температуры. Это затрудняет обработку данных и увеличивает систематическую ошибку измерений. Поэтому необходимо по возможности снижать влияние теплового излучения полосы кислорода 60 ГГц. Этот недостаток в аппаратуре искажает общую картину при оценке астроклимата и затрудняет сравнение плато Суффа с другими площадками, измеренными аналогичным комплексом МИАП-2, в котором 3-х мм канал работает в нормальном режиме. Ситуацию усугубляет удалённость оборудования, поскольку удалённая настройка и калибровка невозможны.

Было принято решение рассчитать и изготовить для этого радиометра ФВЧ на запредельном волноводе основного сечения. Волноводный фильтр представляет собой отрезок волновода основного сечения длиной 15 мм, 5 из которых являются зауженной фильтрующей частью, а остальные – это плавные переходы с сечения волноводного тракта приёмника 1.2 x 2.4 мм на сечение фильтрующей части и обратно (Рисунок 2.20).

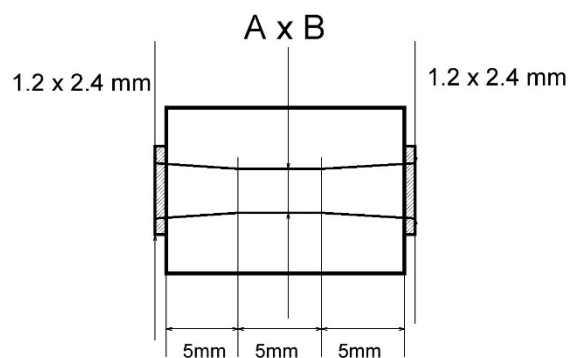


Рисунок 2.20 – Схема волноводных фильтров

Предварительный расчёт амплитудно-частотной характеристики был сделан по методике, изложенной в [99]. Результирующая формула для расчёта затухания в участке запредельного латунного волновода длиной 5мм имеет вид:

$$\alpha(f, a) = 10 \log \left( l \frac{\sqrt{\frac{2\pi f}{\sigma} \cdot \left(1 + \left(\frac{c}{2f \cdot a}\right)^2\right)}}{120\pi \cdot 2a \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{c}{2f \cdot a}\right)^2}} \right) \quad (2.13),$$

где  $\alpha(f, a)$  – затухание в фильтре, дБ

$f$  – частота генератора, Гц

$a$  – варьируемый размер широкой стенки волновода, м

$l = 5 \cdot 10^{-3}$  – длина фильтрующей части, м

$\sigma = 1.43 \cdot 10^7$  – удельная проводимость латуни, См

$c = 3 \cdot 10^8$  – скорость света в вакууме, м/с

Очевидно, такой фильтр будет вносить паразитные потери и в рабочей полосе, что снижает чувствительность. Таким образом, задача поиска нужной частоты среза, определяемой сечением фильтрующей части, сводится к поиску компромисса между потерей чувствительности и уменьшением поправочного коэффициента. Потеря чувствительности выражается в зашумлённости хронологической записи в условиях стабильной ясной погоды, которую можно получить только по результатам натурального эксперимента. Учитывая невозможность изготовления фильтра на Суффе, было принято решение изготовить три фильтра с различными сечениями фильтрующей части (Таблица 2.4 – Размеры и параметры фильтров.).

Расчётная амплитудно-частотная (АЧХ) характеристика фильтров представлена на рисунке ниже (Рисунок 2.21) пунктирными линиями. Вместе с тем, сплошными линиями на графике изображено погонное затухание (дБ/км) в атмосфере Земли при различной влажности в логарифмическом масштабе. Синим пунктиром изображена АЧХ волновода, из которого собран тракт приёмника, его критическая частота отмечена синей вертикальной чертой – 62.5 ГГц. Красный, чёрный и коричневый пунктиры отображают АЧХ 1-го, 2-го и 3-го фильтров соответственно, а их критические частоты отмечены вертикальными линиями соответствующего цвета. Очевидно, затухание по уровню -3дБ отличается от критических частот и составляет около 68 ГГц для стандартного 3-мм волновода (1.2 x 2.4 мм), около 78 ГГц у 1-го фильтра, около 90 ГГц у 2-го фильтра и около 108 ГГц у 3-го фильтра.

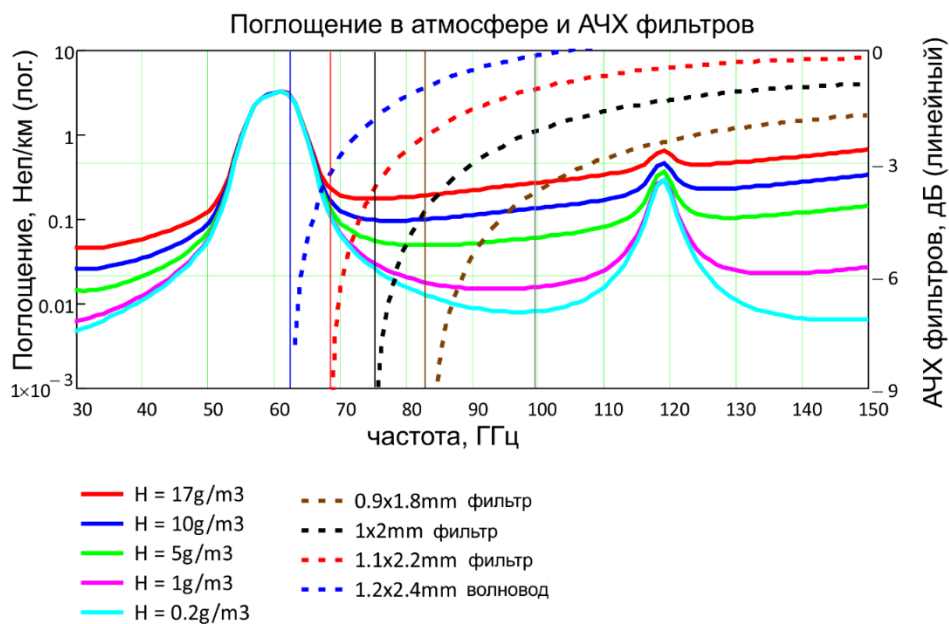


Рисунок 2.21 – Расчётная АЧХ фильтров. Синяя, красная и чёрная вертикальные линии – критические частоты фильтров. Серая вертикальная линия – верхний предел диапазона приёмника.



Рисунок 2.22 – Фотографии фильтров.

Далее были проведены измерения фильтров на панорамном измерителе АЧХ 3-х миллиметрового диапазона P2-123. Все измерения производились в диапазоне частот 78 – 118 ГГц, то есть по всей рабочей полосе панорамного анализатора. Масштаб осциллограмм: по оси ординат – 10 dB в клетке, по оси абсцисс – по всему рабочему диапазону. Для измерения АЧХ фильтров, была собрана измерительная схема (Рисунок 2.23 и Рисунок 2.24).

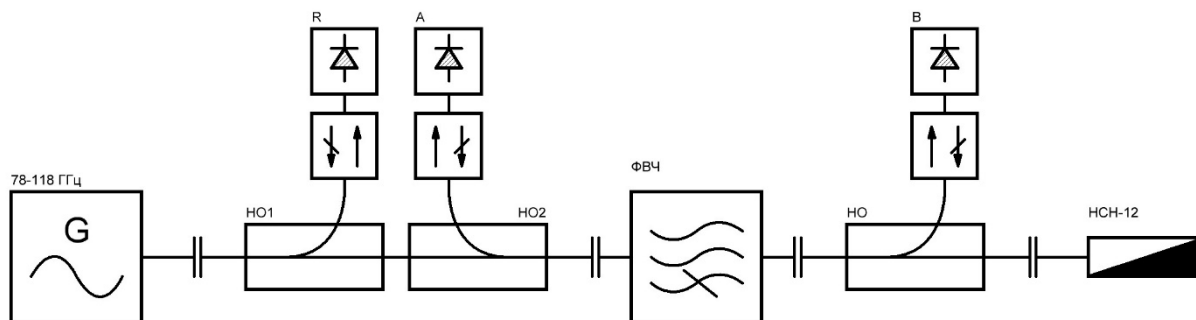


Рисунок 2.23 – Схема измерения АЧХ фильтров.

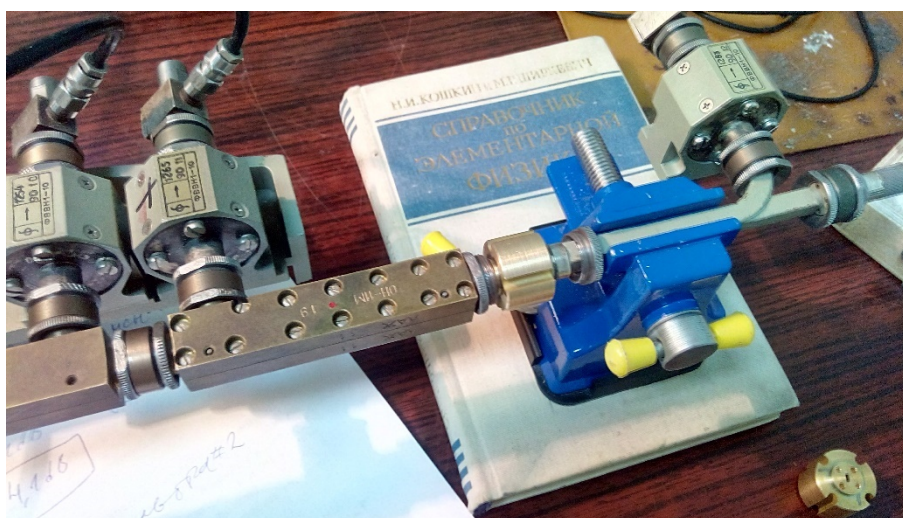


Рисунок 2.24 – Фотография установки для измерения АЧХ фильтров.

В результате измерений было обнаружено, что фильтр №1 практически не обладает фильтрующими свойствами в рассматриваемом диапазоне частот, поскольку панорамный анализатор не работает ниже частоты среза фильтра - 78 ГГц. Фильтры №2 и №3 хорошо подавляют низкие частоты с частотами среза 92 ГГц и 105 ГГц соответственно (см. Таблица 2.4). Потери в полосе частот у всех фильтров были порядка 1-2 дБ.

Таблица 2.4 – Размеры и параметры фильтров.

	А, мм	В, мм	f <sub>кр</sub> , ГГц (расчёт)	f среза (-3дБ) расч., ГГц	f среза (-3дБ) эсп, ГГц
фильтр 1	1.1	2.2	68.18	78	-
фильтр 2	1	2	75,0	90	92
фильтр 3	0.9	1.8	83.33	108	105

После изготовления фильтров, была организована экспедиция на плато Суффа и проведены полевые испытания фильтров на радиометре. Для этого каждый из трёх фильтров по очереди помещался в волноводный тракт 3-мм канала между рупором и модулятором-калибратором. Исходя из задачи подавления избыточного влияния полосы кислорода на 60 ГГц в приёмнике 3-мм диапазона, необходимо было подобрать фильтр, который достаточно подавил

бы полосу кислорода, потеряв при этом минимум полезного сигнала в окне прозрачности. Основным ориентиром в этом был рабочий диапазон частот приёмника, заявленный производителем: от 84 до 99 ГГц.

Установка фильтра привело к уменьшению поправочного коэффициента  $X$  в формуле (2.12). Однако вместе с тем понижалась чувствительность приёмника и в рабочем диапазоне, что привело к увеличению дисперсии (СКО) точек. Ключевым параметром для оценки эффективности работы фильтра было уменьшение коэффициента  $X$ , без существенного увеличения СКО. Тестовые наблюдения проводились в ясную погоду на плато Суффа (высота 2400м), для этого поочерёдно устанавливались фильтры и проводилась кратковременная (около 20 минут) запись оптической толщины. Измерения проводились в стабильную ясную погоду, а вся процедура заняла около 3-х часов. Есть все основания полагать, что в ходе измерений существенных изменений погодных условий не произошло, таким образом полученные результаты являются следствием работы фильтров и не связаны с погодными условиями. Результаты тестовых наблюдений сведены в таблицу ниже (Таблица 2.5).

Таблица 2.5 – Результаты тестовых измерений фильтров

	сечение, мм	f среза (-3дБ) расч., ГГц	f среза (-3дБ) эксп, ГГц	СКО при наблюдениях, мм осаждённой воды	значение поправочного коэффициента $X$
без фильтра	1.2x2.4	68	-	0.15	2.3
фильтр 1	1.1x2.2	78	-	0.19	2
фильтр 2	1x2	90	92	0.23	1.9
фильтр 3	0.9x1.8	108	105	1.04	1.5

Воздействия фильтра №1 практически не обнаружено. Установка третьего фильтра приводит к значительному увеличению разброса точек, но и поправочный коэффициент при этом значительно уменьшился – до 1.5. Стоит отметить, что соотношение яркостной температуры неба, рассчитанной по МРМ Liebe в полосе работы приёмника с фильтром и без, также близок к значению 1.5. По результатам экспериментов было принято решение оставить фильтр №2 как наиболее оптимальный. Поправочный коэффициент свести к 1 не удалось, однако воздействие полосы кислорода 60ГГц заметно уменьшилось. [83]

### 2.3 Новая методика расчёта оптической толщины по методу атмосферных разрезов

Раздел посвящён разработке методики обработки данных, получаемых методом «атмосферных разрезов», а также параметров фильтров, применяемых в этой методике. В методике обрабатываются первичные данные, полученные с АЦП. Она позволяет выявить и исключить ошибочные записи, полученные в условиях разрывной облачности, и таким образом уменьшить стохастический разброс значений прозрачности атмосферы. Разработанная методика

обработки данных универсальна и может быть применена к любым данным, получаемым методом атмосферных разрезов. Один из известных недостатков этого метода заключается в потере данных, полученных в условиях облачности. Обычно, эти данные непригодны для обработки и удаляются. Методика включает в себя несколько этапов:

- А. Оценка оптимального времени накопления сигнала на одном угле
- Б. Измерение и фильтрация шумов аппаратуры
- В. Исключение разрывной и слоистой облачности
- Г. Исключение инверсных углов
- Д. Различные методики расчёта оптической толщины.

Методика базируется на физических параметрах атмосферы и аппаратуры, а также на обширном опыте измерений астроклимата. Исключение из рассмотрения ошибочных значений яркостной температуры неба позволяет восстановить экспоненциальное распределение яркостной температуры от угла возвышения по оставшимся экспериментальным точкам и тем самым сохранить до 20% данных, ранее непригодных для обработки.

В рассматриваемом аппаратурном комплексе аппроксимация проводится по 5-ти углам. Зенитные углы составляют:  $60.48^\circ$ ,  $76.32^\circ$ ,  $81.36^\circ$ ,  $84.24^\circ$  и угол  $88.56^\circ$  примерно соответствует направлению в горизонт. Эти углы соответствуют целому числу шагов шагового двигателя, управляющего зеркалом, а также примерно равному интервалу по яркостной температуре между направлениями. Напряжение с детектора приёмника линейно зависит от яркостной температуры неба на соответствующем угле в широких пределах по яркостной температуре.

В условиях ясного неба экспериментальные точки могут быть аппроксимированы экспонентой (2.1), а результат этой аппроксимации (показатель экспоненты, Неп) стабилен во времени. Однако, в условиях разрывной облачности, результат аппроксимации оказывается завышен и имеет большой разброс.

Идея разработки методики была продиктована особенностями аппаратуры и метода измерений прозрачности: метод атмосферных разрезов основан на разности яркостной температуры собственного излучения атмосферы на разных углах места. Если по какой-то причине (облачность, шумы приёмника) возникает нарушение градиента яркостной температуры, это приводит к фатальным ошибкам расчёта (логарифм отрицательного числа или деление на 0) или к драматическому увеличению погрешности.

С другой стороны, мы не имеем права применять к экспериментальным данным какие-либо фильтры или обработку, кроме тех, что будут физически обоснованы. На нулевом этапе однократно проводится оценка оптимального времени накопления, и все дальнейшие измерения проходят при оптимальном времени накопления. Это позволяет минимизировать ошибку измеряемых данных. Остальные этапы направлены на уменьшение оставшихся шумов

аппаратуры и атмосферы путём математической обработки.

Первичные данные измерений выдаёт программа, работающая с физическими интерфейсами приёмника МИАП-2: она осуществляет измерения, управляет движением зеркала, снимает показания АЦП и записывает “сырой” файл с напряжениями детекторов на каждом угле. Дальнейшая математическая обработка применяется к этим файлам.

### 2.3.1 Алгоритм методики

На Рисунок 2.25 схематично изображена передача данных от одного этапа разработанной методики к другому, а также указан формат данных. Методика реализуется в трёх программных средах чисто по историческим причинам. Сбор данных и работа с физическими интерфейсами производится программой МИАП-2, написанной на Delphi 7, расчёт времени накопления – в MathCAD, обработка данных измерений – в Python.

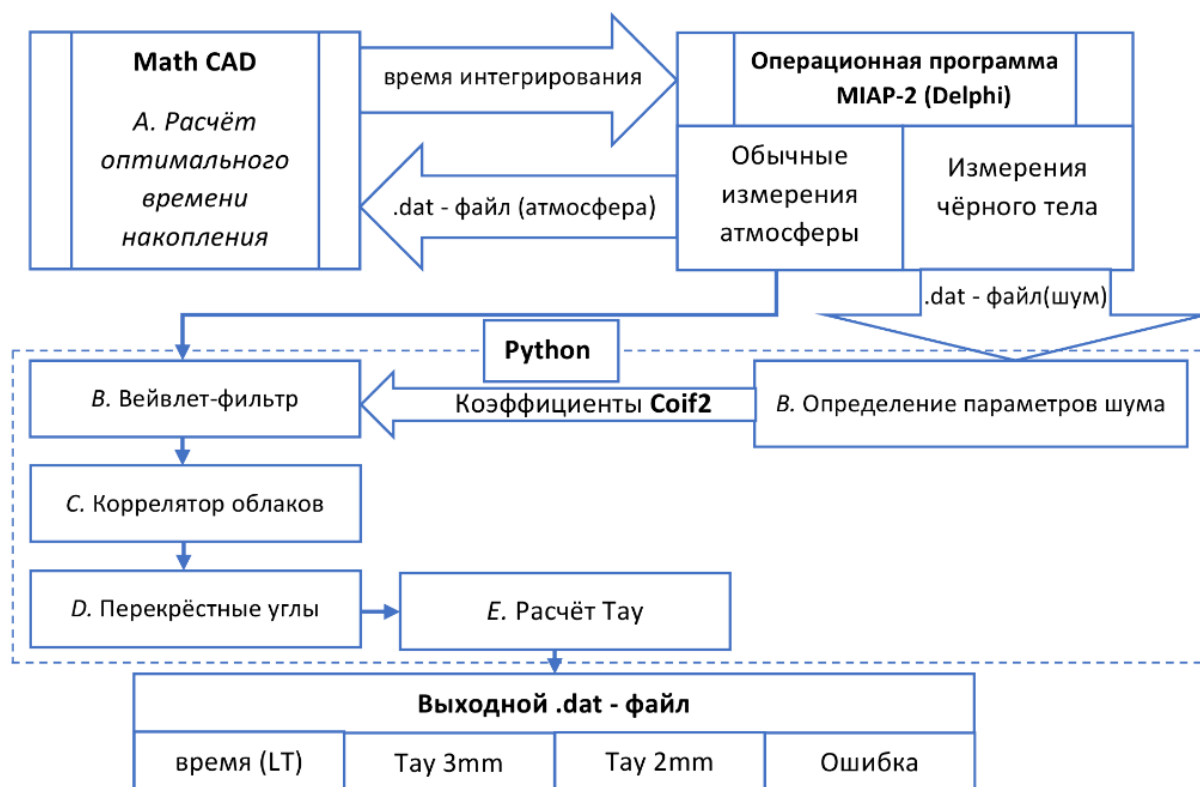


Рисунок 2.25 – Блок-схема методики.

#### А. Оценка оптимального времени накопления

Время накопления сигнала яркостной температуры атмосферы на каждом угле можно изменять в широких пределах перед запуском измерений в программе, работающей с физическими интерфейсами МИАП-2. Разумеется, это неприменимо к данным, накопленным ранее.



С уменьшением времени накопления на одном угле, увеличивается стохастический разброс значений. С увеличением этого времени, увеличивается и общее время на один «разрез», что приводит к утрате быстрых изменений в атмосфере. На рисунке ниже (Рисунок 2.26) схематично изображён принцип определения оптимального времени накопления на одном угле.

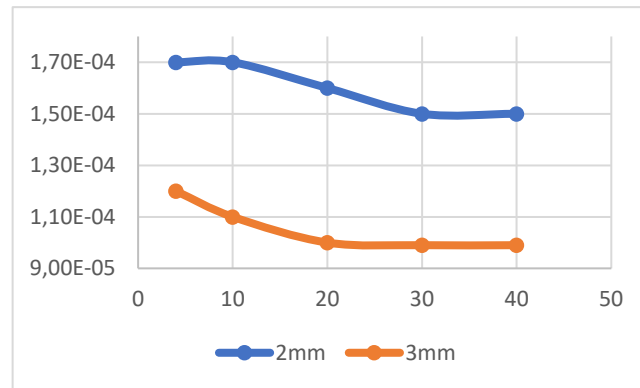


Рисунок 2.26 – Схематичная зависимость SKO данных (2mm & 3mm) от времени накопления.

Показаны значения SKO в обоих каналах радиометра. При измерении SKO рупорные антенны радиометров были закрыты чернотельным эталоном, таким образом измеренный параметр отражает характеристики самого радиометра. Очевидно, эти значения падают с увеличением времени накопления и выходят на постоянную величину шумов. Таким образом, можно определить оптимальное время накопления как 20-30 секунд на каждом угле.

## Б. Измерение и фильтрация шумов аппаратуры

Очевидно, конструкция приёмных модулей обладает собственными тепловыми шумами. Характеристики фильтра должны быть основаны именно на параметрах аппаратуры, которые нам заведомо известны или могут быть измерены. Только в этом случае мы можем быть уверены, что удаляем из экспериментальных данных лишь те шумы, что принадлежат аппаратуре. Для измерений собственных шумов, прибор закрывается чернотельными поглотителями с температурой, стабилизированной бытовым кондиционером, и ведётся запись в стандартном режиме. Запись шумов представлена ниже (Рисунок 2.27). Семейство линий соответствует измерениям на разных углах, но поскольку рупора закрыты, поворот зеркала никак не влияет на значения. Крупномасштабные изменения значений соответствуют изменениям температуры в комнате и не рассматриваются как шумы.

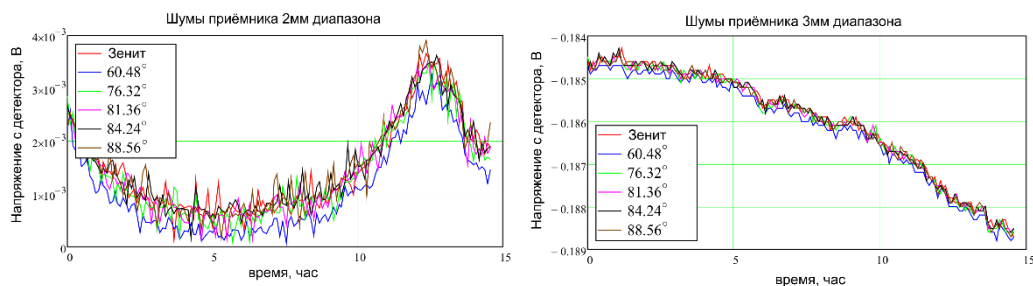


Рисунок 2.27 – Запись собственных шумов радиометров: 2мм канал (слева) и 3мм канал (справа).

Шумовая запись проходит wavelet разложение на coiflet [100] 2-го порядка с помощью библиотеки PYWT [101]. В вэйвлет-пространстве рассчитывается Абсолютное Медианное Отклонение (Median Absolute Deviation), величина которой определяет параметры вейвлет-фильтра низких частот. В результате расчётов были получены параметры Wavelet фильтра Coif2:

$$2mm = 0.00070858$$

$$3mm = 0.00257025$$

Фильтр с найденными параметрами применяется к наблюдательным данным. Пример такой фильтрации приведён на Рисунок 2.28.

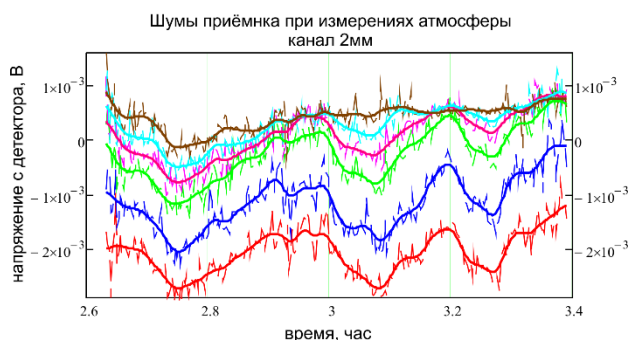


Рисунок 2.28 – Фильтрация шумов в 2мм канале приёмника. Верхняя линия соответствует измерениям в направлении горизонта, нижняя – в Zenит, между ними находятся промежуточные углы. Тонкими пунктирными линиями показаны данные измерений, толстыми линиями – результат их фильтрации.

Параметры фильтра для 3-х мм канала и 2-х мм канала рассчитываются отдельно. В 3-х мм канале так же происходит фильтрация аналогичным образом. Далее эти данные передаются на последующие этапы алгоритма.

## В. Коррелятор облачности

При наблюдениях в условиях разрывной облачности слабой интенсивности велика вероятность пересечения луча зрения приёмного рупора с локальным облаком, что приводит к завышению значений яркостной температуры на этом угле на относительно короткий

промежуток времени. Это локальное во времени и пространстве завышение значения существенно смещает оценку оптической толщины и должно быть исключено из дальнейшего рассмотрения. Для обнаружения таких выбросов данных вычисляется корреляция Пирсона [102] между данными для каждой пары углов, а затем выброс удаляется из дальнейшего рассмотрения по уровню ниже 0.8.

В примере ниже (Рисунок 2.29) в начале 3-го дня измерений (3.03-3.12) через угол  $60.48^\circ$  прошло облако, которое уменьшило значение корреляции Пирсона до 0.6. Все значения ниже 0.8 исключаются из дальнейшего рассмотрения.

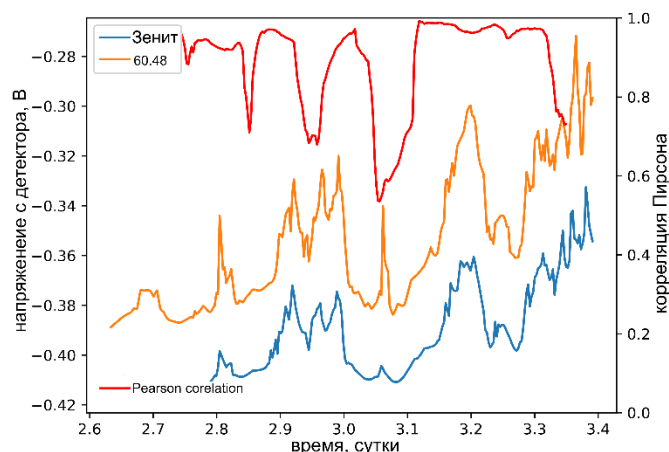


Рисунок 2.29 – Пример расчёта корреляции Пирсона между направлением в Зенит и углом  $60.48^\circ$ .

### Г. Исключение инверсных углов

В условиях большой влажности или сплошной облачности наблюдается пересечение значений, измеренных на нижних углах, с горизонтом. В основном это получается в результате рассеяния излучения в слоистой облачности: на нижних углах частично попадает излучение от тёплой поверхности Земли.

В методике отслеживается сближение значений напряжения детектора на соседних углах от точки к точке и если оно становится меньше удвоенного значения СКО шумов, то программа удаляет соответствующий интервал из дальнейшего рассмотрения. Исключение составляют горизонт и Зенит – они являются опорными и не удаляются. На рисунке ниже (Рисунок 2.30) представлен пример ситуации исключения инверсных углов: тонкими пунктирными линиями показаны измеренные значения напряжений на выходе УПТ на разных углах, толстыми линиями – они же после сглаживания шумов. Программа исключит голубую и пурпурную линии в отрезке, на котором они пересекаются с коричневой линией.

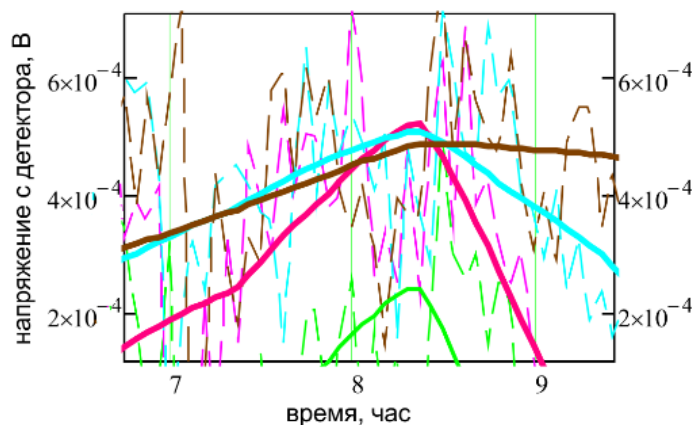


Рисунок 2.30 - Пример пересечения углов вблизи горизонта: углы  $84.24^\circ$  и  $81.36^\circ$  сближаются и пересекают напряжение, соответствующее горизонту.

#### Д. Расчёт оптической толщины

После обработки значений напряжений на углах по отдельности, данные поступают на этап расчёта оптической толщины. На этом этапе к полученным значениям напряжения в зависимости от зенитного угла подгоняются параметры уравнения (2.14), по двум методам: методу наименьших квадратов или методу к-ближайших соседей.

$$U(\theta) = U_{aver}(1 - e^{-\tau \cdot \sec(\theta)}) + U_{shift} \quad (2.14),$$

где  $\tau$  – оптическая толщина, Неп

$U_{aver}$  – среднее напряжение, соответствующее яркостной температуре атмосферы в направлении горизонта.

$U_{shift}$  – «подставка» напряжения, обусловленная техническими особенностями аппаратуры.

$U(\theta)$  – результаты измерений в зависимости от угла.

В этом уравнении подгоняются три параметра для каждой точки по времени:  $U_{aver}$ ,  $U_{shift}$  и  $\tau$ . При этом, если на определённый момент из рассмотрения были исключены 1, 2 или 3 угла, то подгонка происходит по оставшимся (Рисунок 2.31). Исключение углов приводит к увеличению СКО оценки, но не к потере данных, как это было в старой методике обработки данных.

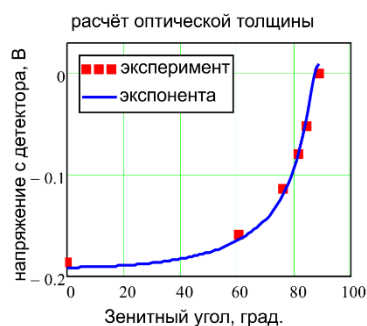


Рисунок 2.31 – Результат вписывания в экспериментальные данные экспоненты.

В методике используется два метода поиска оптической толщины по экспериментальным данным: метод наименьших квадратов (LIMFIT [103], LSQ) и метод к-ближайших соседей (SCIKIT-LEARN [104], KNN). Для уменьшения случайных шумовых параметров, наблюдаемых в методе наименьших квадратов, мы применяем метод к-ближайших соседей, главным образом представленный в [105], однако метод наименьших квадратов тоже подходит к этой задаче. В методе используется калибровка по массиву данных для обучения метода к-ближайших соседей с метрикой Минковского  $m=2$ , так же как для метода наименьших квадратов. Как только набирается достаточная экспозиция для заполнения пространства соседей, мы получаем значение СКО оптической толщины, как  $\sqrt{k(k-1)}$ , где  $k$  – количество соседей. В качестве тестовых данных были использованы 300 000 отсчётов измерений в качестве пространства соседей и получили уменьшение СКО только на  $\sqrt{k-1}$ . В данном случае метод к-ближайших соседей является дополнением к методу наименьших квадратов, и не может быть использован отдельно.

### 2.3.2 Тестирование методики

В качестве тестовой записи представлены данные, собранные на крыше одного из корпусов ИПФ РАН в зимнее время (февраль – март 2018). Наблюдения попали на различную по степени облачности погоду: и ясное время, и слабая разрывная облачность, и сплошная слоистая. Оптимальное время накопления было выбрано 20 сек, с этим же временем накопления были записаны собственные шумы приёмника (Рисунок 2.27).

В результате работы коррелятора облачности была исключена разрывная облачность, к примеру в начале 3-го дня наблюдений на угле  $60.48^\circ$  в 3мм канале. Исключение инверсных углов представлено на примере 2мм канала – в конце 2го дня наблюдений (Рисунок 2.32).

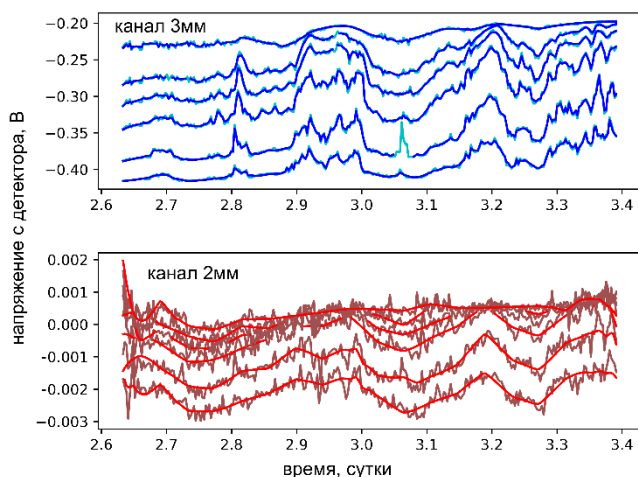


Рисунок 2.32 - Результат работы алгоритмов по исключению разрывной облачности (вверху, 3мм канал) и инверсных углов (внизу, 2мм канал).

На Рисунке 2.33 представлен результат расчёта оптической толщины по обоим каналам в сравнении со старым методом прямого расчёта итерационного уравнения по 5-ти углам. Методика позволила уменьшить СКО отклонения и частично сохранить данные, ранее непригодные для использования. На рисунке ниже (Рисунок 2.33) представлено сравнение обработки по стандартной методике (которая использовалась ранее в программе МИАП-2) с методикой, разработанной в настоящей работе. Зелёная сплошная линия отображает стандартный алгоритм, а красная – новую методику расчёта: во время разрывной облачности (например, на отметке 2.8-3) стандартная методика даёт большой разброс данных с резким изменением значений оптической толщины, что не характерно даже для самой нестабильной атмосферы. Новая методика восстанавливает значения оптической толщины, но с большой ошибкой вписывания из-за исключения углов. В относительно ясные промежутки времени (например, 3-3.1) старая и новая методики дают схожие результаты.

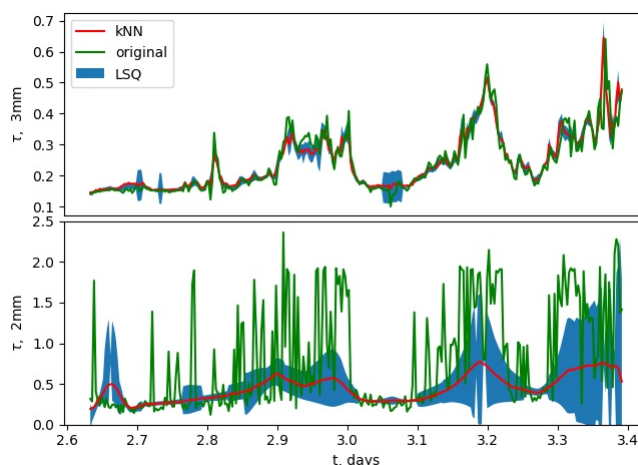


Рисунок 2.33 - Результат работы новой методики в сравнении со стандартной. Зелёная линия – стандартная методика, красная – новая методика при использовании метода k-ближайших соседей (ошибка не показана), синее поле – по методу наименьших квадратов и ошибка вписывания экспоненты.

### 2.3.3 Статистическая оценка результативности разработанной методики

Анализ эффективности работы методики обработки данных астроклимата сделан на основе репрезентативной выборки экспериментальных данных, полученных при различных погодных условиях на Шпицбергене в феврале 2018 года. Экспериментальные данные обработаны двумя способами: при помощи старой методики вписывания экспоненты без предварительной фильтрации шумов и по новой методике с применением предварительной фильтрации. В основе обоих методов лежит принцип вписывания экспоненциальной зависимости (2.1) по методу наименьших квадратов.

Основным параметром сравнения методик является доверительный интервал расчёта

оптической толщины, то есть ошибка вписывания экспоненты. Оценка доверительного интервала вписывания экспоненты в экспериментальные точки проведена аналогично работе [106]. Этот параметр позволяет количественно оценить соответствие наблюдаемых данных и модели, то есть насколько реальная атмосфера отличалась от её плоско-слоистой модели, заложенной в метод атмосферных разрезов.

Рисунок 2.34 иллюстрирует соотношение между параметрами оценки оптической толщины двумя методами. Слева показано соответствие величины оптической толщины при применении фильтрации данных и без. Симметрия облака значений относительно линии  $y=x$  (зелёная) свидетельствует об отсутствии систематических искажений. На Рисунок 2.34 справа представлена гистограмма отношения ошибок вписывания экспоненты: новой методикой (filtred) и старой (raw)  $\sigma_{\text{filtred}}/\sigma_{\text{raw}}$ . Смещение гистограммы влево относительно 1 показывает увеличение точности оценки в ряде случаев. Оценка величины снижения погрешности на тестовой записи показала снижение значения отношения  $\sigma_{\text{filtred}}/\sigma_{\text{raw}}$  на 2% в 2мм канале и на 30% в 3мм канале. Таким образом, можно сказать, что новая методика рассчитывает оптическую толщину с меньшей ошибкой, чем старая, особенно в сложных условиях. В условиях ясного неба обе методики дают статистически одинаковые результаты. [107]

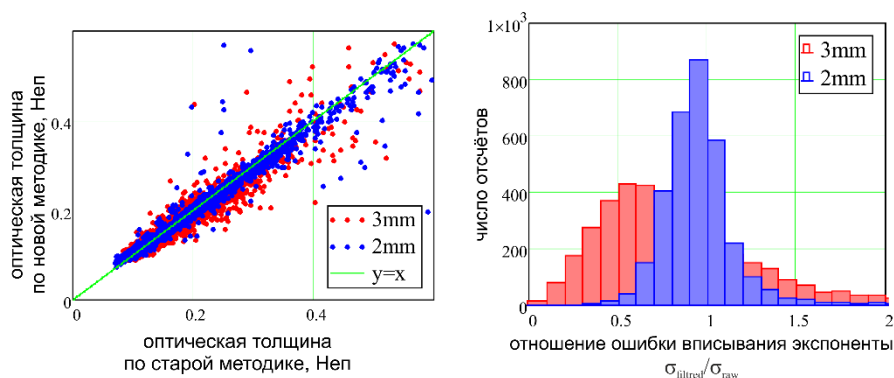


Рисунок 2.34 - Оценка погрешностей новой методики обработки данных по отношению к старой. Слева - взаимосвязь фильтрованных и нефильтрованных данных оптической толщины. Справа – гистограмма отношения ошибок определения оптической толщины по новой и старой методике. Синие точки – канал 2мм, красные точки – канал 3мм.

## 2.4 Выводы к главе 2

В главе рассмотрены особенности проектирования, модернизации и эксплуатации радиометрического комплекса МИАП-2 для измерения прозрачности атмосферы в мм диапазоне. Представлена новая методика обработки данных измерений, получаемых при помощи метода «атмосферных разрезов». Методика позволяет минимизировать некоторые известные недостатки метода и рассчитать оптическую толщину по экспериментальным данным, обработка которых

ранее была невозможна.

Начальные характеристики оборудования позволяли использовать его только в одноканальном режиме, только в лаборатории под присмотром специалиста, а получаемые данные были ограничены только оптической толщиной в ясную погоду. В результате выполнения диссертационной работы, функционал радиометрического комплекса значительно расширился, а его эксплуатационные характеристики улучшились. Собран и отлажен 2-мм канал радиометра МИАП-2 «Мус-Хая», организована система удалённого доступа, а оборудование адаптировано для работы в любых метеоусловиях. Разработанная и изготовленная метеостанция значительно расширила перечень данных, получаемых радиометрическим комплексом.

Проведённые научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в значительной степени определили ценность и уникальность этого аппаратного комплекса. Разработанная методика может быть использована практически на любой аппаратуре, работающей по методу «атмосферных разрезов».

На настоящий момент (по завершении диссертационного исследования) радиометрический комплекс МИАП-2 является устройством, готовым (и уже проходящим) к эксплуатации в жёстких погодных условиях. Дальнейшие планы работ по тематике астроклимата связаны с исследованием новых мест, но не доработкой оборудования. На настоящий момент одним из важнейших результатов, подтверждающих надёжность оборудования и качество проведённых работ по модернизации, является тот факт, что комплекс в течение года успешно функционировал в полярных условиях Шпицбергена, Северного Кавказа и на других отдалённых площадках без фатальных сбоев и практически без обслуживания специалистами. Это – беспрецедентная надёжность для экспериментального научно-исследовательского оборудования, не проходившего испытания по канонам космических и военных программ.

Данные, полученные с этого прибора, позволили сделать ряд важных заключений об астроклимате рассматриваемых площадок и сформулировать предложения к корректировке предлагаемых проектов по строительству обсерваторий мм диапазона. В частности, автором разработаны рекомендации для ведущейся корректировки технического задания на главное зеркало обсерватории МРАО Суффа: рекомендовано ограничить требования к точности поверхности большого 70-метрового зеркала до достаточных для работы в 2-мм окне прозрачности значений, ввиду ограниченной прозрачности атмосферы на самом плато. При этом сформулировано предложение дополнить состав инструментов МРАО Суффа малым (12-15 м) зеркалом более высокого качества, работоспособного в окнах прозрачности 1.3 и 0.8 мм, которое рекомендуется установить на склоне близлежащей вершины. Рекомендованное снижение требований к качеству поверхности в разы снизит стоимость антенны, что с большим запасом позволит реализовать предлагаемое дополнение малым зеркалом и на годы уменьшит время,



требуемое для начала практических наблюдений на МРАО Суффа.

Основные результаты 3й главы опубликованы в 4-х статьях [83, 94, 108, 109] и 18-ти тезисах конференций. [16, 38, 95–98, 110–119]

### ГЛАВА 3 Повышение чувствительности и температурного диапазона резонаторного спектрометра мм и субмм диапазонов

#### 3.1 Методика и принцип работы резонаторного спектрометра. Постановка задачи

Резонаторный спектрометр позволяет определить потери излучения в образце газовой среды на прохождение или в плоском зеркале на отражении. Универсальность методов спектроскопии, основанных на квазиоптических резонаторах, обусловлена простым интуитивным правилом: разница добротностей нагруженного и ненагруженного резонаторов характеризует диссипацию (потери) энергии излучения в том, чем нагружен резонатор. Поэтому через потери энергии можно вычислить поглощающие свойства материала, помещённого в луч резонатора на конкретной частоте. [28]

В общем виде формула, определяющая потери в образце, выглядит следующим образом:

$$P = \frac{2\pi}{c} \cdot (\Delta f - \Delta f_0) \quad (3.1)$$

$P$  – коэффициент потерь в образце, отн.ед ( $P/P_0$ )

$c$  – скорость света в вакууме, м/с

$\Delta f$  – ширина резонансного контура нагруженного резонатора, Гц

$\Delta f_0$  – ширина резонансного контура ненагруженного резонатора, Гц

В зависимости от задачи, модифицируется методика и алгоритм расчётов, но идеология остаётся неизменной. Структурная схема установки представлена ниже (Рисунок 3.1). Установка создана на базе резонаторного спектрометра, разработанного в ИПФ РАН [26–28, 120]. Величиной, характеризующей потери излучения в исследуемом веществе, является добротность двух квазиоптических резонаторов Фабри-Перо. Их длина различается вдвое, а расположены они в вакуумной камере [68, 69]. Длинный резонатор образован двумя одинаковыми сферическими зеркалами (симметричный), короткий резонатор образован одним сферическим и одним плоским зеркалами (полусимметричный). Устройство системы возбуждения, регистрации и обработки сигнала резонатора подробно изложены в [30, 69, 121]. К настоящему моменту рабочий диапазон частот резонаторного спектрометра расширен до 520 ГГц. Подробнее о спектрометре и его параметрах изложено в работах [68, 69, 72, 122, 123], а также в методических указаниях к лабораторной работе на этом спектрометре [124].

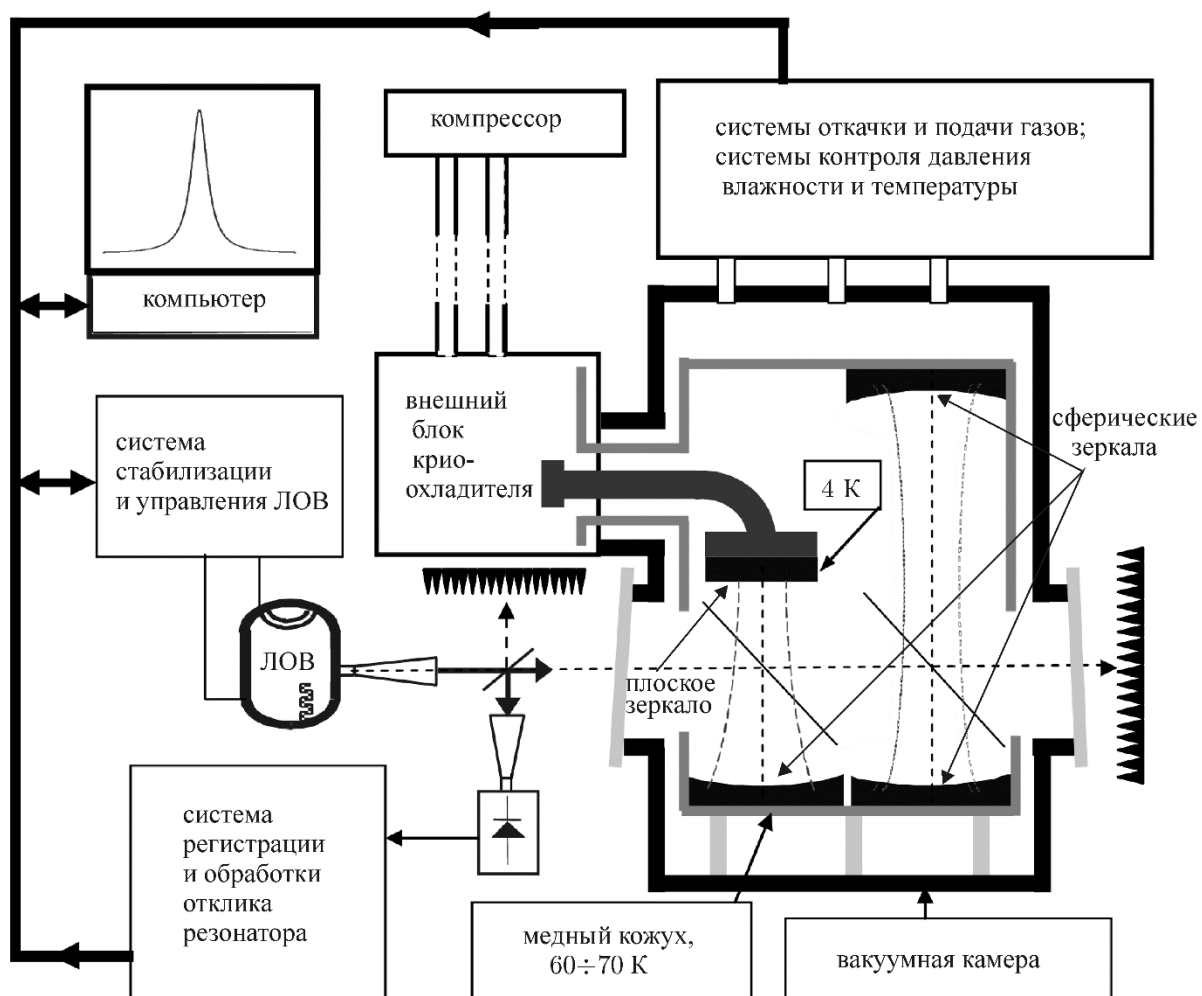


Рисунок 3.1 – Функциональная схема резонаторного спектрометра

В течение всего времени развития этого инструмента, с его помощью решались самые разные задачи, каждая из которых предъявляла свои требования по параметрам спектрометра и вносила свои доработки в конструкцию всей системы в целом. Таким образом, резонаторный спектрометр и сопутствующие системы приобретали набор новых функций, улучшенных параметров и т.д. К примеру, до начала настоящей работы, спектрометр был адаптирован под задачи измерения спектров атмосферных газов при различных температурах. Для этих экспериментов, чувствительная часть спектрометра – его квазиоптические резонаторы – были помещены в корпус обычного бытового холодильника (Рисунок 1.2), что позволяло варьировать состав и температуру газовой смеси внутри и успешно измерять её спектр. Не смотря на незаmysловатость такого инженерного решения, эксперименты принесли существенные результаты и были высоко оценены в научном сообществе (см, например, [70] и ссылки).

Настоящая часть диссертационной работы направлена на улучшение характеристик комплекса при измерениях параметров атмосферных газов для нужд атмосферной спектроскопии, а также адаптацию комплекса для измерения потерь на отражение от металлов и

металлизированных поверхностей радиоволн миллиметрового диапазона при криогенных температурах. Набор характеристик и узлов спектрометра, улучшенных в данной работе, сведены в таблицу (Таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Таблица основных эксплуатационных характеристик, подлежащих улучшению.

№	Параметр	Было	Цель
1	Величина паразитной интерференции опорной характеристики, кГц ширины отклика резонатора	0.45 RMS @ 105 – 148 ГГц 0.65 RMS @ 220 – 240 ГГц	0.32 RMS @ 105 – 148 ГГц 0.35 RMS @ 220 – 240 ГГц
2	Режим снятия спектра	полуавтоматический	автоматический
3	Тепловые потери в криогенной части	3-5 К	не более 1 К
4	Измерение температуры	10-канальный на основе Pt100, от -50 до +120°C	8-ми канальный криогенный на основе полупроводниковых датчиков от 3 до 350K
5	Управление амплитудой резонанса	ручное	автоматическое
6	Термостабилизация термобарокамеры	естественная	принудительная

### 3.2 Расчёт и модернизация квазиоптического тракта спектрометра. Снижение уровня паразитной интерференции

Постановка задачи в данном разделе возникла из-за необходимости снижения влияния паразитной интерференции, ставшей одним из определяющих факторов в чувствительности и разрешающей способности резонаторного спектрометра. Она состоит в следующем: 1) рассчитать параметры пучка, выходящего из системы запитки резонаторов; 2) путём расчётов и экспериментов выяснить наиболее проблемные места квазиоптического тракта, формирующие паразитную интерференцию; 3) принять меры по уменьшению интерференции; 4) провести испытания модернизированного квазиоптического тракта.

#### 3.2.1 Расчёт поля на раскрыве рупора

Расчёт поля на выходе рупора необходим для пересчёта параметров пучка в дальней зоне и поиск критических мест для интерференции. Проектировались рупора по эмпирическим расчётам, среди которых было допущение, что кривизна фазового фронта примерно совпадает с кривизной сферической поверхности, радиус которой равен длине рупора, и набег фазы на раскрыве не должен превышать  $\lambda/16$ . Однако, это допущение верно лишь отчасти, и нуждается в проверке. Для выполнения первой задачи необходимо рассчитать электродинамику рупора. Однако, в такой конфигурации (сечение конуса пирамидой) строгий электродинамический расчёт невозможен. Таким образом, встаёт задача численного определения параметров каждой рупорной антенны индивидуально (на каждый диапазон).

В качестве основных характеристик рупорных антенн выступают два параметра – кривизна фазового фронта  $R(z)$  и ширина пучка  $2\omega_0$  по уровню  $1/e$  на раскрыве рупора. Дальнейший ход пучка может быть рассчитан из этих параметров достаточно точно [125]. Всего в экспериментах используются 6 т.н. «досок», то есть сменных конструкций, каждая из которых включает в себя ЛОВ, ответвитель и смеситель системы ФАПЧ, аттенуатор, приёмный и передающий рупора, разделитель и детектор сигнала. Паразитная интерференция определяется только параметрами пучка, определяемыми геометрией рупора, поэтому остальные части волноводного тракта в данной работе не рассматриваются.

Поскольку прямые измерения параметров выходящего пучка рупора на мм и субмм волнах являются технически сложной задачей, воспользуемся программой численного расчёта CST Microwave studio. В этой программе было создано три объёмных модели реальных рупоров, работающих на трёх диапазонах длин волн. Рупора имеют одинаковую конструкцию и отличаются лишь размерами волновода и диаметром раскрыва. Модели с хорошей точностью повторяют форму реальных рупоров (Рисунок 3.2).

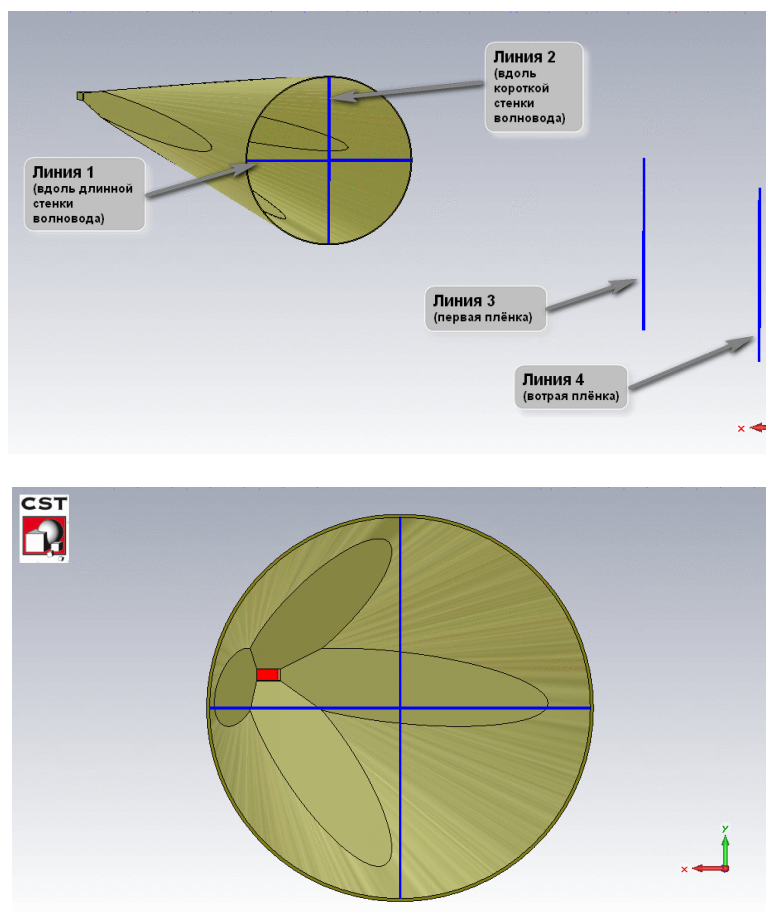


Рисунок 3.2 – Объёмная модель рупоров. В результате расчёта будут получены распределения полей на синих линиях.

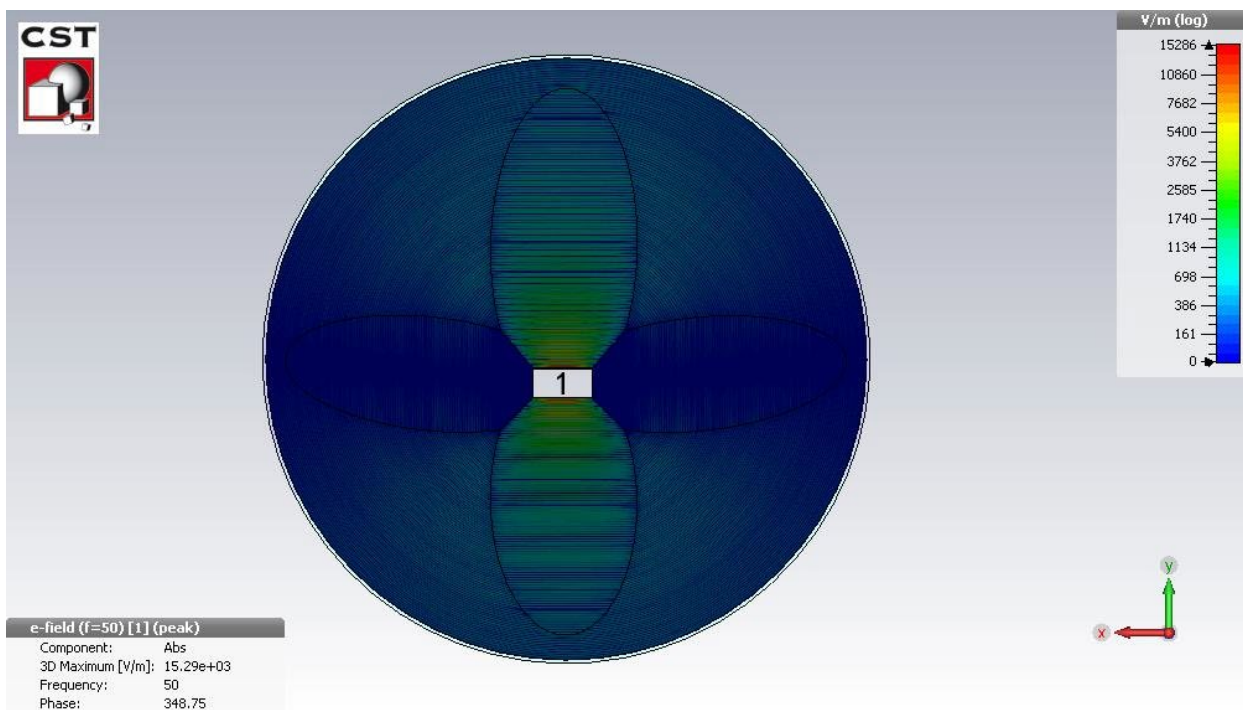


Рисунок 3.3 - Напряжённость поля на внутренней поверхности рупора.

Линии 1-4 позволяют определить все составляющие поля вдоль них: амплитуду, фазу, мнимую и реальную части. Линии 1 и 2 расположены на раскрыве рупора, 3 и 4 – на 1й и 2й плёнках связи соответственно. Последние две линии сильно увеличивают объём расчётов (с 12 до 200 млн. ячеек) и были использованы лишь для самопроверки результатов численного расчёта на рупоре 6-ти миллиметрового диапазона.

Результаты расчётов могут быть представлены, как графически, так и численно, для дальнейшей аппроксимации. Ниже представлены кривые, характеризующие амплитуду поля на раскрыве рупора в плоскости E (на линии 2) для каждого диапазона (Рисунок 3.4, Рисунок 3.5 и Рисунок 3.6).

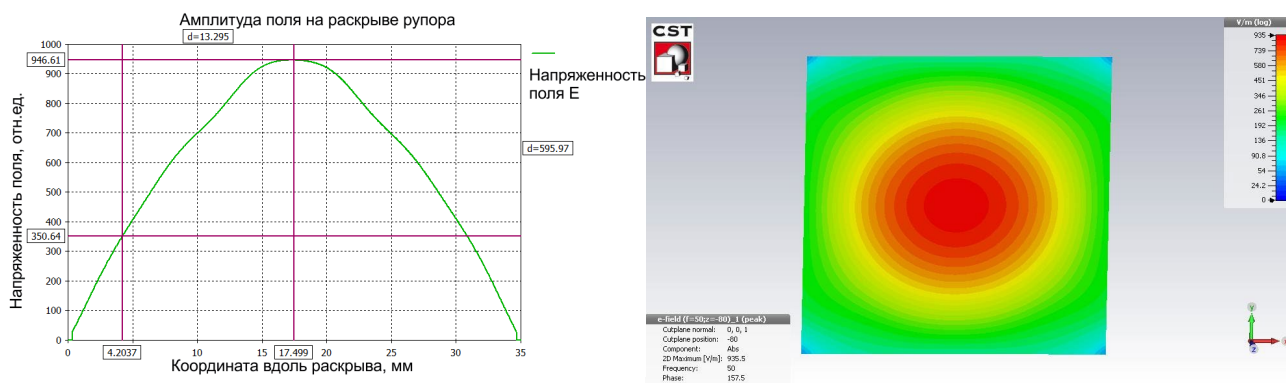
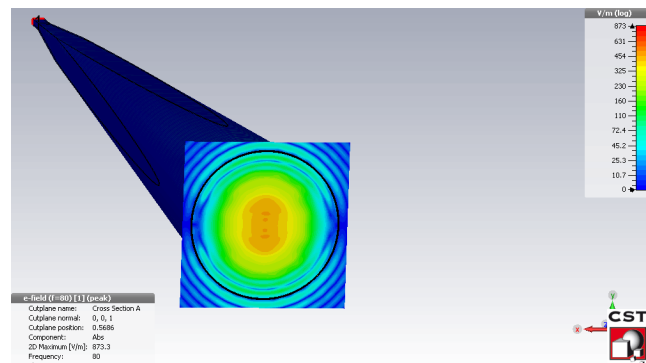
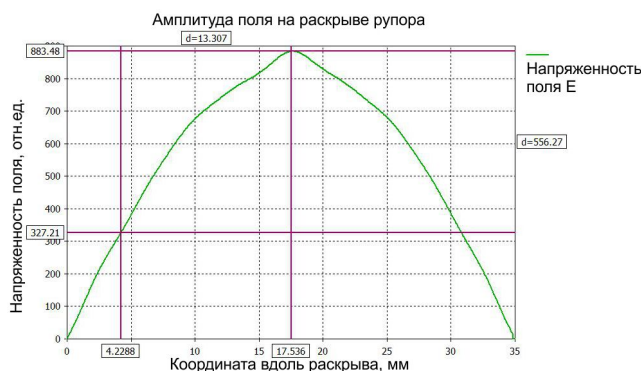
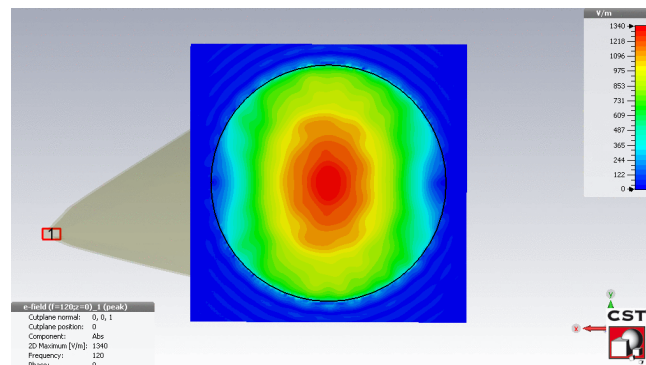
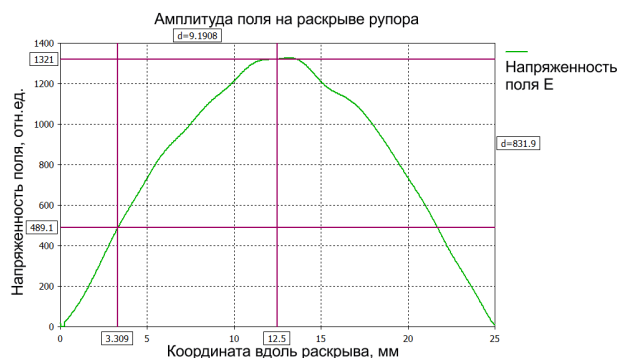
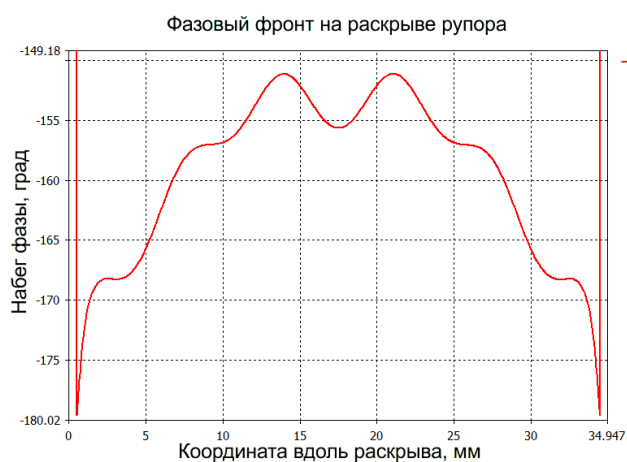


Рисунок 3.4 – Амплитуда поля на раскрыве рупора №1 (50ГГц или  $\lambda = 6\text{мм}$ )

Рисунок 3.5 – Амплитуда поля на раскрытие рупора №2 (80ГГц или  $\lambda = 4$ мм)Рисунок 3.6 – Амплитуда поля на раскрытие рупора №3 (120ГГц или  $\lambda=3$ мм).

Линии, проведённые через графики, соответствуют максимальному уровню напряженности поля по уровню  $1/e$ , и соответствующих этим уровням координат оси X в мм. Из последних двух легко определить ширину пучка  $\omega(z=0)$ , то есть на раскрытии.

Задача определения кривизны фазового фронта немного сложнее, поскольку фронт получается не сферический и требуется аппроксимация полученных данных. На рисунках ниже показаны данные расчёта, по оси ординат – набег фазы в градусах вдоль линии 2.

Рисунок 3.7 – Фаза поля на раскрытие рупора №1 (50ГГц или  $\lambda = 6$ мм)

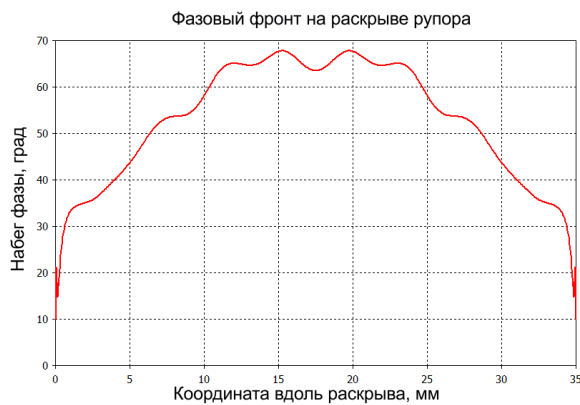


Рисунок 3.8 – Фаза поля на раскрытии рупора №2 (80ГГц или  $\lambda = 4\text{мм}$ )

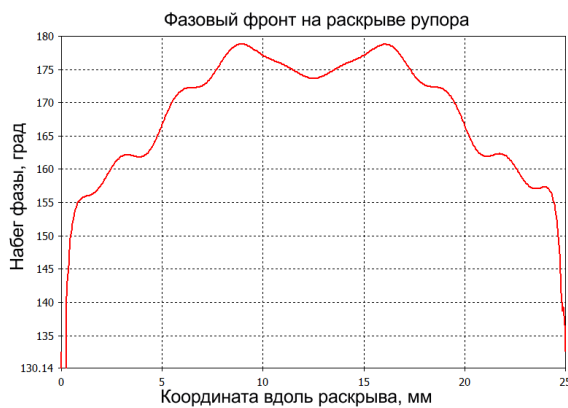


Рисунок 3.9 – Фаза поля на раскрытии рупора №3 (120ГГц или  $\lambda = 3\text{мм}$ )

Данные рисунки отображают прямые результаты расчётов в программе CST MS. Умножив набег фазы на  $\lambda/360$ , можно получить набег фазы в мм, а после аппроксимации окружностью – кривизну фазового фронта  $R(z=0)$ .

Полученные данные моделирования представлены ниже (Таблица 3.2. Прим. к таблице: длина всех рупоров = 300мм.)

Таблица 3.2 – Результаты моделирования.

№ рупора	Рабочий диапазон частот, ГГц	Диаметр раскрытия, мм	Волновод, мм	Центральная частота для расчётов, ГГц	Ширина пучка на раскрытии $\omega(z=0)$ , мм	Кривизна фазового фронта на раскрытии $R(z=0)$ , мм
1 ( $\lambda = 6\text{ мм}$ )	45-80	35	1.8 x 3.6	60	26.6	423
2 ( $\lambda = 4\text{ мм}$ )	70-120	35	1.2 x 2.4	80	26.4	342
3 ( $\lambda = 3\text{ мм}$ )	110-200	25	0.8 x 1.6	120	18.4	378



### 3.2.2 Расчёт параметров пучка в квазиоптическом тракте

При помощи методики, изложенной в [125], рассчитаем размер пучков в наиболее критичных местах квазиоптического тракта – на входном и выходном окнах, а также на плёнках связи. Основные формулы из [125] имеют вид:

$$\omega^2(z) = \omega_0^2 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right] \quad (3.2)$$

$$R(z) = z \left[ 1 + \left( \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right]$$

, где  $z$  – расстояние от раскрыва рупора, мм

$\omega$  – радиус ширины Гауссова пучка, мм

$R$  – радиус кривизны фазового фронта, мм

$\lambda$  – длина волны, мм

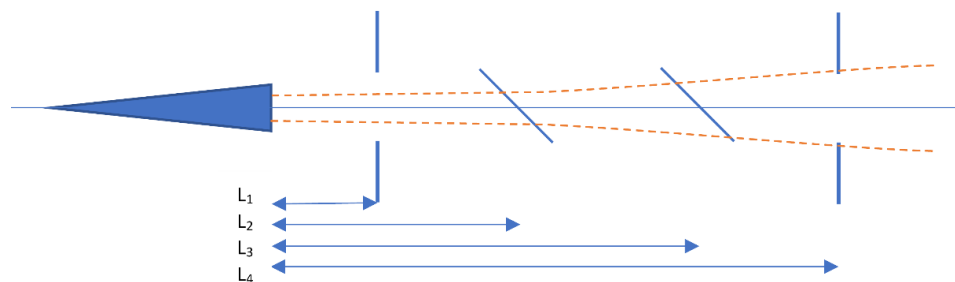


Рисунок 3.10 - Схема запитки резонатора для расчёта параметров пучка.

Таблица 3.3 – Результаты расчёта параметров пучка (размеры в мм).

		Раскрыв рупора $L_1=0$	Входное окно $L_2 = 115$	Первая плёнка $L_3 = 395$	Вторая плёнка $L_4 = 535$	Выходное окно $L_5 = 815$
1 ( $\lambda$ 6 мм) $z=19.2$	Диаметр пучка/ Диаметр тракта	26.6/50	47/120	122/160	161/160	<b>241/120</b>
	Радиус кривизны фронта / Фронт в резонаторе	423/-	-	435/490	569/490	-
2 ( $\lambda$ 4 мм) $z=47.4$	Диаметр пучка/ Диаметр тракта	26.4/50	41/120	89/160	115/160	<b>168/120</b>
	Радиус кривизны фронта / Фронт в резонаторе	342/-	-	485/445	614/445	-
3 ( $\lambda$ 3 мм) $z=11.3$	Диаметр пучка/ Диаметр тракта	18.4/50	32/120	86/160	115/160	<b>172/120</b>
	Радиус кривизны фронта / Фронт в резонаторе	378/-	-	<b>426/214</b>	<b>560/214</b>	-

Из результатов расчёта, представленных в таблице (Таблица 3.3) видно, что все три рупорные системы относительно хорошо обеспечивают резонаторы излучением, однако диаметры пучков по уровню  $1/e$  на выходящем окне шире, чем само окно. Таким образом, наиболее критичным местом в образовании паразитной интерференции является выходное окно вакуумной камеры. Умозрительно это было очевидно, однако в данной конфигурации вакуумной установки расширение выходного окна не представляется возможным. В качестве решения было предложено обклеить выходное окно спектрометра поглощающим материалом для снижения паразитных отражений. Расчёты были выполнены для учёта имеющегося опыта проведения измерений с целью грамотного проектирования квазиоптического тракта в дальнейшем. Оценка эффективности этих мер приведена в конце настоящего раздела.

Кроме того, стоит отметить, что первые два рупора (с широкими раскрытиями – 35мм) довольно хорошо согласованы с резонаторами, чего нельзя сказать о рупоре на диапазон 3мм. Вероятно, в данной конфигурации рассогласование рупора компенсируется мощностью лампы ОВ-71, покрывающей этот диапазон.

В качестве решения проблемы паразитной интерференции предложены и реализованы следующие меры по её снижению:

- Оптимизирована конфигурация входных и выходных окон вакуумной камеры таким образом, чтобы создать асимметрию в возникающих паразитных волнах.
- Создана конструкция, позволяющая фиксировать запитывающий тракт в оптимальном направлении и регулировать его продольное положение микрометрическим винтом.
- Экспериментальным путём выбран оптимальный поглотитель и установлен вокруг внутренней стороны выходного окна вакуумной камеры, что позволило снизить амплитуду паразитной интерференции.

### **3.3 Модернизация узлов спектрометра и её результаты**

На протяжении всей работы с Резонаторным спектрометром процесс его модернизации был направлен на увеличение степени автоматизации измерений, повышение их точности и расширение рабочих диапазонов по температуре и частоте. В целом за последние годы, при непосредственном участии диссертанта, резонаторный спектрометр обрёл совершенно новый функционал: появилась возможность исследования потерь на отражение волн мм диапазона от плоских зеркал при криогенных температурах. Кроме того, за время работы над диссертацией был обновлён комплекс аппаратуры, включающий в себя: систему управления, сбора и обработки информации на основе ПК и различных программ; систему ФАПЧ в части ВЧ-синтезатора, быстрого синтезатора и блока синхронизатора; систему ЦАП-АЦП и цифровых входов/выходов

для приёма сигнала с резонатора и управления периферийными устройствами; блок питания ЛОВ; система управления моторизированным аттенюатором; система термостатирования квазиоптического тракта. Личный вклад диссертанта в части модернизации и обновления аппаратуры резонаторного комплекса состоял в автоматизации термостатирования квазиоптического тракта и механического аттенюатора, разработке малошумящего УПТ, а также сборке и настройке новых систем и участие в проведении экспериментов.

### 3.3.1 Автоматизация системы регулирования амплитуды резонансной кривой

Новая конструкция измерительного комплекса предусматривала полную автоматизацию процесса измерений. Функции оператора сводились к напуску газовой среды и запуску измерений, остальное должно происходить автоматически. Последним элементом, управление которым требовало участия оператора оставался механический аттенюатор. Решение этого вопроса проводилось в два этапа – для начала оснастить имеющиеся механические аттенюаторы шаговыми двигателями и отработать систему обратной связи по амплитуде сигнала с резонатора, затем заменить механизированные аттенюаторы на PIN-диоды. На некоторые высокочастотные диапазоны PIN-диодов либо не существует в продаже, либо их характеристики оставляют желать лучшего, поэтому эти диапазоны остались с механизированными аттенюаторами.

Разработка механической части велась совместно с конструкторами и механиками. Для простоты коммутаций были выбраны 5-ти проводные шаговые двигатели на 200 шагов на оборот. Между шаговым двигателем и аттенюатором были установлены спиральные поворотные втулки и кулачковые толкатели концевых выключателей (Рисунок 3.11).

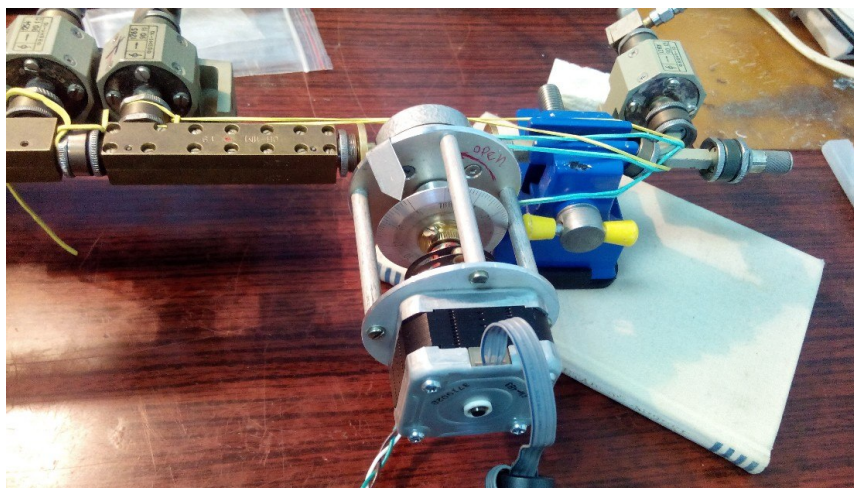


Рисунок 3.11 – Тестовые измерения автоматизированной системы управления аттенюатором.

Была разработана и собрана схема управления на основе 4-х силовых MOSFET транзисторов IRF630N. (Рисунок 3.12) Схема исполнена на печатной плате, собраны разъёмы и кабели, подобран блок питания и корпус. Резисторы на затворах защищают от наведённого потенциала, их номинал составляет 6.3 кОм.

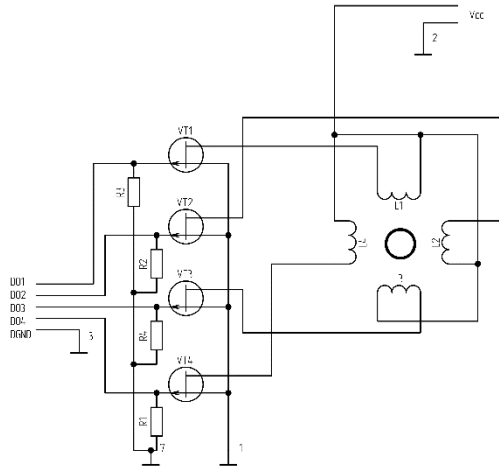


Рисунок 3.12 – Эскизная схема управления ШД, собранная для автоматизации измерений.

В дальнейшем эта схема была заменена на микросхему 4-х канального Н-моста L298N. Она уже привязана к логическим уровням 5В, и, кроме того, выполнена на печатной плате с радиатором. Обе схемы подключаются одинаково к 4-м цифровым выходам модуля ЦАП-АЦП. Программное управление поочередно даёт импульсы на 4 вывода, и, таким образом, вращает ШД.

Следующий вопрос состоял в калибровке этого управления по величине сигнала отклика резонатора. Для начала, вручную снималась зависимость амплитуды сигнала отклика резонатора от условных «шагов аттенюатора», фигурирующих в программе управления. Эта характеристика снималась на разных частотах излучения в пределах диапазона каждой из запитывающих систем отдельно. Затем эти характеристики были загружены в программу записи спектров. В процессе съёма спектральной характеристики программа обращается к этим данным, выставляя аттенюатор в нужное положение в три итерации «измерение амплитуды» -> «вращение аттенюатора» -> «измерение амплитуды». Число итераций должно быть минимально, для сокращения времени записи, и, благодаря проведённой работе по калибровке, в большинстве случаев амплитуда выставляется за первую итерацию.

Следующий этап, установка PIN-диодного аттенюатора, начался с подборки схемы драйвера. Основным условием работы этой схемы была безопасность для диода, защита от КЗ и перенапряжения. Кроме того, при включении питания и в отсутствии управляющего напряжения диод должен быть открыт, т.е. иметь нулевой ток. Поскольку катод диода подключен к корпусу, классическая схема стабилизации тока не подходит, поскольку в ней корпус отвязан от земли

токадающим резистором. В результате расчётов была собрана следующая схема (Рисунок 3.13).

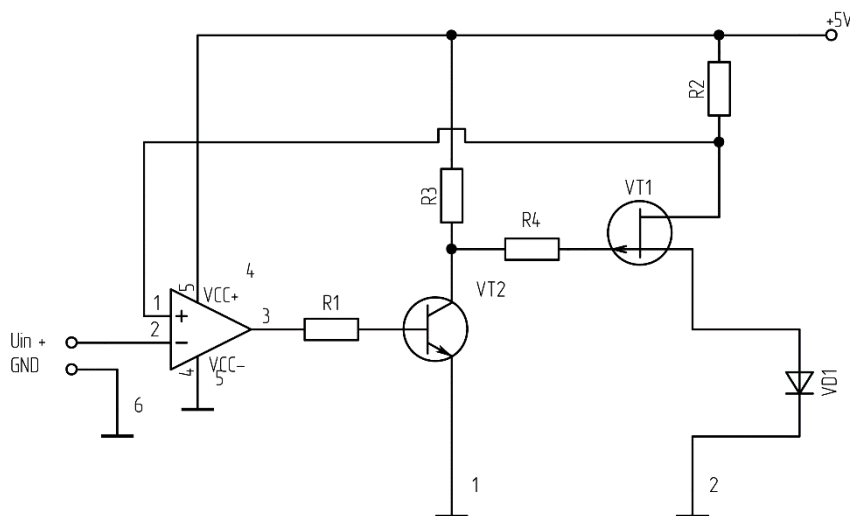


Рисунок 3.13 – Эскизная схема драйвера PIN-диода.

В этой схеме операционный усилитель выступает компаратором, на его инверсный вход подаётся опорное напряжение с ЦАП, а на положительном входе - напряжение обратной связи по току с токового резистора  $R_2=150$  Ом. Напряжение на выходе ОУ  $U_{oy}=U_{R2}-U_{in}$ , т.е. в отсутствии входного напряжения  $U_{oy}=5$ В. Транзистор VT2 инвертирует это напряжение, то есть на его коллекторе будет 0В при  $U_{in}=0$  и 5В при подаче опорного питания = 5 В. Полевой транзистор VT1 открывается напряжением, снятым с коллектора VT2. Резисторы R1 и R3 подбираются эмпирически исходя из коэффициента усиления транзистора  $\beta$  и влияют лишь на крутизну характеристики  $U_{in}$  по отношению к току диода  $I_d$ . В этой схеме VT2 – КТ3102,  $R_1=10$  кОм,  $R_2=4.7$  кОм. Резистор  $R_4=150$  Ом и установлен лишь для защиты на случай пробоя VT1. Максимальный допустимый ток диода =30мА, поэтому токовый резистор R2 подобран исходя из напряжения питания и максимального тока диода  $R_2=5/0.03$ .

Таким образом, собран и испытан драйвер PIN-диода для управления амплитудой сигнала отклика с резонатора. Его схема довольно проста, надёжна и показала себя с наилучшей стороны при испытаниях. Одно из положительных её свойств – защита от неграмотного специалиста: разрешение ЦАП позволяет дать до  $\pm 10$  В, но даже в случае перенапряжения по входу ОУ, PIN-диод не сгорит.

### 3.3.2 Электромеханическая система регулировки длины резонатора

Со временем возникла необходимость варьировать длину резонатора в ходе эксперимента. Эта возможность продиктована как нуждами самого эксперимента: для подстройки центра

резонансной линии к линии поглощения водяного пара или кислорода, так и потенциальной возможностью снижения влияния паразитной интерференции на эксперимент. Поскольку резонаторы находятся внутри вакуумной (герметичной) полости, механическое передвижение может быть лишь с помощью шагового двигателя и механической передачи. Совместно с конструкторами была разработана механическая червячная передача, конструкция крепления ШД и концевых выключателей.

Выбор Шагового двигателя пал на ДШИ-200-2, который после продолжительного вымачивания в ИПС практически не отгаживал в вакууме. Первый драйвер ШД был построен на основе микросхем L298N и L297, включая периферийные элементы и схемы регулировки режимов. В качестве источника синхроимпульсов был использован лабораторный звуковой генератор импульсов ГЗ-106, а в последствии был заменён на цифровой выход модуля ЦАП/АЦП.

В дальнейшем этот блок был заменен на цифровую схему с ручным управлением и возможностью подключения цифрового интерфейса. Новая схема управления положения зеркала включает в себя: драйвер DM 542, Arduino Nano, OLED дисплей 128x64, энкодер, а также блок питания, корпус, разъёмы и электроустановочные изделия. Модуль Arduino считывает поворот энкодера, пересчитывает его в изменение положения зеркала в резонаторе и отображает введённое значение на дисплее в микронах. После нажатия на кнопку, в Arduino рассчитывается нужное число импульсов для драйвера, который вращает шаговый двигатель, сдвигая зеркало на заданное расстояние. Удалось добиться точности выставления положения зеркала около 1 микрона (что более чем достаточно), с возможностью регулировки скорости перемещения зеркала в широких пределах. За счёт применения программируемого контроллера Arduino, система получилась адаптивной и может работать по любой логике, в том числе есть возможность управления этим блоком через последовательный COM-порт компьютера.

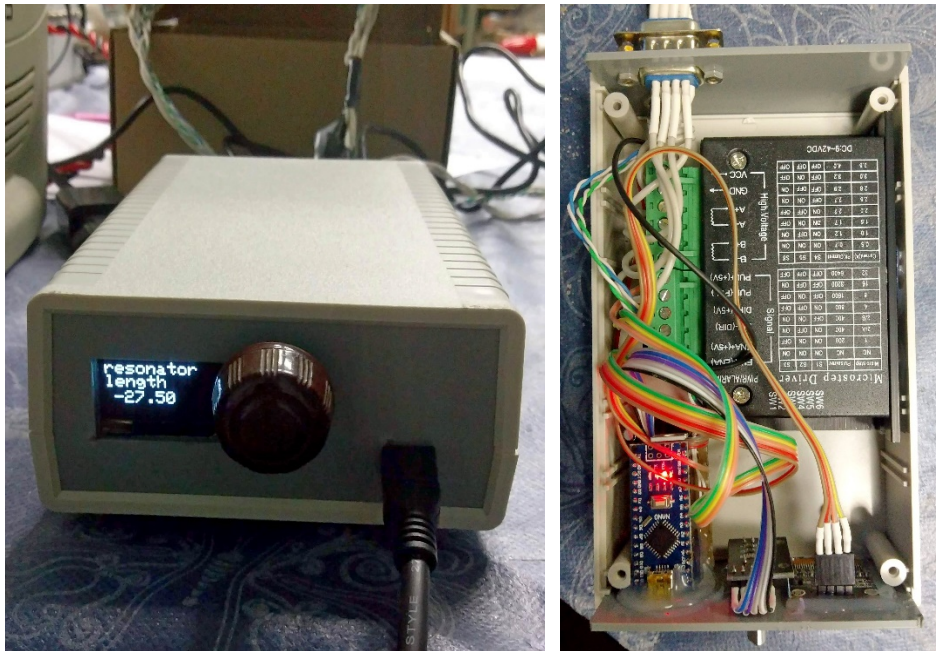


Рисунок 3.14 – Плата управления ШД для изменения длины резонатора.

### 3.3.3 Автоматизированная система термометрии квазиоптического резонаторного комплекса

На этом этапе основной задачей было обеспечение возможности проведения измерений при криогенных температурах в части системы измерения температуры. Термометрия комплекса на момент начала работ представляла собой 10-ти канальный измеритель с последовательным опросом резистивных термодатчиков Pt-100. Температурный диапазон этих датчиков начинается от  $-100^{\circ}\text{C}$ , чего недостаточно для криогенных измерений. Новая система измерений состоит из криогенных датчиков DT470 (двухпроводные) и DT670 (четырёхпроводные), а также 8-ми канального температурного монитора Temperature Monitor 218 фирмы LakeShore.



Рисунок 3.15 – Система термометрии на базе монитора LakeShore.

Инженерная задача сводилась к настройке оборудования и организации кабельной системы. Поскольку измерения проводятся по 4-х точечной схеме, сопротивление кабеля играет вторичную роль, и первичным стало экранирование и защита от наводок. Внешний кабель был выполнен из 16-ти витых пар в общем экране. Подключение организовано разъёмами D-SUB к монитору и СНЦ28-32 к вакуумной камере. Коммутация внутри вакуумной камеры организована лакированными кабелями и керамическими плоскими разъёмами для уменьшения испарения в вакууме остаточных загрязнений с конструкции и/или экстрагирование летучих компонентов материала (отгаза). Правила вакуумной культуры требуют применения специализированных материалов и покрытий. Конструкция коммутаций предусматривает возможность разъединения под крышкой вакуумной камеры для её демонтажа, а также отдельное подключение термодатчиков.

### 3.3.4 Малошумящий усилитель постоянного тока для системы считывания отклика резонатора

В записи резонансной линии отклика резонатора непосредственно участвует малошумящий усилитель постоянного тока (УПТ), усиливающий напряжение с амплитудного детектора приёмного рупора. Его шумовые характеристики напрямую влияют на шумовой вычет после аппроксимации отклика резонатора функцией Лоренца. Чем больше шумовой вычет, тем больше ошибка аппроксимации и, соответственно, хуже точность определения ширины резонансной кривой. Таким образом, шумовые характеристики этого УПТ напрямую влияют на результирующую ошибку измерений спектра.

Задача в этой части сводилась к разработке схемы этого усилителя и его изготовлению. Техническое задание на усилитель следующее: он должен обладать минимально возможными



шумами, предусмотреть возможность варьировать коэффициент усиления (по амплитуде) 100 или 1, обрезать полосу пропускания выше 10 кГц или 100 кГц. Было решено реализовать схему на двух каскадах с коэффициентами усиления 10. В качестве основной (первой) микросхемы усиления был выбран малошумящий операционный усилитель AD745, на нём же реализован ФНЧ с варьлируемой полосой за счёт переключения ёмкостей. Второй каскад реализован на операционном усилителе OP27 с полосой 1МГц. Переключение коэффициента усиления происходит на втором каскаде: сигнал после первого каскада передаётся либо на второй, либо на делитель 1:10. Для подавления наводок вся схема была помещена в металлический корпус, а цепи питания экранированы и закорочены ёмкостями. Входной кабель выполнен в двойной экранировке. Блок питания собран на маломощном трансформаторе и микросхеме стабилизации напряжения LM317. Принципиальная схема представлена ниже.

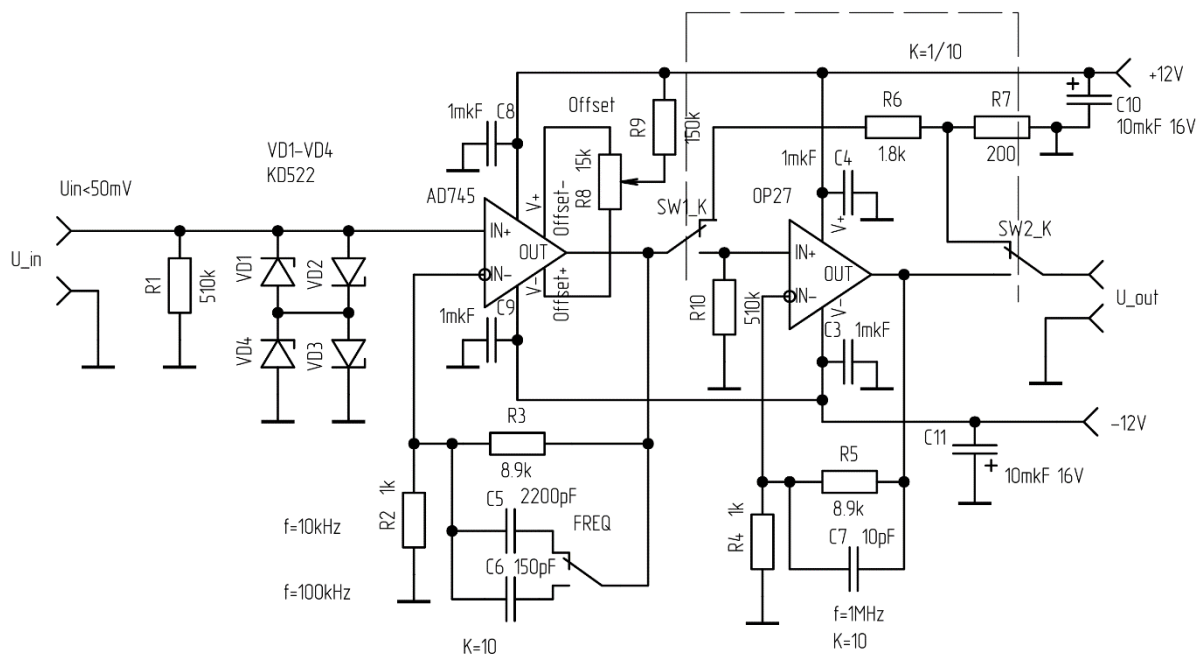


Рисунок 3.16 – Эскизная схема малошумящего усилителя постоянного тока



Рисунок 3.17 – Внешний вид усилителя

### 3.3.5 Расчёт и модернизация тепловых криогенных интерфейсов

Одной из ключевых проблем при проведении исследований металлических поверхностей на отражение мм волн при криогенных температурах оказалась задача охлаждения этих элементов. Принцип измерений подразумевает, что исследуемый образец будет жёстко закреплён в качестве плоского зеркала резонатора, а также будет подвержен диффузному тепловому излучению из радиопрозрачных окон криостата и излучению с ЛОВ. Криогенная машина замкнутого цикла обеспечивает на своём тепловом интерфейсе температуру 4К при максимальной тепловой нагрузке 1.5 Вт. В то же время квазиоптический метод измерений не позволяет должным образом изолировать образец от теплового излучения извне. Таким образом встаёт задача минимизации потерь холода на пути от холодильной машины к образцу. Первый вариант конструкции тепловых интерфейсов был сделан без должных расчётов и не позволял охладить образец ниже 8К, что послужило предпосылкой к созданию нового холодопроводящего интерфейса.

Для выявления «слабых мест» старой кондуктивной системы охлаждения, были оценены теплопритоки различного вида: кондуктивный (по элементам конструкции), конвекционный (через остаточные газы) и радиационный (от окружающих элементов конструкции). Тепловой расчёт проводился по методике [126] для стационарного режима с использованием справочных данных [127, 128]. Основные соотношения для стационарных тепловых расчётов хорошо известны [129] и представлены ниже.

$$Qt = \frac{\Delta T}{Rt} = \frac{\Delta T \lambda t St}{L} \quad (3.3)$$

где

$Qt$  – тепловой поток, Вт

$\Delta T$  – температурный градиент, К

$Rt$  – тепловое сопротивление, К/Вт

$\lambda t$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)

$St$  – площадь сечения холодопровода, м<sup>2</sup>

$L$  – длина холодопровода, м

$$Qt = Ct_0(T_2^4 - T_1^4) F_x \varepsilon_{\text{пр}}$$

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_x} + \frac{F_x}{F_T} \left( \frac{1}{\varepsilon_T} - 1 \right)}$$
(3.4)

где:

$Ct_0$  – постоянная Стефана-Больцмана =  $5.7 \cdot 10^{-8}$  Вт/( $\text{м}^2\text{К}^4$ )

$F_x$  – площадь поверхности холодопровода,  $\text{м}^2$

$F_T$  – площадь поверхности «тёплого» окна криостата,  $\text{м}^2$

$\varepsilon_x = 0.0008$  – степень черноты исследуемого образца зеркала

$\varepsilon_T = 0.8$  – степень черноты «тёплого» окна криостата

$T_1, T_2$  – температуры поверхностей, участвующих в радиационном теплообмене, К.

Конвекционными теплопритоками можно пренебречь, поскольку вакуум в данной криовакуумной системе не хуже  $10^{-3}$  мБар [126]. Расчётный кондуктивный теплоприток по текстолитовым стойкам составляет около 4.7 мВт. Тепловая радиационная нагрузка от стенок экрана и конструктивных элементов резонатора составляет около 28 мВт. Расчёт радиационных теплопритоков затрудняет то, что на образец попадает диффузное излучение от входного и выходного окон для луча от ЛОВ, и вклад этого излучения определить затруднительно. Однако, поскольку система находится в термодинамическом равновесии при работающем криоохладителе (1.5 Вт при 4К), можно сделать вывод, что доминирующая доля тепловой нагрузки на образец приходится на тепловое излучение через открытые оптические окна. Это нормальная ситуация для криостата, она свидетельствует о хорошем исполнении теплоизоляционных конструкций. Избежать паразитного нагрева образца от окон ввода излучения технически сложно (учитывая ширину диапазона частот спектрометра), поэтому разумным вариантом остаётся изготовление качественного холодопровода с низким тепловым сопротивлением.

Задача расчёта сводится к расчёту наиболее оптимальной конструкции и поиску материала холодопровода, которые в совокупности смогли бы обеспечить потери не более 1К. Теплопроводность меди критически зависит от чистоты металла, что особенно проявляется при криогенных температурах [130]. При этом стоимость особо чистого материала на порядки больше стоимости обычной конструкционной меди. С этой точки зрения, оптимальный выбор материала пал на цельную заготовку из меди чистотой 99.98% (M06) и гибкий жгут из меди 99.95% (M16).

По результатам расчётов совместно с технологами была разработана новая конструкция холодопровода. Расчётно-конструкционная схема новой конструкции приведена на рисунке ниже. Холодопровод состоит из трёх частей: две одинаковые цилиндрические детали крепятся к

плоским интерфейсам образца и криомашины с одной стороны, и плотно обжимают медный жгут – с другой (см. фото Рисунок 3.19).

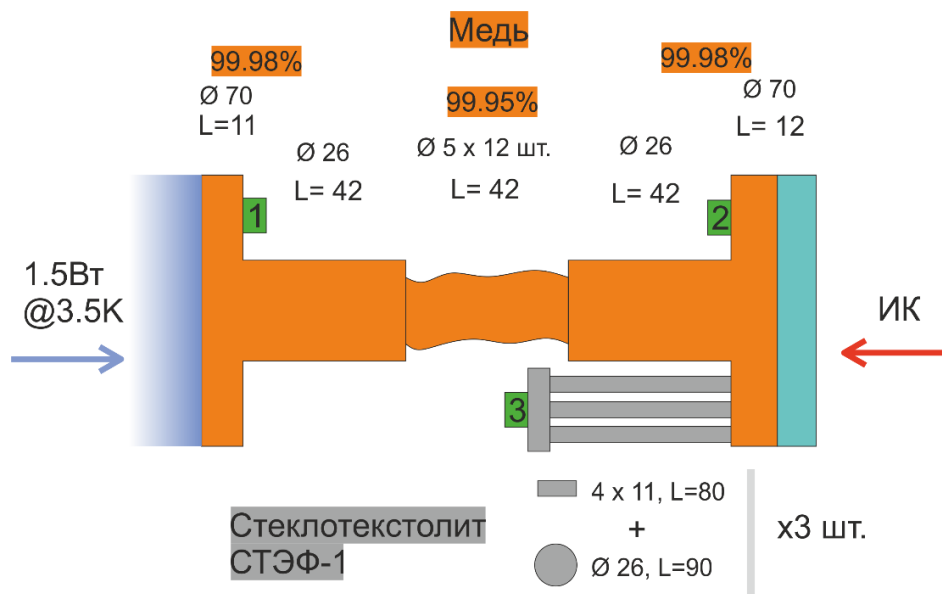


Рисунок 3.18 – Комбинированная расчётно-конструкционная схема нового холодопровода. Слева – интерфейс криомашины замкнутого цикла. В середине – медный холодопровод из трёх деталей. Справа – исследуемый образец. Справа внизу – стеклотекстолитовые стойки.

Таблица 3.4 – Характеристики криогенных тепловых интерфейсов.

Теплофизические и механические параметры	Старая система кондуктивного охлаждения	Новая система кондуктивного охлаждения
Длина гибкой части	150 мм	42 мм
Сечение гибкой части	175 мм <sup>2</sup>	235 мм <sup>2</sup>
Тепловой контакт гибкой и твердой частей	прижим 2-мя винтами М4	обжим жгутов высоким давлением
Чистота меди гибкой части	99.95%	99.95%
Чистота меди твердой части	неизвестно	99.98%
Термическое сопротивление гибкой части	2.6 К/Вт	0.6 К/Вт
<b>Суммарное термическое сопротивление холодопровода</b>	<b>2.7 К/Вт</b>	<b>0.8 К/Вт</b>

Таким образом, путём расчётного анализа конструкции интерфейса были выявлены и учтены три фактора, главным образом определяющих величину перепада температур по длине холодопровода в данной конструкции: тепловой контакт элементов холодопровода между собой, материал холодопровода и его сечение. Новая конструкция изготовлена с учётом этих факторов. В результате, удалось снизить суммарный перепад температур по тепловому тракту с **4К до 0.9К**, что позволило провести важнейшие исследования характеристик отражения от металлов и металлизированных поверхностей. На фотографии представлен внешний вид холодопровода.

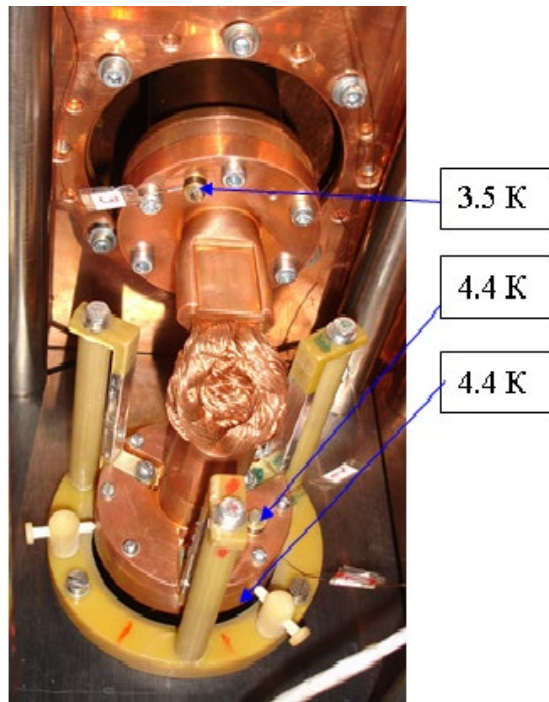


Рисунок 3.19 – Разработанный высокоэффективный холодопровод для проведения измерений при криогенных температурах гелиевого уровня (4К).

### 3.4 Выводы по главе 3

Глава посвящена созданию и/или модернизации элементов аппаратной части резонаторного спектрометра миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, а также развитию методик расчёта параметров квазиоптических волноведущих структур спектрометрического комплекса.

По итогам расчётов, приведённых в разделе 3, были предложены рекомендации для снижения уровня паразитной интерференции и улучшения эксплуатационных характеристик в целом. В результате были предприняты меры:

- Оптимизирована конфигурация входных и выходных окон вакуумной камеры таким образом, чтобы создать асимметрию в возникающих паразитных волнах.
- Создана конструкция, позволяющая фиксировать запитывающий тракт в оптимальном направлении и регулировать его продольное положение микрометрическим винтом.
- Экспериментальным путём выбран оптимальный поглотитель и установлен вокруг внутренней стороны выходного окна вакуумной камеры, что позволило снизить амплитуду паразитной интерференции.

В качестве примера результатов модернизации спектрометра, приведён сравнительный анализ паразитной интерференции до и после модернизации (Рисунок 3.20). Среднеквадратичный разброс значений ширины резонансного контура в диапазоне 220-240 ГГц уменьшился примерно в 2 раза.

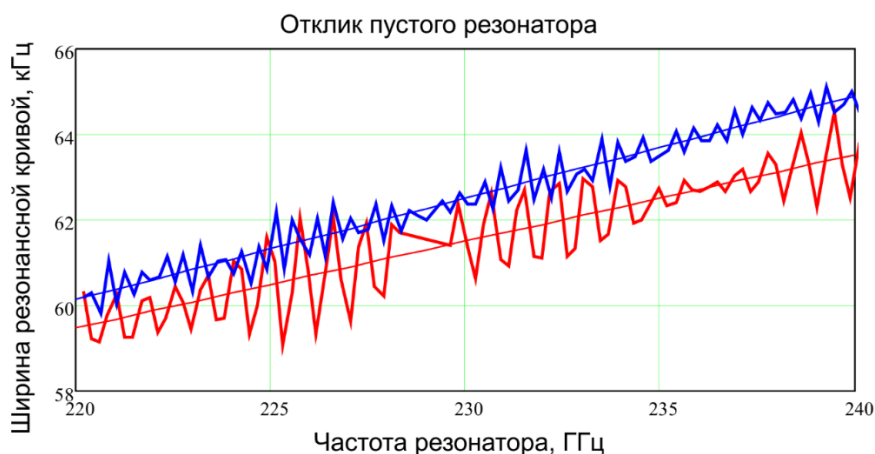


Рисунок 3.20 – Собственная частотная характеристика пустого резонатора: красный (внизу) – до модернизации, синий (вверху) – после модернизации.

В рамках настоящей работы создано и внедрено несколько инженерно-технических решений, которые значительно расширили функционал спектрометра и улучшили его эксплуатационные характеристики. Такие изделия, как автоматизированная система управления

аттенюатором, механизм перемещения зеркала, система термометрии и теплопередачи расширили функционал комплекса в соответствии с назначением комплекса. Система термостатирования квазиоптического тракта и малошумящий усилитель постоянного тока улучшили собственные шумовые характеристики комплекса.

В результате удалось уменьшить величину паразитной интерференции на 46% и уменьшить время записи спектра с нескольких часов до нескольких минут, что в дальнейшем позволило провести такие измерения, как исследования спектров димеров воды [70], исследовать металлы и металлизированные покрытия [72, 131]. Таким образом, проведён законченный цикл расчётов, модернизации, и тестовых испытаний оборудования. Ожидаемые параметры и поставленные задачи выполнены. В настоящее время ведутся работы по созданию новой вакуумной камеры резонаторного спектрометра, в том числе с учётом опыта и расчётов, приведённых в настоящем разделе.

Основные результаты из 3 главы опубликованы в 3-х статьях в рецензируемых изданиях [72, 131, 132] и 4-х тезисах конференций [133–136].

## ГЛАВА 4 Экспериментальные исследования потерь излучения СубТГц диапазона

Потери излучения волн субТГц диапазона – это проблема, с которой сталкиваются исследователи и разработчики аппаратуры этого диапазона. В настоящей работе речь идёт о современных радиотелескопах, которые уже давно освоили этот диапазон, и станциях связи, рабочие частоты которых пока лишь подбираются к субТГц диапазону. В обоих случаях характер проблемы и пути её решения универсальны. Потери возникают на пути следования излучения из космоса: ослабляются в атмосфере и при отражении от зеркал оптической системы телескопа. При этом, помимо потерь полезного сигнала, к нему добавляются тепловые шумы поглощающих сред – атмосферы и зеркал. Количественные оценки потерь, а также способы борьбы с ними, в каждом случае разные. В настоящей главе собраны результаты полевых и лабораторных исследований потерь излучения для целей радиоастрономии и космической телекоммуникации с СубТГц диапазоне, полученные на модернизированной аппаратуре. Аппаратура и методы измерений потерь описаны в предыдущих главах.

### 4.1 Экспериментальное определение соотношения оптической толщины мм диапазона и количества осаждаемой воды (PWV)

Измерения оптической толщины производятся радиометрическими приёмниками, работающими по методу атмосферных разрезов в модуляционном режиме. С одной стороны, метод разрезов позволяет избавиться от проблем калибровки по яркостной температуре, присущих методу абсолютной калибровки. Модуляционный режим работы приёмников позволяет избавиться от неконтролируемых изменений (дрейфа) параметров аппаратуры, таких, как коэффициент усиления или температурные изменения характеристик деталей приёмника. С другой стороны, никакой внешней или внутренней калибровки по полосе приёма и форме АЧХ приёмников не производится. Этот факт вызывает вопрос калибровки радиометров по частоте, другими словами, чему соответствует измеренная оптическая толщина в частотном диапазоне? Приёмник 3-мм диапазона работает по схеме прямого усиления, а 2 – мм – по супергетеродинной схеме. Очевидно, их АЧХ не может быть прямоугольной, а ограничение полосы приёма паспортными данными является чисто условным (84-99 ГГц и 132-148 ГГц). Это, в частности, проявилось на приёмнике 3мм диапазона, установленном на обсерватории «Суффа»: его полоса приёма оказалась ограничена со стороны нижних частот только сечением волновода. Техническое решение этого вопроса приведено в Главе 2, однако и для второго экземпляра МИАП-2 вопрос формы АЧХ остаётся открытым.

Особую сложность в этом представляет отсутствие каких-либо опорных данных: в природе не существует «эталонной атмосферы». Калибровка по яркостной температуре чёрного



тела при различных температурах тоже далека от идеальной, поскольку спектр атмосферы, в отличие от спектра излучения чёрного тела, имеет существенные неоднородности в виде резонансных линий поглощения. Идея калибровки сводится к следующему тезису: если у нас нет «эталонной атмосферы», то мы можем провести одновременные измерения атмосферы калибруемым прибором (МИАП-2) и калиброванным прибором. Здесь и в дальнейшем термин «калибровка» употребляется в научной интерпретации, что подразумевает достоверность получаемых данных на основе выбора правильных методов и подходов, упуская вопросы государственной аккредитации оборудования.

Поглощение электромагнитных волн мм и субмм диапазонов в атмосфере определяется, в основном, содержанием кислорода, паров воды и облачностью. Применительно к окнам прозрачности мм диапазона (с длиной волны около 3, 2, 1.3 и 0.8мм), величина поглощения зависит от содержания паров воды, кислорода и водозапаса облаков [94].

$$\tau_{tot}(\lambda, h, W, Q) = \alpha(\lambda) \cdot \exp(-h/h_0) + \beta(\lambda) \cdot W + \gamma(\lambda) \cdot Q. \quad (4.1),$$

где

$\tau_{tot}$	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/м <sup>2</sup> ),
$\alpha$	кислородная часть поглощения на уровне моря (Неп),
$\beta$	удельное поглощение в парах воды (Неп/мм),
$\gamma$	удельное поглощение в облачности (Неп·м <sup>2</sup> /кг).

Это соотношение хорошо известно и приводилось в наших статьях и в других источниках. Однако, применительно к радиометру МИАП-2, остаётся открытым вопрос значения коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ , их зависимость от сезона и погодных условий. Одним из первых обобщил экспериментальные данные Ulich [5] в 1980 году. В ходе исследований астроклимата в 2014 году мы произвели численный расчёт на основе модели MPM Liebe (см. [7] и ссылки) с использованием реального профиля атмосферы (температура, давление, влажность), результат которого не совпал с предыдущим источником [94].

В данном исследовании мы попытались выявить значения этих коэффициентов в натурном эксперименте, расположив два прибора в одном месте и сравнивая получаемые с них данные. Первый эксперимент проводился на обсерватории Бадары сети Квазар-КВО в Тункинской долине. Два штатных инструмента этой обсерватории - РВП и GNSS [46] имеют

высокую точность в определении PWV, и их данные являются опорными по PWV. Одновременно с РВП и GNSS радиометр «МИАП-2» измерял оптическую толщину в 2мм и 3мм окнах прозрачности. Все данные синхронизованы по времени и интервалу измерений, мы без труда можем построить облако значений и определить параметры линии регрессии, при условии, что  $Q=0$  (т.е. выбирая для обработки только безоблачные промежутки времени.). На Рисунок 4.1 представлены выборки данных по несколько дней с безоблачной погодой в разные месяцы (январь, май, июнь, сентябрь и ноябрь). Они отражают зависимость оптической толщины ( $\tau$ ) по прибору МИАП-2 в 3мм и 2мм окнах прозрачности от PWV по GNSS-приёмнику.

Второй аналогичный эксперимент был проведён возле г. Баренцбург на архипелаге Шпицберген [111]. В нём значения PWV предоставлены Томским Институтом оптики атмосферы им. В.Е. Зуева и получены при помощи спектрофотометра [42]. Фотометр, работающий по методу Бугера, наряду с аэрозольной оптической толщью, измеряет интегральную атмосферную влажность по линии поглощения воды в диапазоне 0.94 мкм. Ввиду особенности метода измерений, они проводятся нерегулярно, только в ясную погоду и только в летний период, т.е. в полярный день. С одной стороны, столь малая выборка не позволяет построить отдельную линию регрессии – слишком мало данных. Но, с другой стороны, выборка данных оказывается хорошо привязана к ясной погоде, поскольку метод Бугера это подразумевает сам собой.

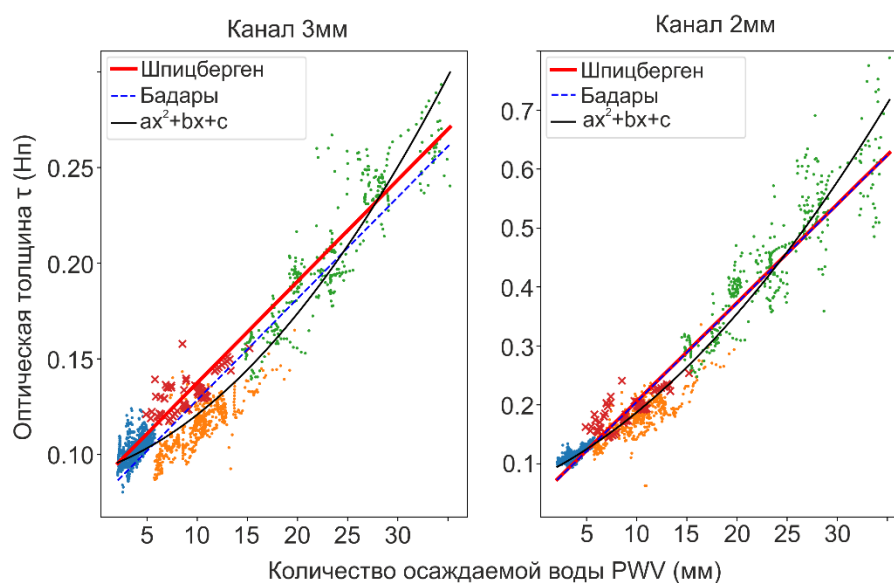


Рисунок 4.1 – Экспериментальная взаимосвязь оптической толщины мм диапазона и количества осаждаемой воды (PWV).

На Рисунок 4.1 результаты длительных наблюдений в Бадарах представлены точками (синие – зима, оранжевые – межсезонье, зелёные - лето), а результаты наблюдений на Шпицбергене – крестами. Важно отметить, что результаты двух экспериментов совпали с точностью до ошибки измерений оптической толщины (около 10%), и оказались инвариантны по

отношению к методу измерений PWV. Линия регрессии отражает связь между оптической толщиной и PWV согласно формуле (4.2).

$$\tau(a, b, PWV) = a \cdot PWV + b, \quad (4.2)$$

Параметры линии регрессии практически не изменились с добавлением новых данных со Шпицбергена относительно эксперимента в Бадарах. В уравнении (4.2) коэффициент  $b$  соответствует «сухой» (или «кислородной») части поглощения, в литературе чаще обозначаемый « $\alpha$ » (Неп) [5]. Он зависит от высоты места и выражается следующим образом:

$$b(h) = \alpha \cdot e^{-h/h_0}, \quad (4.3),$$

где  $b$  – интегральное поглощение в кислороде с места наблюдения (Неп),

$\alpha$  – поглощение в кислороде на уровне моря (Неп),

$h$  – высота места наблюдения (км),

$h_0$  – удельная высота поглощения в кислороде = 5.3 км.

Коэффициент « $\alpha$ » в формуле (4.1) называют удельным поглощением в парах воды и чаще обозначают, как « $\beta$ » (Неп/мм). Таким образом, мы можем выразить общее поглощение в мм диапазоне в соответствии с формулой (4.1), а значения коэффициентов представлены в Таблица 4.1.

Таблица 4.1 – Коэффициенты удельного поглощения в окнах прозрачности 3мм и 2мм.

Параметр	канал 2 мм	канал 3 мм
Удельное поглощение в кислороде на уровне моря $\alpha$ , Нп	0.042±0.003 (8%)	0.086±0.001 (1.3%)
Удельное поглощение в парах воды $\beta$ , Нп/мм	0.0167±0.0017 (9.9%)	0.0053±0.00067 (12.7%)

Очевидно, полученные коэффициенты носят уникальный характер, то есть применимы к конкретному радиометру, однако по данной методике могут быть найдены коэффициенты для любого измерителя прозрачности мм диапазона. В зависимости от полосы приёма радиометра значения коэффициентов будет варьироваться. Нами было показано, что они будут также зависеть от локальных особенностей климата и от высоты местности [137].

#### 4.2 Оценка эквивалентных частот радиометров по модели MPM Liebe

Принимая шумовой сигнал теплового излучения атмосферы в некотором диапазоне частот, радиометр делает свёртку формы спектра излучения атмосферы и собственной АЧХ. Собственная АЧХ для данных радиометров никогда точно не измерялась, а форма спектра атмосферы зависит от погодных условий. Оба этих фактора нестабильны во времени и не имеют измеренных численных параметров, поэтому в совокупности эти факторы сводят на нет усилия по поиску эквивалентной частоты аналитическим путём. Более того, вклад молекулярных линий кислорода и паров воды создают существенные неровности спектра излучения атмосферы, в

отличие от чернотельного излучения, по которому обычно калибруют радиометры в лабораториях. Единственным вариантом остаётся поиск статистических зависимостей оптической толщины от количества осаждаемой воды на достаточно большой выборке данных. Определить термин «эквивалентной частоты» можно, например, в терминах яркостной температуры: это та частота, на которой будет наблюдаться такая же яркостная температура неба, что наблюдается в широком диапазоне рабочих частот радиометра.

Для вычисления эквивалентной частоты, воспользуемся известной моделью поглощения волн в атмосфере МРМ Liebe. Первичные данные для этой модели частично получены в результате экспериментов на резонаторном спектрометре, описанных в главе 3. Модель МРМ Liebe позволяет численно рассчитать поглощение на любой частоте (в пределах работы модели – от 10ГГц до 1000ГГц) при стационарных условиях. При этом рассчитывается отдельно кислородная и водяная часть поглощения:

$$Abs_{tot}(f, P, H, T) = Abs_{O_2}(f, P, T) + Abs_{H_2O}(f, P, H, T) \quad (4.4),$$

где  $Abs_{tot}$  – общее погонное поглощение (Неп/км)

$Abs_{O_2}$  – погонное поглощение в кислороде (Неп/км)

$Abs_{H_2O}$  – погонное поглощение в парах воды (Неп/км)

$f$  – частота (ГГц)

$P$  – давление (мБар)

$H$  – абсолютная влажность ( $г/м^3$ )

$T$  – температура (К)

В модель загружаются реальные данные о профилях давления  $P(h)$ , температуры  $T(h)$  и влажности  $H(h)$  атмосферы, полученные метеозондированием [138]. В результате интегрирования уравнения (4.4) по высоте получается интегральное поглощение при реальных условиях (Неп).

$$\tau_{O_2}(f) = \int_{h_0}^{h_{max}} Abs_{O_2}(f, P(h), T(h)) dh \quad (4.5),$$

$$\tau_{H_2O}(f) = \int_{h_0}^{h_{max}} Abs_{H_2O}(f, P(h), H(h), T(h)) dh$$

где  $\tau(f)$  – интегральное поглощение (Неп)

$h_0$  и  $h_{max}$  – нижний и верхний пределы аэрозондирования для конкретного запуска метеозонда, км.

В качестве примера приведены высотные профили с Кировской метеостанции, взятые летом.

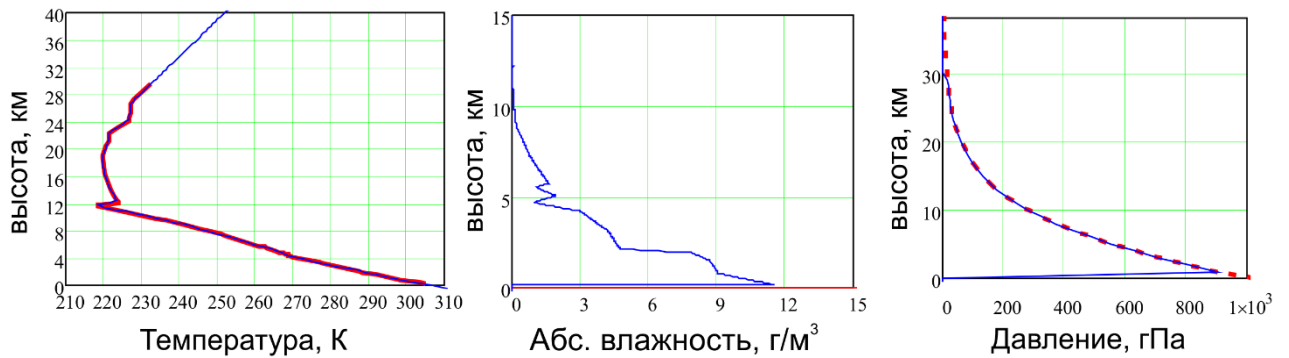


Рисунок 4.2 – Пример высотных профилей атмосферы.

Количество осаждаемой воды вычисляется путём интегрирования абсолютной влажности во всём диапазоне высот. Разделив интегральное поглощение на интегральную влажность, получается коэффициент удельного поглощения в парах воды – коэффициент  $\beta$  в уравнении (4.1). Кислородную часть поглощения можно привести к любой высоте точки наблюдения  $h$ , разделив на  $e^{-h/h_0}$  (см. формулу (4.3), в результате чего получится коэффициент  $\alpha$  в уравнении (4.1).

$$\alpha(f, h) = \frac{\tau_{O_2}(f)}{\exp\left(-\frac{h}{h_0}\right)} \quad (4.6)$$

$$\beta(f, h) = \frac{\tau_{H_2O}(f)}{\int H(h)dh}$$

Таким образом, мы имеем набор экспериментальных данных о коэффициентах  $\alpha$  и  $\beta$ , представленных в таблице 1, с одной стороны, и функции частотных зависимостей этих коэффициентов согласно модели MPM Liebe – с другой. Для получения эквивалентных частот, достаточно подобрать частоту  $f$  в уравнении (4.6) таким образом, чтобы расчётные и экспериментальные данные совпали. Рисунок 4.3 наглядно демонстрирует принцип поиска эквивалентной частоты. Тонкими линиями представлены коэффициенты удельного поглощения в зависимости от частоты для разных метеоусловий – от тропиков до полярных. Толстыми горизонтальными линиями отмечены значения этих коэффициентов, полученные из эксперимента.

Было рассмотрено 6 различных профилей атмосферы по данным метеозондирования на станциях вблизи Шпицбергена и обсерватории «Бадары»: по одному за зимний и летний сезоны, а также в межсезонье. Для большинства расчётов оценка эквивалентных частот оптической толщины составляет: 79.7 ГГц и 134 ГГц.

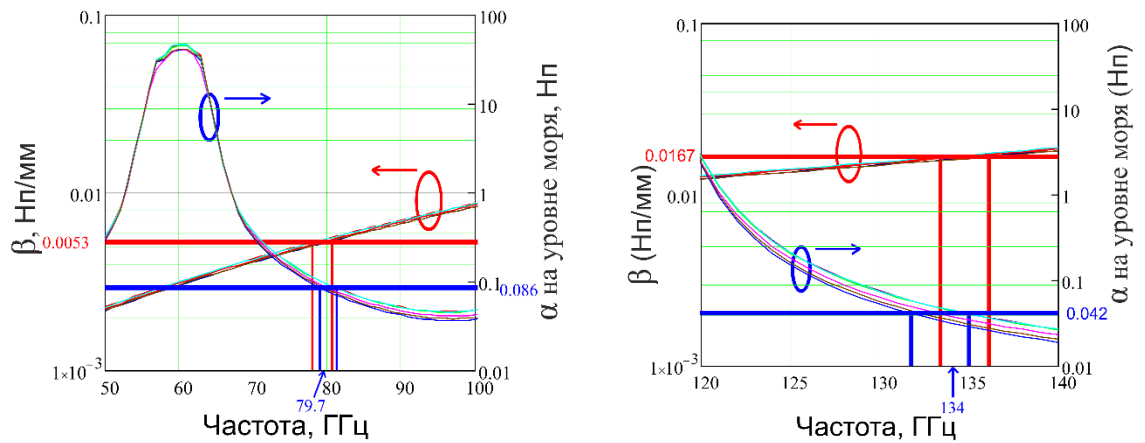


Рисунок 4.3 Оценка эквивалентных частот по совпадению коэффициентов удельного поглощения в диапазоне 3мм (слева) и 2мм (справа).

Очевидно, проведённая оценка эквивалентных частот не совпадает с паспортными (средними) значениями рабочих частот радиометра. Для приёмника 3 мм диапазона, работающего по схеме прямого усиления, это можно объяснить слабой избирательностью высокочастотного входного тракта, его избыточно широкой полосой, захватывающей часть интенсивной полосы кислорода на 60 ГГц. Установка волноводного фильтра могла бы решить эту проблему, но приводит к ухудшению чувствительности радиометрического блока. Приёмник 2 мм диапазона собран по супергетеродинной схеме со смесителем и вентилем на входе, и сдвиг рабочих частот можно объяснить приёмом на удвоенной частоте гетеродина, поскольку никаких специальных схем подавления сигнала на удвоенной частоте не предусмотрено. Эти технические факторы снижают качество получаемых данных, но, при должной оценке их влияния, не снижают эффективности измерений.

### 4.3 Исследования астроклимата в экспедиционных условиях

Уже более 9-ти лет группа с участием автора изучает астроклимат в различных точках на территории стран СНГ [94–98, 108, 110, 111, 117–119, 139, 140] с целью поиска наилучших мест для строительства радиоастрономического инструмента мм диапазона, как с точки зрения астроклимата, так и с точки зрения доступности инфраструктуры. Весьма вероятно, что увидеть наилучший астроклимат на поверхности Земли можно на вершине горы Эверест, но построить там обсерваторию – задача не из лёгких. В своих исследованиях мы пытаемся найти компромисс между экстремальным труднодоступным высокогорьем и поглощением волн в атмосфере, которое мешает наблюдениям. Одним из определяющих факторов в этом вопросе является климатическая зона и особенности локального климата, обусловленные ландшафтом.

### 4.3.1 Классификация измерений астроклимата по длительности

Обширная география мест, в которых проводились исследования астроклимата, диктуется разнообразием локальных и глобальных климатических условий этих мест. Наиболее благоприятные условия для астроклимата оказываются большой редкостью в мире и это, как правило, высокогорье с экстремально низкими температурами и разреженным воздухом. Зачастую астрономические инструменты, расположенные в высокогорье, работают в полностью автоматическом режиме, поскольку длительное пребывание человека в условиях столь низких температур и сильной разреженности воздуха затруднительно. Это отчасти служит поводом к поиску астрономических площадок пониже: до 4000м над уровнем моря, где человек ещё вполне может находиться длительное время. В этом случае определяющим фактором становится влажность воздуха, которая, в свою очередь, зависит от температурного режима и горно-долинных особенностей движения воздуха. Именно по этой причине первый эксперимент по измерению астроклимата прошёл на г.Мус-Хая в Якутии, где, при сравнительно небольшой высоте, наблюдаются крайне низкие температуры: до  $-70^{\circ}\text{C}$ .

Измерения астроклимата можно условно разделить на кратковременные и долговременные. Кратковременные проводятся для оценки поглощения в тех местах, где по объективным причинам невозможно установить оборудование на продолжительное время. Эти измерения, в зависимости от конкретного случая, можно привязать к различным метеопараметрам и (или) спутниковым данным. Привязка позволяет экстраполировать кратковременные наблюдения на длительный период и сделать вывод о средних ожидаемых значениях поглощения в точке измерений. Зачастую, локальные особенности ландшафта играют решающую роль в общем поглощении, поэтому привязка к данным метеостанций весьма условна. Разумеется, этот прогноз имеет довольно большую погрешность и не может быть использован как достоверное свидетельство состояния атмосферы. Поэтому, кратковременные измерения делаются скорее с целью оценки целесообразности и планирования долговременных измерений.

Долговременные же измерения направлены на выявление статистических сезонных тенденций изменения прозрачности атмосферы. Имея статистику хотя бы за один сезон (год), мы можем планировать радиоастрономические наблюдения, выдавать рекомендации по проектированию телескопов и их приёмников с учётом вклада шумов атмосферы, и, разумеется, сравнивать и выбирать площадки между собой. Долговременные наблюдения в течение как минимум одного года позволяют достоверно оценить статистику поглощения.

### 4.3.2 Кратковременные исследования астроклимата в различных условиях

В этом разделе приводятся примеры эксплуатации радиометрического комплекса в различных условиях. Эти исследования собраны здесь, чтобы показать хронологию модернизации оборудования и то, как она помогала в выполнении задачи исследования астроклимата. Различные площадки, представленные в этом разделе, характеризуются разными условиями наблюдений, что особенно важно для полевых испытаний разработанной аппаратуры. Внизу раздела приведены сводные результаты измерений астроклимата.

#### **Первые измерения астроклимата на горе Мус-Хая, Восточная Якутия.**

Впервые исследования астроклимата были проведены нашей группой в 2012 году, в ходе экспедиции в Якутию к горе Мус-Хая. Были произведены наблюдения в нескольких точках: г.Якутск, п.Ючюгей и у подножья горы Мус Хая. Последняя точка была целью экспедиции: предполагалось, что на Сибирском плоскогорье должна быть хорошая прозрачность атмосферы. В этой экспедиции аппаратура работала после высокой ударной нагрузки: после непрерывной транспортировки вездеходом в течение 36 часов и 5-ти дней на лошадях.

#### **Измерения в условиях средних широт на Пушинской радиоастрономической обсерватории.**

Вторая экспедиция состоялась в марте 2013 в Пушинскую радиоастрономическую обсерваторию с целью оценки перспектив использования РТ-22 в миллиметровом диапазоне. Основные измерения проходили ночью с 4:15 до 8:00 12.03. Радиометр был установлен на площадке перед входом в телескоп РТ-22, на небольшом постаменте. По общей оценке, астроклимат над Пушинской обсерваторией можно назвать неудовлетворительным для наблюдений в коротковолновой части ММ диапазона. Результаты измерений изложены в научном отчёте для НГТУ им. Р.Е. Алексеева [141].

#### **Исследования астроклимата на БТА в САО РАН (2014-2015)**

Первые относительно длительные измерения проходили в 2014-2015 годах с башни БТА на обсерватории САО РАН. Начались они с эксперимента по исследованию влияния высоты на величину атмосферного поглощения и измерение зависимости количества осаждаемой воды от высоты. В некоторых экспериментах это необходимо для экстраполяции измерений с одной высоты на другую. 17 декабря 2014 года было проведено два цикла измерений – на горе Пастухова (2733м) и в районе телескопа Цейсс 1000. Результаты измерения атмосферного поглощения и количества осаждаемой воды представлены ниже (Рисунок 4.4). Из графиков видно, что при одинаковых погодных условиях, с увеличением высоты количество осаждаемой воды в атмосфере существенно уменьшается. Примерно подсчитано, что в нижней тропосфере при безоблачной погоде градиент составляет около 1.7мм осаждаемой воды на километр высоты. Более точные измерения требуют дополнительных экспериментов.



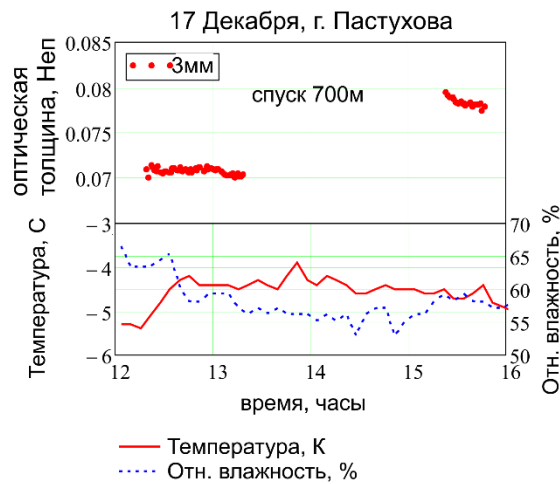


Рисунок 4.4 – Графики количества осажденной воды (мм) и атмосферного поглощения (Nep) полученные на горе Пастухова (2733м) и Цейсс1000 (2000м).

Затем прибор вёл наблюдения астроклимата на башне БТА в течение нескольких месяцев – результаты этих исследований приведены в этой главе ниже (см. раздел 4.3.3 ). В этом цикле впервые была опробована система удалённого доступа, которая в последствии значительно расширила возможности этого прибора.

#### **Измерения в условиях разреженного воздуха и большой высоты на горе Эльбрус.**

Приэльбрусье – это одно из перспективных мест для астрономии и есть работы, посвящённые исследованию астроклимата Приэльбрусья, например в оптическом диапазоне [142]. В продолжении тематики исследования астроклимата на Северном Кавказе была организована экспедиция на г.Эльбрус. В целом для оценки астроклимата в Приэльбрусье были проведены две экспедиции: 3-4 и 17-19 января 2015 года. Были проведены два цикла измерений на высотах 3780 (Гарабаши, приют «Бочки») и 4200 (Приют 11). Это были самые высокие точки, в которых работал прибор. Стоит отметить высокую надёжность прибора – он работал в штатном режиме в жёстких условиях высокогорной экспедиции. Однако, работа в условиях экстремального высокогорья (более 3.5км над уровнем моря) показали некоторые технические проблемы. Перебои в работе бензогенератора на большой высоте, обусловленные низким содержанием кислорода, принудили к поиску других источников питания. На площадке Гарабаши была задействована местная электросеть, а на Приют 11 пришлось нести блок бесперебойного питания с аккумуляторами. В 2021 году предпринята новая попытка измерений на самой высокой вершине Европы с учётом опыта предыдущих экспедиций.

#### **Испытания удалённого режима измерений на Кавказской горной обсерватории.**

Во всех предыдущих наблюдениях прибор был подключен к системе удалённого доступа и сбор данных в основном осуществлялся через неё, но прибор находился под постоянным наблюдением сотрудников САО и мелкие поломки устранялись сразу. Фактически, в 2014-2015

годах происходила отработка системы удалённого доступа и автономной работы оборудования на площадке новой обсерватории МГУ возле Кисловодска (КГО). Оборудование было установлено возле окна корпуса обсерватории и подключено к системе удалённого доступа. В этих измерениях не было возможности организовать постоянное сопровождение оборудования, и оно фактически впервые было оставлено без присмотра на долгое время. Была получена статистика за январь и февраль 2016. Характерные значения, полученные на этой обсерватории, практически совпали с аналогичными на БТА. Таким образом, обсерватория МГУ обладает статистически аналогичными показателями астроклимата, как и в САО, характерными для горного Северного Кавказа.

### **Исследования астроклимата в условиях высокой температуры окружающей среды на Южном побережье Крымского полуострова.**

Крым располагается в субтропическом климатическом поясе, но его локальный климат весьма разнообразен и включает в себя 5 климатических зон: степная континентальная, степная приморская, предгорная лесостепная, горная лесная и субсредиземноморская. Одной из особенностей Южного побережья Крыма (ЮБК), большая часть которого приходится на субсредиземноморскую климатическую зону, является большое количество солнечных дней в году, то есть низкий процент облачности. Однако, это не означает отсутствие влажности в воздухе, а лишь свидетельствует о том, что температура воздуха выше точки росы и не наступает конденсация паров воды в облака. Таким образом, задача экспедиции состояла в отработке аппаратуры и методов в условиях субсредиземноморского климата. Исследования прозрачности атмосферы в миллиметровом диапазоне длин волн в различных точках Южного побережья Крыма были проведены летом 2017 года. Помимо получения реальных значений прозрачности атмосферы на различных высотах, были выявлены локальные особенности климата, которые могли бы обеспечить лучшую прозрачность для этой климатической зоны. Аналогично исследованиям на горе Пастухова, в Крыму была проведена сравнительная оценка интегрального поглощения в нескольких точках ЮБК на разной высоте: РТ-22 в п. Кацивелли (10м над ур. моря), пос. Голубой залив (380м), г. Ай-Петри (1140м) и станция НИРФИ на Кара-Даге (около 110м). Ниже приведены результаты эксперимента (Рисунок 4.5). Результаты этих исследований были опубликованы в [108, 110].

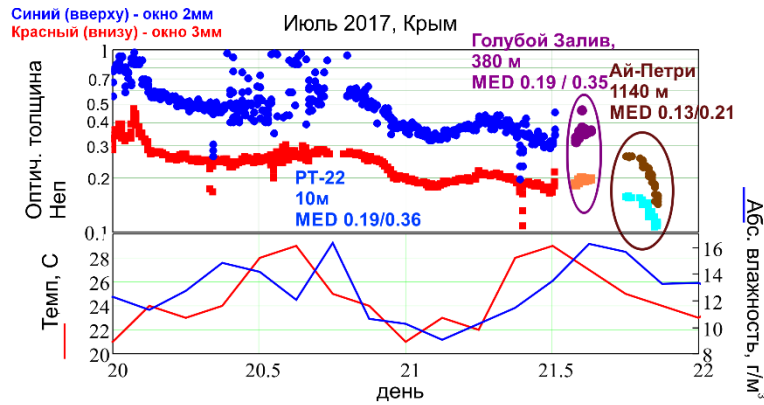


Рисунок 4.5 – Сравнительная оценка прозрачности атмосферы в различных точках ЮБК.

### Исследования астроклимата в условиях резко-континентального климата на Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ и обсерватории «Бадары».

Летом 2016 года была организована экспедиция для измерения астроклимата в двух точках к западу от озера Байкал в республике Бурятия:

а) Саянская Солнечная обсерватория Института солнечно-земной физики РАН, расположенная на высоте 2100м на границе с Монголией близ посёлка Монды. (51°37'18.04"N; 100°55'3.10"E). (ССО далее по тексту)

б) Обсерватория Бадары Института прикладной астрономии РАН, расположенная на высоте 813м в Тункинской долине в 100 км западнее Байкала. (51°46'10.75"N; 102°14'6.13"E). ("Бадары" далее по тексту)

Исследования проходили в два этапа: сначала прибор МИАП-2 был установлен на территории ССО и проработал там примерно 2 суток в условиях безоблачной погоды. При этом велась запись метеопараметров по метеостанции обсерватории. Затем, за минимально возможное время, прибор был перевезён на обсерваторию Бадары и установлен на крыше одного из корпусов. На графике представлены результаты сравнения площадок по интегральной влажности: по PWV с радиометра МИАП-2 на площадке ССО (с 1 по 3 июня) и в обсерватории Бадары (с 4 июня) - окружности; Данные РВП и GNSS – серые и чёрные точки; Данные спутникового зондирования по спутнику AIRS – квадраты; Абсолютная приземная влажность воздуха в  $\text{г/м}^3$  – коричневые точки. Под графиком представлены медианные значения по каждому источнику данных.

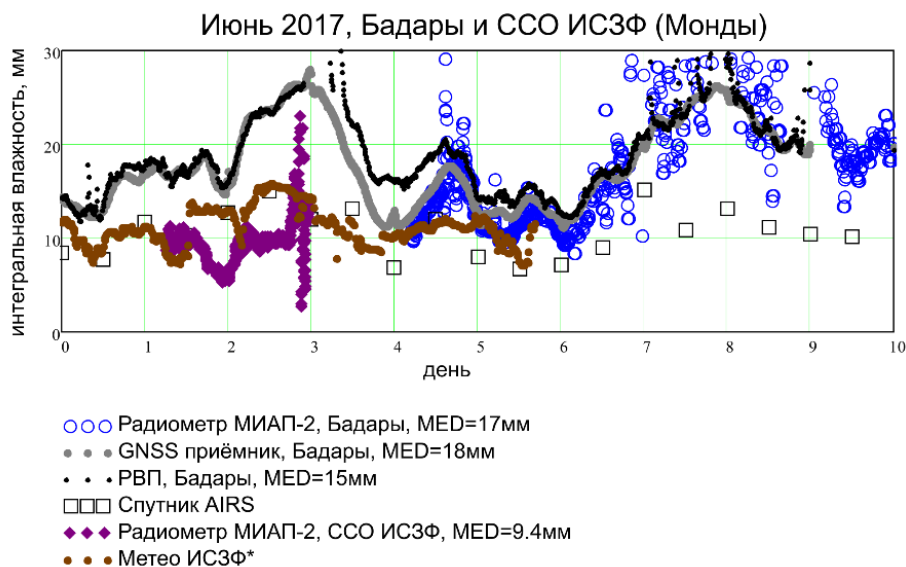


Рисунок 4.6 – Сравнение площадок ИСЗФ (2100м) и Бадары (813м).

Прежде всего важно отметить, что данные радиометра МИАП-2 в обсерватории Бадары практически совпадают с данными РВП и GNSS (с точностью до облачности). В то же время данные МИАП-2 на ССО ИСЗФ очевидно ниже данных РВП и GNSS, в первую очередь за счёт разницы по высоте. Спутниковые данные AIRS близки к результатам ССО по МИАП-2 и стабильно ниже данных по Бадарам. При этом стоит принять во внимание, что пространственное разрешение спутника таково, что Бадары и ССО находятся в одном квадрате (пикселе) спутника. В результате можно утверждать, что астроклиматические условия ССО ближе к некой усреднённой оценке местности по спутниковым данным, а в Бадарах условия стабильно хуже. В первую очередь это объясняется разницей по высоте, но и немаловажную роль играет горно-долинная циркуляция воздушных масс, которая приводит к скоплению влажного воздуха в Тункинской долине. С этой точки зрения расположение обсерватории Бадары менее выигрышно, чем ССО. Ниже в таблице собраны результаты кратковременных измерений, сделанных в ходе экспедиций за все годы эксплуатации МИАП-2. С точки зрения эксплуатации аппаратуры, площадки различаются условиями наблюдений, уровнем измеренного поглощения, а также различными условиями транспортировки оборудования.

Таблица 4.2 – Результаты кратковременных измерений астроклимата.

Площадка	Координаты	Высота над ур. моря, м	Результаты измерений $\tau_{3mm}/\tau_{2mm}$ , Неп	Оценка интегральной влажности, мм	Ориентировочная длительность измерений
г. Мус-Хая, Якутия	62°37'8.5" N, 140°50'9.3" E	1980	0.08 / -	4.1	2 часа
г. Пущино, Подмосковьё	54° 49' 14.1" N 37° 37' 41.8" E	200	0.15 / -	12	34 часа
Приэльбрусье	43° 18' 56.4" N 42° 27' 41.9" E	3870 и 4200	0.06 / - и 0.064 / -	4.4 и 5.2	2 часа
Кавказская горная обсерватория	43° 44' 16.6" N 42° 40' 14.4" E	2072	0.1 / 0.14	8.2	3 месяца
Южное побережье Крима: Кацивелли; Ай-Петри; Кара-Даг	44° 55' 36.37" N 35° 11' 30.61" E	10; 1140; 100	0.25 / 0.49 0.13 / 0.21 0.25 / 0.51	18.6 11.6 20	2 суток 2 часа 2 месяца
Саянская солнечная обсерватория ИСЗФ	51° 37' 17.85" N 100° 54' 55.70" E	2100	0.12 / 0.19	22	2 суток

#### 4.3.3 Долговременные исследования статистики астроклимата в режиме удалённого доступа

Все измерения, которые велись до 2014 года, проходили в ручном режиме, т.е. запуск наблюдений, сбор данных и пр. происходило с помощью оператора на месте наблюдений. В 2014 году была организована система удалённого доступа (см. раздел 2.2.2) и он проходил тестовые испытания на башне БТА под наблюдением сотрудников САО. Основной задачей была отработка удалённых наблюдений и по возможности устранить поломки. На этих же наблюдениях впервые были отработаны математические алгоритмы, позволяющие рассчитать статистические параметры.

Наблюдения поглощения велись с января по декабрь 2014 года, суммарно - около 8ми месяцев сплошной записи. Интервал между измерениями составлял около 6ти минут, что примерно соответствует интервалам записи автоматической метеостанции на БТА. Пробелы в наблюдениях в основном связаны с техническими неполадками, о которых упоминалось выше. Следует отметить, что статистически ключевые сезоны были захвачены в полной мере – это минимальные значения поглощения зимой, максимальные – в мае и июне, и переходные – сентябрь, октябрь.

Длительные наблюдения нужны для статистической оценки астроклимата, а для наглядного представления результатов измерений была разработана схема статистической

обработки данных. Статистическая обработка результатов производится в программе MathCAD 14 и состоит из нескольких этапов. В первую очередь, вычисляется гистограмма значений поглощения для каждого месяца, независимо от суммарного количества наблюдений в этот месяц. (К примеру, в мае наблюдалось около 10 дней, а в октябре – почти весь месяц). Ось абсцисс гистограммы разбита на 52 интервала поглощения – 1й от 0 до 0.04, далее 50 интервалов с шагом 0.005 Неп, и 52й – собирает весь «мусор» от 0.3 до 10 Непер. При этом наиболее интересные значения попадают на интервал от 0.05 до 0.2 Неп, поэтому все графики так и отображаются (Рисунок 4.7).

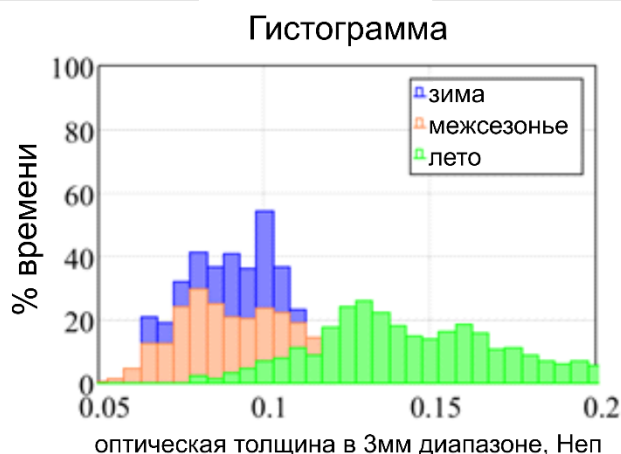


Рисунок 4.7 – Пример отображения статистики прозрачности атмосферы гистограммой поглощения по сезонам. САО за 2014 г.

На следующем этапе статистической обработки из гистограмм вычисляются кумулятивные распределения поглощения по следующей формуле (4.7):

$$C(k) = \sum_{i=0}^k h(i) \quad (4.7),$$

где  $C(k)$  – кумулятивное распределение поглощения,

$k$  – номер интервала поглощения, по которому строилась гистограмма,

$h(i)$  – гистограмма в зависимости от номера интервала (по сути, число точек, попавшее в  $i$ -й интервал поглощения)

Затем, кумулятивное распределение нормируется на общее число точек в месяце, переходя, таким образом, к проценту ясного времени. При этом ось абсцисс строится в зависимости от номера массива интервалов, на которые была разбита гистограмма. Таким образом получается график кумулятивного распределения процента ясного времени в зависимости от поглощения (Неп) в течение месяца. Для наглядности, усредним кумулятивные распределения по сезонным месяцам аналогично гистограммам (Рисунок 4.8).

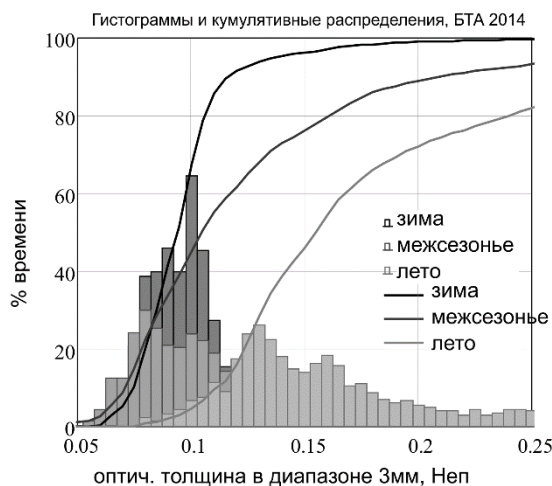


Рисунок 4.8 – Кумулятивное распределение поглощения по сезонам в CAO, БТА.

По сути, это основная характеристика для оценки пригодности данной площадки. По ней удобно сравнивать как сезоны между собой, так и с другими площадками по соответствующим сезонам.

Одним из способов проверки работоспособности аппаратуры и методов является привязка результатов измерений прозрачности к метеоданным, на которые эта прозрачность завязана, т.е. на интегральную влажность. Дополняя картину измерений данными метеозондирования NOMAD [138](4 точки в сутки) и спутниковой ИК-съёмки AIRS (2 точки в сутки), по взаимной корреляции хронологии данных измерений мы можем судить об отсутствии систематических ошибок в измерениях. На Рисунок 4.9 представлен пример полученной хронологической записи количества осаждаемой воды по всем доступным источникам. Важно отметить, что хорошая корреляция наблюдается лишь между данными, снятыми из конкретной точки наблюдений: PWV по МИАП-2 пропорционально абсолютной приземной влажности. Спутниковые данные и данные метеозондирования охватывают большие площади и промежутки времени, и, ввиду локальных особенностей климата, отличаются от измерений, взятых в конкретной точке. Это ещё раз подтверждает необходимость исследования астроклимата в конкретной точке, а не по общим данным.

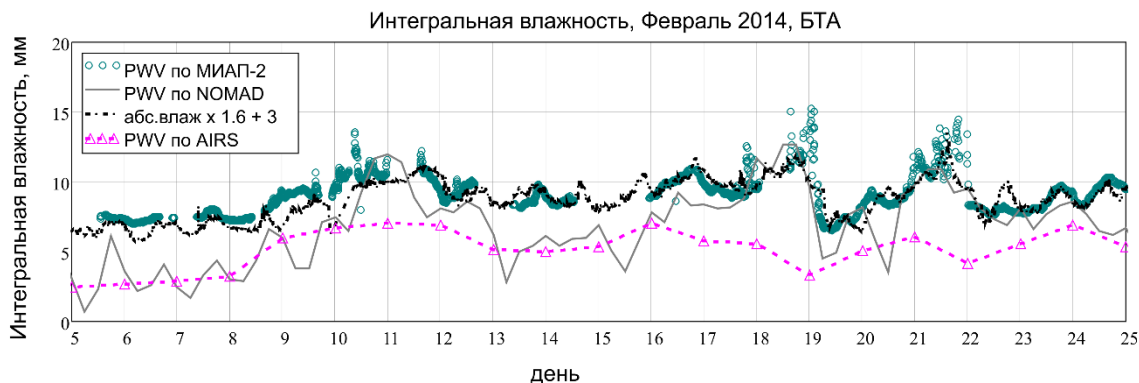


Рисунок 4.9 – Интегральная влажность в CAO за февраль 2014.

В смысле сравнения разных источников данных важно представить их систематические и статистические отличия. На Рисунок 4.10 представлено усреднённое за год наблюдений кумулятивное распределение PWV в сравнении: по спутнику AIRS и по радиометру МИАП-2, установленном на БТА. Небольшое различие этих графиков свидетельствует о систематическом отличии результатов наблюдений из конкретной точки и в усреднении по большой площади. По всей видимости, это различие обусловлено локальными особенностями климата. Это подтверждает актуальность экспедиционных исследований астроклимата и разработку аппаратуры под эти задачи.

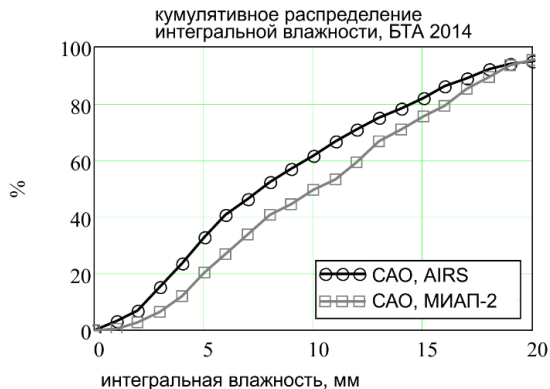


Рисунок 4.10 – Кумулятивное распределение количества осадённой воды по спутнику AIRS и по радиометру.

**Длительные измерения астроклимата в полностью автоматическом режиме на обсерватории «Бадары».**

Частично результаты измерений астроклимата в Бадарах представлены в разделе (4.1). В этот раздел вынесены результаты статистической оценки астроклимата на этой обсерватории. Этот длительный цикл является ещё одним свидетельством качественной разработки аппаратуры, поскольку она функционировала без сбоев в течение года автономно.

В результате долгосрочных наблюдений на МИАП-2 мы получили годовой цикл данных



о прозрачности атмосферы в 2мм и 3мм окнах прозрачности. Среди получаемых данных встречаются ровные и стабильные во времени значения, что характерно для безоблачной погоды в сухой зимний период.

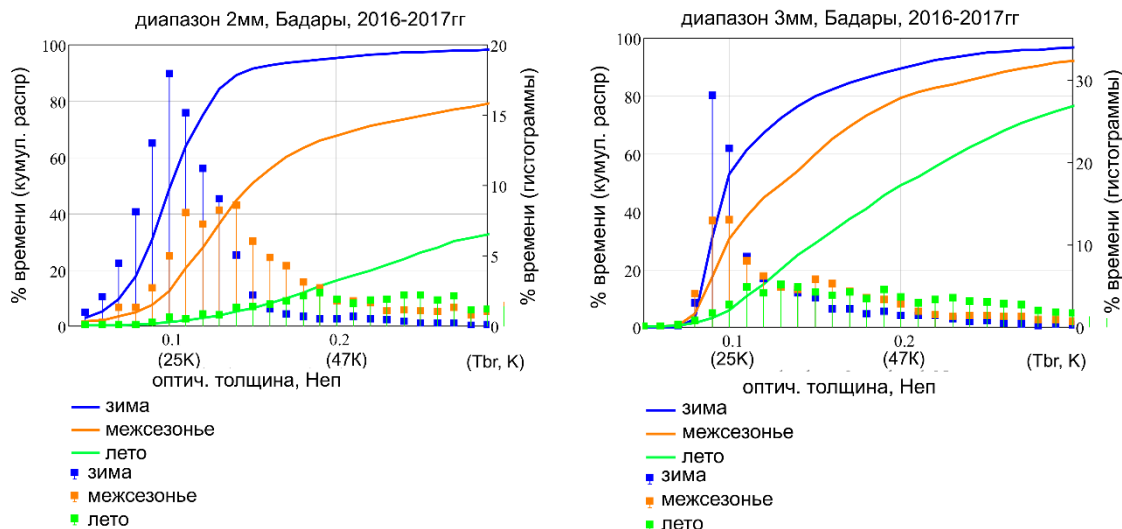


Рисунок 4.11 – Гистограммы и кумулятивные распределения оптической толщины в окнах прозрачности мм диапазона в Бадарах, усреднение по сезонам.

Первичный результат оценки астроклимата представлен в виде статистики по оптической толщине отдельно для каждого окна прозрачности. На Рисунок 4.11 представлены кумулятивные распределения оптической толщины по проценту времени из периода усреднения. Усреднение данных взято по принципу схожих метеоусловий: Зимние месяцы (с ноября по февраль), летние месяцы (с мая по август) и межсезонье (март, апрель, октябрь и сентябрь). Следует помнить, что наличие облачности приводит к существенному разбросу результатов измерений как в большую сторону, так и в меньшую. В приведённой статистике собраны все результаты без обработки, но в целом можно сказать, что проведённая оценка астроклимата обсерватории Бадары соответствует действительности.

#### 4.3.4 Обобщение результатов исследований астроклимата на различных площадках

Обширный опыт исследований астроклимата на различных площадках позволяет объективно сравнить их между собой. На Рисунок 4.12 представлены среднемесячные (медиана) значения оптической толщины (логарифмический масштаб) в течение года для площадок, исследованных комплексами МИАП-2 в разные годы. Наиболее интересными являются данные, охватывающие продолжительные отрезки времени. На обсерватории Бадары велись исследования с июня 2016 по июнь 2017гг, на обсерватории «Суффа» - в 2015-2016 годах и измерения продолжают по настоящее время. [83] В течение 2014-2015 гг на обсерватории САО РАН в горах Северного Кавказа (высота 2100м) измерения проводились нерегулярно и только в

3мм диапазоне.

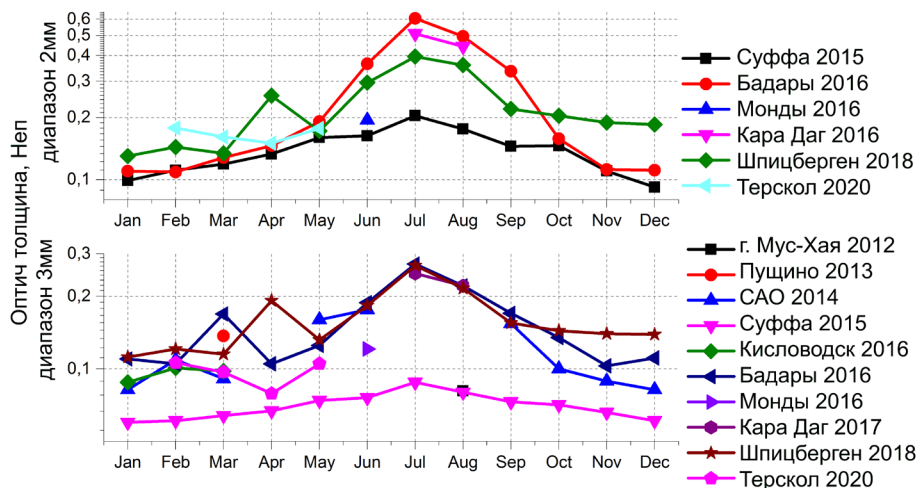


Рисунок 4.12 - Сравнение результатов долговременных наблюдений оптической толщины в 2мм и 3мм окнах прозрачности.

Сравнивая исследованные площадки очевидно преимущество плато "Суффа" по обоим диапазонам. Решающее значение в этой оценке имеет измеренное поглощение в 2мм канале, поскольку прямое сравнение каналов 3мм диапазона разных приёмников МИАП-2 затруднительно (см раздел 2.2.5). Кроме того, определяющими факторами является существующая инфраструктура и наличие окрестных вершин высотой более 3км для дополнения основного инструмента обсерватории малым зеркалом более коротковолнового диапазона. Измерения астроклимата демонстрируют значительное преимущество вершины Акташтау (3300м над уровнем моря), расположенной в 8км от плато Суффа, по сравнению с самим плато. Локальные особенности топографии местности способствуют скоплению влажности на плато, которая покрывает плато туманом или низкими облаками. Это было продемонстрировано в одной из наших экспедиций (Рисунок 4.13) и регулярно наблюдалось работниками обсерватории Суффа. В настоящее время весьма актуальными являются наблюдения не только в окнах прозрачности 2мм и 3мм, но и более коротковолновых, в частности на частоте сети РСДБ-телескопов ЕНТ - 225ГГц. Однако астроклимат плато оказывается весьма ограничен для коротковолновых окон прозрачности. В данном случае представляется разумным дополнить существующий проект обсерватории Суффа малым зеркалом, расположенным в более благоприятном астроклимате. Среди преимуществ такого решения можно отметить доступность коммерческих вариантов радиотелескопа малого диаметра с поверхностью зеркала, позволяющей работать на частотах до 400-800 ГГц. Модификация радиотелескопа РТ-70 сама по себе является предметом научно-технического поиска, поскольку в мире не существует таких больших зеркал с достаточной точностью поверхности. Использование адаптивной поверхности зеркала в перспективе способно решить эту задачу, но на данный момент эта технология

находится в стадии разработки. Установка малого коммерческого телескопа позволит уже в ближайшей перспективе обеспечить появление научных результатов этой обсерватории. Однако, это не противоречит необходимости разработки адаптивного зеркала диаметром 70 метров для модернизированного телескопа РТ-70.



Рисунок 4.13 – Низовая облачность на плато Суффа [83]

Кроме того, среди лидеров по астроклиматическим условиям можно выделить две сибирские площадки с высотой около 2км: Саянская солнечная обсерватория ИСЗФ (пос. Монды) и гора Муус-Хая в Якутии. В обоих случаях проведены кратковременные измерения, демонстрирующие довольно низкие значения оптической толщины для летнего периода.

Обсерватория САО РАН расположена на высоте 2100м, но окружена большим количеством горных массивов, и, кроме того, удалена от Чёрного моря всего на 90км. Этим обусловлены относительно высокие значения оптической толщины.

Столь обширный перечень площадок удалось исследовать во многом благодаря исправной работе аппаратуры и методов, разработанных в главе 2.

#### **4.4 Исследование спектра поглощения атмосферных газов на резонаторном спектрометре в СубТГц диапазоне**

В начале раздела 3 приведена краткая историческая справка, из которой следует, что развитие резонаторной спектроскопии шло по пути улучшения стабильности параметров исследуемого газа – давления, температуры и влажности. Первые эксперименты проходили в условиях окружающей среды, и для получения спектров при условиях, отличных от комнатных, резонатор разместили в КУНГе на крыше института. Это позволило получить данные о поглощении в атмосфере в условиях, например, зимы. Сейчас внутри герметичного корпуса резонаторного спектрометра воссоздаются условия, соответствующие атмосфере Земли практически на любой высоте над уровнем моря. Особое внимание уделяется стабильности этих

условий во времени, а также стабильности электродинамики самого спектрометра. Немаловажным вопросом так же является чувствительность спектрометра: на настоящий момент эта установка примерно на порядок превосходит чувствительность аналогичных инструментов в этом диапазоне, но эта чувствительность ещё не достигла теоретического предела. Таким образом, инженерные работы, описанные в разделе (ГЛАВА 3), были направлены на достижение этих ключевых показателей. В результате этих работ удалось достичь стабильности температуры газа в пределах  $-30 \dots +60^{\circ}\text{C}$  при контролируемом давлении в диапазоне 10-1000 Торр, что позволило провести важнейшие эксперименты по спектроскопии атмосферных газов. В целом, спектроскопия атмосферных газов – большая и сложная тема, относящаяся к диссертационной работе лишь косвенно. Однако, важно отметить, что успехи исследований в значительной степени основаны на результатах внедрения инженерных разработок автора диссертации. [132]

#### **4.4.1 Особенности конфигурации резонаторного спектрометра для измерений спектров атмосферных газов**

Вид установки в конфигурации атмосферных измерений несколько отличается от измерений потерь на отражение. Структурная схема установки приведена на рисунке ниже. Основное отличие состоит в системе охлаждения: головка криорефрижератора замкнутого цикла заменяется на систему жидкостного охлаждения, её рабочий диапазон соответствует условиям в атмосфере Земли на различной высоте: от  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ . Кроме того, меняется длина резонатора (под каждую задачу индивидуально) и добавляется возможность перемещения зеркала при помощи шагового двигателя. Термометрия работает на резистивных датчиках Pt100, в отличие от криогенных диодов. Добавляется система напуска газов: инертных для снятия опорной характеристики резонатора, кислород или вода для измерения соответствующих спектров. Средства измерения вакуума так же отличаются: при столь разных и агрессивных (вода, кислород) средах использование обычных термопарных или ионизационных датчиков недопустимо, используется баротрон.

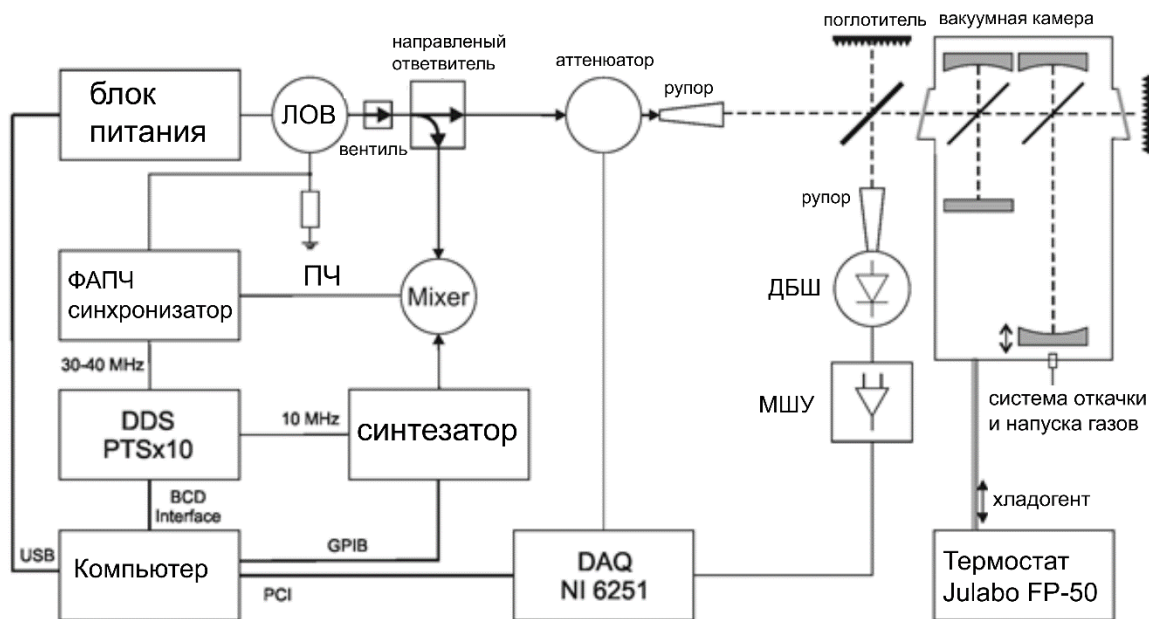


Рисунок 4.14 – Структурная схема установки для спектроскопии атмосферных газов [132].

#### 4.4.2 Результаты измерений спектров атмосферных газов

Поглощение волн мм диапазона в парах воды и кислороде во многом определяет тепловой баланс нашей планеты, и поэтому так важны исследования спектральных особенностей этого поглощения. Различают континуальное и резонансное поглощение в спектре водяного пара. Природа континуального поглощения состоит в столкновительном взаимодействии молекул водяного пара, которое включает в себя три составляющих: вклад дальних крыльев резонансных линий мономеров, вклад двойных молекул (квасисвязанных и стабильных димеров) и поглощение свободными парами [26]. Возможность экспериментального наблюдения разрешённого спектра димеров воды в мм диапазоне была показана в 2007 году [120], однако впервые наблюдать его разрешённый вращательный спектр в условиях близких к атмосферным удалось относительно недавно [70]. Наблюдение этого спектра стало возможным благодаря целому ряду инноваций, внедрённых на резонаторном спектрометре силами большого коллектива из разных отделов ИПФ РАН при участии диссертанта. Крайне малая интенсивность линий димера воды на фоне линий мономера, а также шумы аппаратуры делали затруднительным наблюдение разрешённого спектра димера. В ходе экспериментов и модернизаций удалось снизить собственные шумы аппаратуры, повысить стабильность температуры и, тем самым, увеличить итоговую чувствительность резонаторного спектрометра. Результаты измерений спектра димера воды представлены в [70].

Кислород имеет несколько интенсивных спектральных линий в миллиметровом диапазоне, а их форма и параметры во многом определяют важнейшие физические параметры атмосферных газов для дальнейших расчётов. Особый интерес представляет линия

вращательного спектра с центром на 118 ГГц. Модели, которые ранее использовались для описания формы профиля поглощения 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. [143]

#### **4.5 Исследование потерь на отражение от металлов и металлизированных покрытий для зеркал СубТГц диапазона**

Модернизация спектрометра мм диапазона, представленная в разделе (ГЛАВА 3), направлена на получение качественных результатов измерений. Настоящий раздел посвящён результатам спектроскопических измерений, проведённых на резонаторном спектрометре в процессе модернизации. В начале приведён краткий хронологический анализ задач и работ, выполнявшихся и выполняемых на резонаторном спектрометре. По характеру работ можно разделить результаты на два крупных и самостоятельных этапа: измерение потерь на отражение при криогенных температурах и спектроскопия атмосферных газов. Для каждого из экспериментов установка разбирается полностью и собирается заново. Это связано с техническими особенностями конструкции: для разных измерений требуются разные плёнки связи, разная длина резонатора, разная система охлаждения и прочее. Однако принцип и концепция измерения потерь остаётся неизменной.

##### **4.5.1 Измерения потерь на отражение материалов рефлекторов при криогенных температурах**

Для тестирования образцов отражательных материалов главного зеркал проектируемой обсерватории МИЛЛИМЕТРОН [144] в условиях эксплуатации, резонаторный спектрометр был переконфигурирован для измерений потерь на отражение при криогенных температурах. Функциональная схема установки при измерениях потерь на отражение при криогенных температурах представлена в Главе 3 (Рисунок 3.1). В эксперименте задействовано два резонатора, длина которых отличается вдвое. В коротком резонаторе вместо плоского зеркала установлен исследуемый образец. Он соединён холодопроводом с криогенной машиной и теплоизолирован от конструкции. Остальная схема измерений идентична для всех типов измерений.

В результате проведённой модернизации 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. Результаты измерений позволили не только получить численные характеристики

потерь на отражение реальных образцов материалов, но и построить полноценные теоретические модели потерь на отражение, вычислить поверхностный импеданс, оценить показатели экспоненты температурной зависимости и сравнить полученные результаты с теоретическими моделями.

Были исследованы следующие образцы:

- бескислородная медь (99.97% Cu)
  - особо чистая медь (99.999% Cu)
  - алюминий (99.99% Al)
  - конструкционный бериллий (97.8% Be)
  - золотое покрытие (99.99% Au), нанесённое методом вакуумного напыления и гальванического осаждения
  - аналогичное серебряное покрытие (99.99% Ag)
- (данные о чистоте материала от производителя)

Отражающая поверхность цельнометаллических образцов была обработана алмазным резцом, после которого шероховатость поверхности составила порядка 10-20 нм, что несопоставимо меньше длины волны. Диаметр образцов составил около 50мм, а диаметр пятна около 20-30мм (на разных частотах – от 150 до 250 ГГц). Таким образом, в расчётах можно пренебречь потерями на шероховатости поверхности и на дифракции.

Наиболее стабильным и практичным представляется золотое гальваническое покрытие: оно не подвержено коррозии и может быть нанесено на любой металл. Это важно при выборе материала охлаждаемого рефлектора телескопа Миллиметрон. При этом у него невелики потери на отражение (Рисунок 4.15) по сравнению с алюминием ( $0.4 \cdot 10^{-3}$ ) и медью ( $0.5 \cdot 10^{-3}$ ) при температуре 4К.

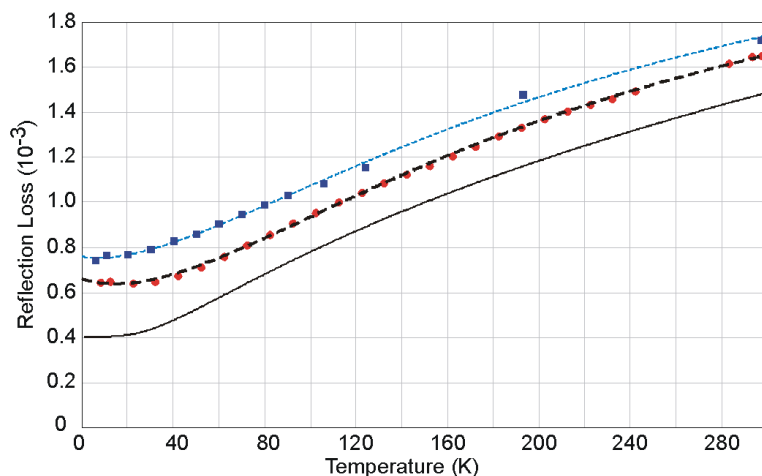


Рисунок 4.15 – Температурная зависимость потерь на отражение золотого покрытия на частоте 230ГГц. Сплошная чёрная линия – расчёт для чистого золота с учётом аномального скин-эффекта. Красные окружности и пунктирная линия – результаты эксперимента для

гальванически осаждённого золота. Синие квадраты и пунктирная линия – результаты эксперимента для золота, нанесённого вакуумным осаждением [131].

Проведённые измерения меди позволяют сделать ряд важных выводов:

1. Реальные потери на отражение больше расчётных для чистых металлов, и они существенно зависят от чистоты материала.
2. Имеет большое значение внутренняя структура медного образца, наличие нанодфектов кристаллической решётки, характерных для порошковой металлургии, существенно ухудшают показатели по отражению.
3. Дефекты, упомянутые ранее, практически не оказывают влияние на потери при комнатной температуре и существенно влияют на потери при криогенных температурах.

Все исследования потерь на отражение подробнее описаны в работе [131].

#### **4.5.2 Оценка влияния шумового вклада отражающей поверхности в шумовую температуру приёмников, проектируемых с использованием охлаждаемых рефлекторов**

Одним из ключевых факторов, определяющих чувствительность антенного тракта высокочувствительного радиоастрономического приёмника, является его шумовая антенная температура. Она включает в себя все внутренние шумы приёмного комплекса, включая тепловые шумы квазиоптического тракта. В квазиоптических схемах современных телескопов, в среднем, насчитывается от 3-х до 7-ми отражательных элементов, каждый из которых вносит аддитивную добавку к шумовой температуре приёмного комплекса. Для снижения уровня шумов, применяют криогенное охлаждение зеркал тракта, но не менее важным является их отражательная способность. Наша практика показала, что значения потерь на отражение, рассчитанные по поверхностному импедансу на постоянном токе (зачастую доступном справочных данных даже вплоть до криогенных температур), не соответствуют реальным потерям на отражение. Волны высоких частот возбуждают высокочастотные токи на поверхности металла, и даже малейшие нарушения целостности кристаллической решётки существенно снижают отражательную способность поверхности. Именно по этой причине для проектирования инструментов мм и субмм диапазонов требуются тесты реальных образцов зеркал на тех же частотах и на тех же температурах, на которых они будут использоваться.

На рисунке ниже представлена зависимость шумовой температуры, производимой зеркалом, от её физической температуры.



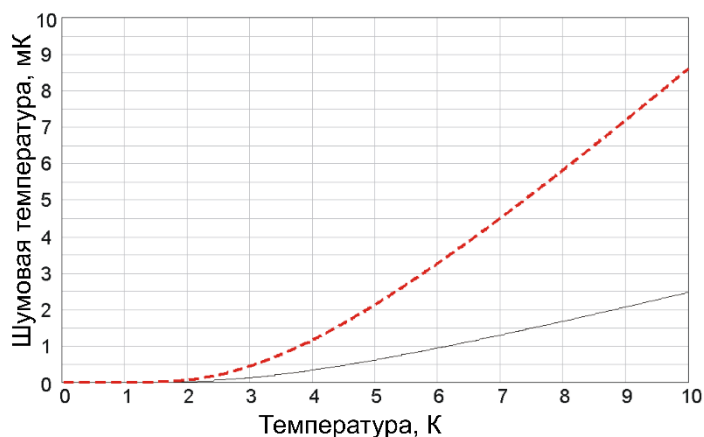


Рисунок 4.16 – Зависимость шумовой температуры зеркал от их физической температуры, рассчитанная на основе измерений потерь на отражение. Чёрная линия: расчёт для ОСЧ меди после отжига в водороде (минимальные потери). Красный пунктир – расчёт для технического бериллия. (максимальные потери) [131].

#### 4.5.3 Измерения потерь на отражение образцов высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) на основе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ при криогенных температурах

В погоне за уменьшением потерь на отражение возникла идея проверить сверхпроводники на отражение волн мм диапазона при криогенной температуре. Идея очевидна – если потери на отражение завязаны на проводимость, то у сверхпроводника должны быть нулевые потери. Однако, такой подход не совсем верен ввиду ограничения явления сверхпроводимости по частоте: на высоких частотах распадаются куперовские пары и сверхпроводимость исчезает [145]. Вопрос стоит в том, на каких частотах и насколько подавляется сверхпроводимость. Ранее подобных измерений в мм диапазоне не проводилось.

В качестве образца для испытаний была взята лента с покрытием  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  промышленного изготовления (Рисунок 4.16).

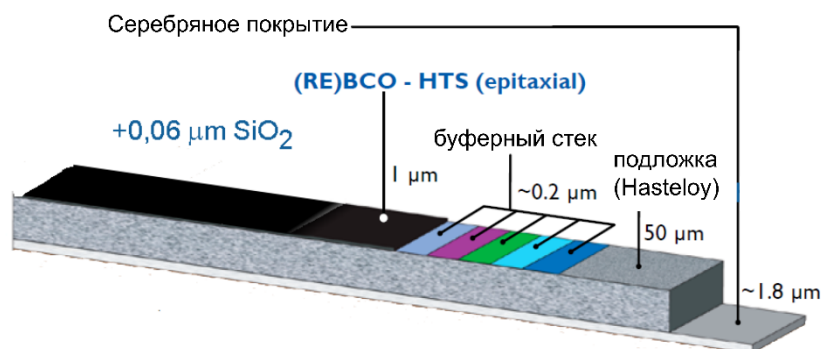


Рисунок 4.17 – Структура ленты – образца для измерений потерь на отражение [146].

Лента представляет собой несущую пластину из сплава Hastelloy шириной 11мм, покрытую с одной стороны напылением сверхпроводника около 1мкм с защитой  $\text{SiO}_2$ , и

напылением серебра с другой стороны. Поскольку ширины одной полосы недостаточно для перекрытия луча в резонаторе, полосы были наклеены без зазоров на охлаждаемое медное зеркало и прижаты кольцом по периметру. Полосы расположились к поляризации поля примерно под углом  $45^\circ$ , перекрывая весь луч. Результаты измерений представлены ниже (Рисунок 4.17).

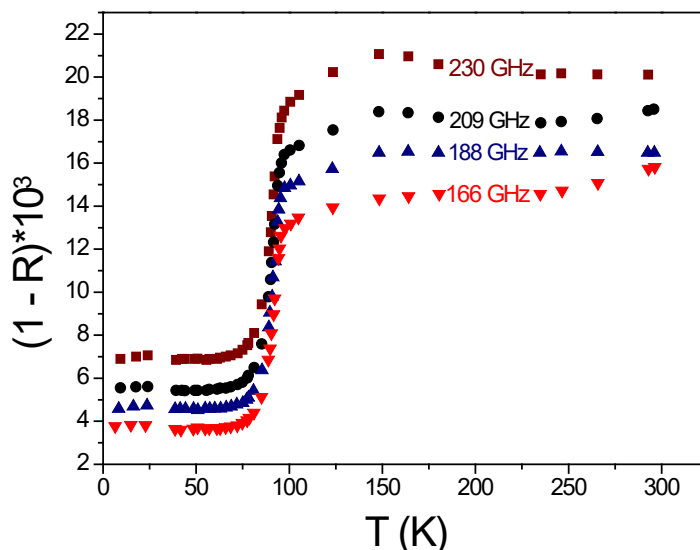


Рисунок 4.18 – Температурная зависимость потерь на отражение образца ВТСП на разной частоте [146].

При температуре около 80К наблюдается чёткий переход в сверхпроводящее состояние, что в целом подтверждает справедливость эксперимента. Однако, минимальные значения потерь на отражение оказались не столь хорошими: абсолютное значение минимальных потерь примерно в 4 раза превышает потери в алюминии и в 10 раз – медь. Это, как и предполагалось, свидетельствует о нарушении сверхпроводимости на высоких частотах.

Таким образом, наиболее перспективными и качественными, с точки зрения потерь в мм и субмм диапазонах, отражающими поверхностями для высокочувствительных радиотелескопов является серебряное или золотое напыление, а также особо чистая медь. [131]

#### 4.6 Выводы по главе 4

Глава посвящена исследованиям, проведение которых стало возможно в результате модернизации аппаратуры, представленной в главах 2 и 3. Непрерывные исследования прозрачности атмосферы в мм диапазоне в режиме удалённого доступа стали возможны благодаря целому ряду доработок радиометра МИАП-2. Исследования спектров атмосферных газов на резонаторном спектрометре отчасти стали возможны благодаря доработкам, представленным в главе 3. Спектроскопические данные о поглощении в атмосферных газах

пополняют базу данных модель MPM Liebe [31], благодаря которой удалось оценить эквивалентную частоту радиометров комплекса МИАП-2. Кроме исследований атмосферы, модернизация резонаторного спектрометра позволила проводить измерения потерь на отражение от металлов при криогенных температурах. Эти измерения, кроме демонстрации результатов инженерных доработок, представляют собой ценность для количественной оценки шумовой компоненты антенных систем, в том числе космического назначения. 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.

Радиометрическая система МИАП-2 в настоящее время представляет собой надёжный прибор с известными характеристиками и обширным опытом эксплуатации в самых разных условиях. Его модернизация, представленная в настоящей диссертации, закончена и позволяет получать качественные научные результаты. Дальнейшие планы по развитию этого прибора связаны с дополнением его каналами измерения 1.3мм и 0.8мм.

В настоящее время резонаторный спектрометр обладает рекордными для данного типа установок параметрами, он позволяет решать широкий спектр задач, непосильных другим инструментам. Однако его конструкция, исторически претерпевшая несколько этапов доработки, во многом исчерпала возможности улучшения основных параметров. Дальнейшее развитие резонаторной спектроскопии в ИПФ связывается с построением нового резонатора в новой вакуумной камере. Эта научная установка в целом представляет собой набор инженерных и конструкторских решений, от качества исполнения которых зависит конечный результат, то есть чувствительность и другие эксплуатационные параметры.

Основные результаты 4й главы опубликованы в 4-х статьях [70, 94, 108, 146] и 25-ти материалах конференций [95, 96, 139, 140, 147–154, 97, 155–160, 98, 110, 111, 117–119, 137].

## Заключение

Работа посвящена модернизации аппаратуры и развитию методики исследования поглощения волн СубТГц диапазона частот в атмосфере Земли в полевых и лабораторных условиях для практических целей радиоастрономии, телекоммуникации и спектроскопии. Подводя итоги, перечислим основные научно-технические решения, которые были разработаны и внедрены в ходе работы. Особый интерес представляют исследования, которые удалось провести на разработанной аппаратуре.

1. В работе представлены особенности проектирования, модернизации и эксплуатации радиометрического комплекса МИАП-2 для измерения прозрачности атмосферы в мм диапазоне. Начальные характеристики этого оборудования позволяли использовать его только в одноканальном режиме, только в лаборатории под присмотром специалиста, а получаемые данные были ограничены только оптической толщиной в ясную погоду. В результате диссертационной работы этот прибор значительно расширил свой функционал: собран и отлажен 2-мм канал радиометра МИАП-2 (Мус-Хая), организована система удалённого доступа, а оборудование адаптировано для работы в любых метеоусловиях. Разработанная метеостанция значительно расширила перечень данных, получаемых радиометрическим комплексом. В результате проведённой работы получился надёжный экспедиционный прибор, способный работать автономно длительное время.

2. Разработана методика обработки данных астроклимата, позволяющая снизить ошибку расчёта оптической толщины, получаемой методом атмосферных разрезов. Критический анализ результативности методики показывает снижение разброса данных на 5 % в 2мм канале и на 30% в 3мм. Таким образом, новая методика рассчитывает оптическую толщину с меньшей ошибкой, чем классический метод атмосферных разрезов, особенно в сложных условиях. В условиях ясного неба обе методики дают схожие результаты. Предложена методика калибровки широкополосных радиометрических приёмников с использованием экспериментального и расчётного соотношения интегральной влажности с оптической толщиной. Методика позволяет оценить эквивалентную частоту широкополосного радиометра по его рутинным наблюдениям прозрачности атмосферы.

3. С использованием модернизированного радиометрического комплекса и разработанной методики обработки данных исследован астроклимат более 20 точек на территории Восточного полушария в ходе 11-ти экспедиций с точки зрения перспектив их использования для радиоастрономических наблюдений и передачи коммуникационных сигналов дальней космической связи в этом диапазоне. Выявлены некоторые особенности астроклимата в различных климатических зонах и ландшафтах. Зачастую локальный климат местности вносит

определяющий вклад в интегральную прозрачность атмосферы. Экспериментально измерена зависимость интегральной прозрачности атмосферы от высоты места наблюдений.

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.

4. Модернизирован резонаторный спектрометр миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Созданы и внедрены системы термометрии и термостабилизации, автоматизации измерений и другие сопутствующие аппаратные средства спектрометра. Расчёт параметров квазиоптического тракта спектрометрического комплекса позволил оценить вклад разных конструктивных элементов в паразитную интерференцию. В результате исследований предложен и реализован комплекс мер, снижающих её. Создана программа для расчёта параметров резонатора Фабри-Перо и квазиоптического тракта запитки. В результате проведённой модернизации спектрометра удалось достичь порядка  $4 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-1}$  в диапазоне 45 – 500 ГГц при контролируемом давлении в диапазоне 10-1000 Торр и температуре в диапазоне - 30 .. +60°C. Это позволило провести прецизионные измерения спектров атмосферных газов в СубТГц диапазоне в широком диапазоне давления и температуры, а также прецизионные измерения потерь на отражение при криогенных температурах от поверхности металлов, используемых в волноведущих структурах. В частности, на резонаторном спектрометре успешно протестированы материалы космического телескопа мм диапазона Миллиметрон.

В диссертации представлен завершённый этап развития аппаратуры и методов исследования прозрачности атмосферы в СубТГц диапазоне силами коллективов из ИПФ РАН и НГТУ. Однако, новые исследовательские задачи продолжают диктовать новые требования к оборудованию и методикам, подталкивая инженеров и разработчиков к созданию новых решений, расширяющих и дополняющих возможности разработанной аппаратуры. Выполненные в диссертации работы стали основой ведущихся в настоящий момент проектов по дальнейшему развитию аппаратуры и методов для радиометрических измерений прозрачности атмосферы в полевых и лабораторных условиях. Радиометрический комплекс МИАП-2 в совокупности с предложенной методикой обработки данных хорошо себя зарекомендовал, что послужило предпосылкой к созданию нового 4-х канального комплекса, работающего в 4-х окнах прозрачности от 3мм до 0.8мм.

Развитие резонаторной спектроскопии в ИПФ РАН подразумевает создание нового спектрометра с целью разделения функционала газовой и криогенной спектроскопии на разные

установки. Новый спектрометр оптимизирован под газовую спектроскопию с учётом полученного опыта, а исследования при криогенных температурах останутся в старом. Спектрометр разработан с учётом рекомендаций, представленных в настоящей работе.

**Благодарности.**

Автор выражает благодарность сотрудникам ИПФ РАН, НГТУ им. Р.Е. Алексеева и САО РАН за организацию творческого научно-исследовательского процесса и предоставленную возможность выполнить исследования.

Низкий поклон моему научному руководителю, наставнику и учителю В.Ф. Вдовину, а также другим старшим коллегам и наставникам, которые так или иначе помогали в работе и делились опытом: М.Ю. Третьякову, В.В. Паршину, И.И. Зинченко, В.И. Носову, Ю.Ю. Балеге, Г.Н. Ильину.

Огромная благодарность за всестороннюю помощь коллегам по ИПФ РАН, НГТУ, САО РАН и других организаций, а именно: И.В. Леснову, А.А. Гунбиной, П.М. Землянхуе, Е. Домбеку, Ю.Г. Белову, Ю.И. Белову, А.С. Раевскому, С.Б. Раевскому, О.С. Большакову, А.С. Марухно, М.А. Мансфельд, А.В. Вдовину, Е.Б. Абашину, С.Ю. Дрягину, А.И. Елисееву, Д.В. Коротаеву, В.С. Окуневу, Е.А. Серову, М.А. Кошелеву, Т.А. Одинцовой, А.А. Заргарову, В.Н. Хайкину, П.Л. Никифорову.

Спасибо за плодотворные беседы по тематике работы А.А. Швецову, Ю.Ю. Куликову, А.А. Рыскину, Л.В. Лубяко, А.П. Марковой, А.В. Лапинову, И.В. Ракутю, А.Л. Панкратову, И.Т. Бубукину, М.А. Агафонову, В.В. Кочаровскому, В.К. Дубровичу, А.И. Яворовской, Е.Л. Певзнеру, И.В. Кузнецову, Ф.Н. Ковалёву, Р.А. Алексееву,.

## Список сокращений и условных обозначений

АЦП – Аналогово-цифровой преобразователь

АЧХ - амплитудно-частотная характеристика

ДБШ - диод с барьером Шоттки

ДЗЗ - дистанционное зондирование Земли

ИСЗФ – Институт Солнечно-Земной физики РАН

ИПС – изопропиловый спирт

ЛОВ – лампа обратной волны

ММ волны - коротковолновая часть миллиметрового и начало субмиллиметрового диапазонов (0,3 – 3 мм).

медь МО – медь, содержащая 99,95% Си и не более 0,05% примесей (ГОСТ 859—41)

МШУ – малошумящий усилитель

ОУ - операционный усилитель

ОСЧ - особо чистая (медь)

ПК - персональный компьютер

ПЧ – промежуточная частота

РСДБ - радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой

СВЧ – сверхвысокочастотное (излучение)

СКО – среднеквадратическое отклонение

ССО – Саянская Солнечная обсерватория

СубТГц волны – субтерагерцовый диапазон волн (0,1-1 ТГц)

ТГц-волны – терагерцовый диапазон волн (0,3- 3 ТГц или 0,1-10 ТГц в широком смысле)

УПЧ – усилитель промежуточной частоты

ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь

ШД - шаговый двигатель

*PWV* – Precipitable water vapor (*количество осаждаемой воды*)



### Список литературы

1. Gordy W. Microwave spectroscopy / W. Gordy – , 1948.– 668–717с.
2. Леснов И. Криоэлектронные приёмные системы и программно-технические средства для изучения и контроля их характеристик / Леснов И. – 2016.
3. Щеглов П. Проблемы оптической астрономии / П. Щеглов – , 1980.
4. Астронет > Астроклимат [Электронный ресурс]. URL: <http://www.astronet.ru/db/msg/1186377> (accessed: 07.09.2020).
5. Ulich B.L. Improved correction for millimeter-wavelength atmospheric attenuation / Ulich B.L. // *Astrophysical Letters* – 1980. – Т. 21 – С.21–28.
6. Nasir F.T. Weather forecasting and dynamic scheduling for a modern cm/mm wave radiotelescope / Nasir F.T., Castiglia C., Buffa F., Deiana G.L., Delitala A., Tarchi A. // *Experimental Astronomy* – 2013. – Т. 36 – № 1–2 – С.407–424.
7. Liebe H.J. Atmospheric 60-GHz oxygen spectrum: New laboratory measurements and line parameters / Liebe H.J., Rosenkranz P.W., Hufford G.A. // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* – 1992. – Т. 48 – № 5–6 – С.629–643.
8. Escalante-Ramirez B. Remote Sensing - Advanced Techniques and Platforms / B. Escalante-Ramirez – InTech, 2012.
9. McMillan R.W. Advances in Sensing with Security Applications / R. W. McMillan – Kluwer Academic Publishers, 2006.
10. Sirtori C. Bridge for the terahertz gap / Sirtori C. // *Nature* – 2002. – Т. 417 – № 6885 – С.132–133.
11. Makarov D.S. Revision of the 60-GHz atmospheric oxygen absorption band models for practical use / Makarov D.S., Tretyakov M.Y., Rosenkranz P.W. // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* – 2020. – Т. 243 – С.106798.
12. Kulikov M.Y. Simultaneous Ground-Based Microwave Measurements of the Middle-Atmosphere Ozone and Temperature / Kulikov M.Y., Krasil'nikov A.A., Shvetsov A.A., Fedoseev L.I., Ryskin V.G., Kukin L.M., Mukhin D.N., Belikovich M. V., Karashtin D.A., Skalyga N.K., Feigin A.M. // *Radiophysics and Quantum Electronics* – 2015. – Т. 58 – № 6 – С.409–417.
13. Volosyuk V.K. Review of modern algorithms for high resolution imaging with passive radar / Volosyuk V.K., Kravchenko V.F., Kutuza B.G., Pavlikov V. V. // *2015 International Conference on Antenna Theory and Techniques: Dedicated to 95 Year Jubilee of Prof. Yakov S. Shifrin, ICATT 2015 - Proceedings* – 2015.
14. Pickett H.M. <title>THz spectroscopy of the atmosphere</title> / под ред. M.S. Sherwin. SPIE, 1999. – 2–6с.
15. Krasilnikov A.A. Automated microwave radiometer for measuring the atmospheric ozone

emission line / Krasilnikov A.A., Kulikov M.Y., Kukin L.M., Ryskin V.G., Fedoseev L.I., Shvetsov A.A., Bolshakov O.S., Shchitov A.M., Feigin A.M. // *Instruments and Experimental Techniques* – 2017. – Т. 60 – № 2 – С.271–273.

16. Artemenko Y. The Suffa project and high capacity channels for deep space communications systems incorporating cryogenic elements / Artemenko Y., Shanin G., Vdovin V., Bubnov G., Grachev V., Gunbina A., Dryagin S., Eliseev A., Lesnov I., Mansfeld M., Pilipenko A. // *2019 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems, COMCAS 2019* – 2019.

17. Смирнов А.В. ТЕКУЩИЙ ЭТАП РАЗРАБОТКИ ПРИЁМНОГО КОМПЛЕКСА КОСМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «МИЛЛИМЕТРОН» / Смирнов А.В., Барышев А.М., Де Бернардис П., Вдовин В.Ф., Гольцман Г.Н., Кардашёв Н.С., Кузьмин Л.С., Кошелец В.П., Выставкин А.Н., Лобанов Ю.В., Рябчун С.А., Финкель М.И., Хохлов Д.Р. // *Известия вузов. Радиофизика* – 2011. – Т. 54 – № 8–9 – С.Том LIV, № 8–9.

18. Coppolecchia A. OLIMPO: A 4-bands imaging spectro-photometer for balloon-borne observations of the Sunyaev-Zel'dovich effect / Coppolecchia A., Amico G., Battistelli E.S., Bernardis P. De, Cruciani A., D'addabbo A., D'alessandro G., Gregori S. De, Petris M. De, Gualtieri R., Lamagna L., Masi S., Nati L., Nati F., Pagano L., Piacentini F., Puddu R., Romano D., Salatino M., Schillaci A., Ade P., Mauskopf P., Morozov D., Tucker C., Tucker R., Boscaleri A., Camus P., Colafrancesco S., Marchegiani P., Stefano G. Di, Romeo G., Gervasi M., Zannoni M., Irwin K., Reintsema C., Paiva Novaes C., Wuensche A., Yvon D., Vdovin V. // *Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi"* – 2014. – Т. 186 – С.257–264.

19. Kardashev N.S. RadioAstron and millimetron space observatories: Multiverse models and the search for life / Kardashev N.S. // *Astronomy Reports* – 2017. – Т. 61 – № 4 – С.310–316.

20. Khaikin V. On the Eurasian Submillimeter Telescopes Project (ESMT) / V. Khaikin, M. Lebedev, V. Shmagin, I. Zinchenko, V. Vdovin, G. Bubnov, V. Edelman, G. Yakopov, A. Shikhovtsev, G. Marchiori, M. Tordi, R. Duan, D. Li – , 2020.

21. IEEE [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ieee.org/>.

22. URSI Home [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ursi.org/homepage.php> (accessed: 07.09.2020).

23. Tremblin P. Worldwide site comparison for submillimetre astronomy / Tremblin P., Schneider N., Minier V., Durand G. Al, Urban J. // *Astronomy & Astrophysics* – 2012. – Т. 548 – С.А65.

24. Вдовин В.Ф. Современные радиоастрономические приёмные системы миллиметровых и субмиллиметровых волн / Вдовин В.Ф., Зинченко И.И. // *Изв.ВУЗов Радиофизика*, 2009, Том LII, №7 – 2009. – Т. 52 – № 7 – С.511–524.

25. HITRAN <https://hitran.org/>.

26. Третьяков М.Ю. Высокоточная резонаторная спектроскопия атмосферных газов в

- миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн / Третьяков М.Ю. // автореферат дис. доктора физ-мат. наук: 01.04.03 – 2017.
27. Dryagin Y.A. A method to measure dielectric parameters in 5-0.5 millimeter wavelength band / Dryagin Y.A., Parshin V. V. // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves* – 1992. – Т. 13 – № 7 – С.1023–1032.
28. Krupnov A.F. Precision resonator microwave spectroscopy in millimeter and submillimeter range / Krupnov A.F., Tretyakov M.Y., Parshin V. V., Shanin V.N., Kirillov M.I. // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves* – 1999. – Т. 20 – № 10 – С.1731–1737.
29. А.Ф. Крупнов Развитие фазовой автоподстройки частоты микроволновых генераторов до терагерцового диапазона / А.Ф. Крупнов // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика.* – 1998. – Т. 41 – № 11 – С.1361–1377.
30. Krupnov A.F. Modern Millimeter-Wave Resonator Spectroscopy of Broad Lines / Krupnov A.F., Tretyakov M.Y., Parshin V.V., Shanin V.N., Myasnikova S.E. // *Journal of Molecular Spectroscopy* – 2000. – Т. 202 – № 1 – С.107–115.
31. Koshelev M.A. Millimeter wave continuum absorption in moist nitrogen at temperatures 261–328K / Koshelev M.A., Serov E.A., Parshin V.V., Tretyakov M.Y. // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* – 2011. – Т. 112 – № 17 – С.2704–2712.
32. Панчук В.Е. Астроклимат Северного кавказа-мифы и реальность / Панчук В.Е., Афанасьев Л.В. // *Астрофизический бюллетень* – 2011. – Т. 66 – № 2 – С.253–274.
33. Shi S.-C. THz atmospheric transmission measured at antarctic Dome A 10.1109/IRMMW-THz.2012.6380395.: IEEE, 2012. – 1–2с.
34. C. Munoz-Tunón The astroclimatic station: A Must for any major observatory (Invited Speaker) / C. Munoz-Tunón // *Astronomical Site Evaluation in the Visible and Radio Range. ASP Conference Proceedings* – 2002. – Т. 266 – С.498.
35. APEX - the Atacama Pathfinder Experiment / // *The Messenger* (ISSN 0722-6691) – Т. No. 109, p.
36. Güsten R. The Atacama Pathfinder EXperiment (APEX) – a new submillimeter facility for southern skies – / Güsten R., Nyman L.Å., Schilke P., Menten K., Cesarsky C., Booth R. // *Astronomy & Astrophysics* – 2006. – Т. 454 – № 2 – С.L13–L16.
37. Shikhovtsev A.Y. Atmospheric parameters at the 6-m Big Telescope Alt-azimuthal site / Shikhovtsev A.Y., Bolbasova L.A., Kovadlo P.G., Kiselev A. V // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* – 2020. – Т. 493 – № 1 – С.723–729.
38. Bubnov G.M. Astroclimatic studies of the sites for forthcoming radio astronomical observatories Gothenburg, Sweden: nrao.edu, 2019. – 143–148с.
39. Voziakova O. V. Atmospheric transparency over Mount Shatdzhatmaz in the optical and near-infrared ranges / Voziakova O. V. // *Astronomy Letters* – 2012. – Т. 38 – № 4 – С.271–279.

40. Краус Д. Радиоастрономия / Д. Краус – Рипол Классик, 1973. Вып. Железняков– 456с.
41. Kämpfer N. Monitoring Atmospheric Water Vapour / N. Kämpfer / под ред. N. Kämpfer. – New York, NY: Springer New York, 2013. – 1–326с.
42. САКЕРИН С.М. Обобщение результатов измерений аэрозольной оптической толщины атмосферы на арх. Шпицберген в 2011–2016 гг. / САКЕРИН С.М., КАБАНОВ Д.М., РАДИОНОВ В.Ф., ЧЕРНОВ Д.Г., ТУРЧИНОВИЧ Ю.С., ЛУБО-ЛЕСНИЧЕНКО К.Е., ПРАХОВ А.Н. // Оптика атмосферы и океана. – 2017. – Т. Т. 3 – № 11 – С.948–955.
43. Метеорологическое оборудование. МТР-5 [Электронный ресурс]. URL: <http://attex.net/RU/index.php>.
44. Westwater E.R. Radiometric monitoring of atmospheric boundary layer temperature profiles / E. R. Westwater, A. S. Vyazankin, K. P. Gaikovich, E. N. Kadygrov, D. Y. Moiseev – Russian Meteorology and Hydrology. 43-53. , 1999. – 43–53с.
45. Radford S.J.E. Submillimeter Atmospheric Transparency at Maunakea, at the South Pole, and at Chajnantor / Radford S.J.E., Peterson J.B. // Publications of the Astronomical Society of the Pacific – 2016. – Т. 128 – № 965 – С.075001.
46. Ильин Г.Н. Определение тропосферной задержки радиосигнала радиометрическим методом. / Ильин Г.Н., Троицкий А.В. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2017. – Т. 60 – № 4 – С.326–335.
47. HU Wei-dong Terahertz atmosphere remote sensing / HU Wei-dong, Jin-jia J., Rui-ting L., Wen-qi W., LIGHTHART L.P. // Chinese Optics – 2017. – Т. 10 – № 5 – С.656–665.
48. Klein M. Nadir sensitivity of passive millimeter and submillimeter wave channels to clear air temperature and water vapor variations / Klein M., Gasiewski A.J. // Journal of Geophysical Research: Atmospheres – 2000. – Т. 105 – № D13 – С.17481–17511.
49. Красильников А.А. Мобильный спектрометрический комплекс для зондирования озона средней атмосферы / Красильников А.А., Куликов М.Ю., Кукин Л.М., Рыскин В.Г., Федосеев Л.И., Швецов А.А., Мухин Д.Н., Беликович М.В., Большаков О.С., Щитов А.М., Михайловский В.Л., Шумилов В.А., Фейгин А.М. // Изв ВУЗов. Радиофизика – 2013. – Т. 56 – № 8–9 – С.699–710.
50. Nagahama T. Ground-based millimeter-wave observations of ozone in the upper stratosphere and mesosphere over Tsukuba / Nagahama T., Nakane H., Fujinuma Y., Ninomiya M., Ogawa H., Fukui Y. // Earth, Planets and Space – 1999. – Т. 51 – № 12 – С.1287–1296.
51. Рыскин В.Г. Микроволновый радиометрический комплекс для исследования термической структуры атмосферы Земли / Рыскин В.Г., Швецов А.А., Куликов М.Ю., Беликович М.В., Большаков О.С., Красильников А.А., Фейгин А.М. // Изв. ВУЗов Радиофизика – 2016. – Т. 59 – № 8–9 – С.819–827.
52. Keihm S.J. New model-based Bayesian inversion algorithm for the retrieval of wet

- troposphere path delay from radiometric measurements / Keihm S.J., Marsh K.A. // *Radio Science* – 1998. – Т. 33 – № 2 – С.411–419.
53. Бубукин И.Т. Прототип двухволновой радиометрической системы миллиметрового диапазона длин волн для дистанционного зондирования атмосферы и особенности атмосферного поглощения на станции “Кара-Даг” по данным натуральных измерений / Бубукин И.Т., Агафонов М.И., Ракуть И.В., Панкратов А.Л., Яблоков А.А., Троицкий А.В., Приймак А.С., Горбунов Р.В. // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика* – 2019. – Т. 62 – № 7–8 – С.630–639.
54. Федосеев, Л. И. Радиометр 3-миллиметрового диапазона длин волн с модулятором-калибратором / Федосеев, Л. И., Божков В.Г., Геннеберг В.А., Петров И.В., Шкаев А.П. // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика* – 2007. – Т. 50 – № 10–11 – С.948–953.
55. Красильников А.А. Автоматизированный микроволновый спектрометрический прибор для измерения излучения атмосферы в линии озона, “Приборы и техника эксперимента” / Красильников А.А., Куликов М.Ю., Кукин Л.М., Рыскин В.Г., Федосеев Л.И., Швецов А.А., Большаков О.С., Щитов А.М., Фейгин А.М. // *Приборы и техника эксперимента* – 2017. – № 2 – С.123–125.
56. Yao Q. Atmospheric profiling synthetic observation system at THz bands , 2014.
57. КРАСИЛЬНИКОВ А.А. Новый малогабаритный микроволновый спектрометрический озонометр / КРАСИЛЬНИКОВ А.А., КУЛИКОВ Ю.Ю., РЫСКИН В.Г., ДЕМКИН В.М., КУКИН Л.М., МИХАЙЛОВСКИЙ В.Л., ШАНИН В.Н., ШЕЙНЕР З.М., ШУМИЛОВ В.А., ЩИТОВ А.М. // *Instruments and Experimental Techniques* – 2011. – № 1 – С.127–133.
58. Ezau I.N. The analysis of results of remote sensing monitoring of the temperature profile in lower atmosphere in Bergen (Norway) / Ezau I.N., Wolf T., Miller E.A., Repina I.A., Troitskaya Y.I., Zilitinkevich S.S. // *Russian Meteorology and Hydrology* – 2013. – Т. 38 – № 10 – С.715–722.
59. Кисляков А.Г. Об измерении поглощения радиоволн в атмосфере по ее тепловому излучению / Кисляков А.Г., АГ Кисляков // *Радиотехника и электроника* – 1968. – Т. 13 – № 7 – С.1161.
60. Красильников А.А. Микроволновые приемники для диагностики малых газовых составляющих земной атмосферы / Красильников А.А., Куликов Ю.Ю., Рыскин В.Г., Щитов А.М. // *Известия Российской академии наук. Серия физическая* – 2003. – Т. 67 – № 12 – С.1791–1795.
61. Guerra J.C. Analysis and comparison of the atmospheric parameters retrieved from a Ex-AO instrument with the astroclimatic monitoring system / под ред. E. Marchetti, L.M. Close, J.-P. Véran. 10.1117/12.2233802.: SPIE, 2016. – 990937с.
62. Siles G.A. THz propagation research within the TERASENSE project: Atmospheric gases attenuation / Siles G.A., Riera J.M., García-Del-Pino P. // *EuCAP 2010 - The 4th European Conference on Antennas and Propagation* – 2010. – С.6–10.
63. Wang R. The physical theory and propagation model of THz atmospheric propagation / Wang

- R., Yao J.Q., Xu D.G., Wang J.L., Wang P. // *Journal of Physics: Conference Series* – 2011. – Т. 276 – № 1 – C.012223.
64. Gordon I.E. The HITRAN2016 molecular spectroscopic database / Gordon I.E., Rothman L.S., Hill C., Zak E.J. // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* – 2017. – Т. 203 – С.3–69.
65. Jacquinet-Husson N. The 2009 edition of the GEISA spectroscopic database / Jacquinet-Husson N., Crepeau L., Armante R., Auwera J. Vander // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* – 2011. – Т. 112 – № 15 – С.2395–2445.
66. Telecomunicaciones U.I. deUIT-R P.676-11 Attenuation by atmospheric gases P Series Radiowave propagation / U. I. de Telecomunicaciones – , 2016.– 24с.
67. Серов Е. Исследование Спектра Поглощения Микроволн Атмосферным Водяным Паром Для Задач Дистанционного Зондирования Окружающей Среды г. Таруса, 2015.
68. Паршин В.В. Аппаратурный комплекс для прецизионного исследования распространения мм и субмм волн в атмосфере , 2008. – 258–261с.
69. Tretyakov M.Y. Resonator spectrometer for precise broadband investigations of atmospheric absorption in discrete lines and water vapor related continuum in millimeter wave range / Tretyakov M.Y., Krupnov A.F., Koshelev M.A., Makarov D.S., Serov E.A., Parshin V. V. // *Review of Scientific Instruments* – 2009. – Т. 80 – № 9 – С.093106.
70. Tretyakov M.Y.Y. Water dimer and the atmospheric continuum / Tretyakov M.Y.Y., Koshelev M.A.A., Serov E.A.A., Parshin V.V. V, Odintsova T.A.A., Bubnov G.M.M. // *Physics-Uspekhi* – 2014. – Т. 57 – № 11 – С.1083–1098.
71. Smirnov A. V. Space mission Millimetron for terahertz astronomy / под ред. M.C. Clampin, G.G. Fazio, H.A. MacEwen, J.M. Oschmann. SPIE, 2012. – 84424Сс.
72. Parshin V.V. Cryogenic Resonator Complex / Parshin V.V., Serov E.A., Bubnov G.M., Vdovin V.F., Koshelev M.A., Tretyakov M.Y. // *Radiophysics and Quantum Electronics* – 2014. – Т. 56 – № 8–9 – С.554–560.
73. Балега Ю.Ю. 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., Кошелец 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., 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., Кошелец В.П., others // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика* – 2020. – Т. 63 – № 7 – С.533–556.
74. Разработка технологий субтерагерцовых коммуникаций / // *Известия ВУЗов. Радиофизика. Направлено в печать, 2020.*

75. Sugawara E. Properties of AdeABC and AdeIJK Efflux Systems of *Acinetobacter baumannii* Compared with Those of the AcrAB-TolC System of *Escherichia coli* / Sugawara E., Nikaido H. // *Antimicrobial Agents and Chemotherapy* – 2014. – Т. 58 – № 12 – С.7250–7257.

76. Караваев Д. СВЧ-радиометрические исследования влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков / Д. Караваев – , 2005.

77. Шарков Е.А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: Физические основы / Е. А. Шарков – Москва: Механика, управление и автоматика, 2014.

78. Kutuza V.G. Spatial and temporal fluctuations of atmospheric microwave emission / Kutuza V.G. // *Radio Science* – 2003. – Т. 38 – № 3.

79. Жевакин С.А. Радиоизлучение атмосферы и исследование поглощения сантиметровых волн. / Жевакин С.А., Троицкий В.С., Цейтлин Н.М. // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*, – 1958. – Т. т.1 – № 2 – С.19–26.

80. Кисляков А.Г. Исследование тропосферного поглощения радиоволн радиоастрономическими методами. / Кисляков А.Г., Станкевич К.С. // *Изв. ВУЗов. Радиофизика* – 1967. – Т. 10 – № 9–10 – С.1244–1265.

81. Носов В.И. Двухволновый Измеритель Радиопрозрачности Атмосферы Миллиметрового Диапазона / Носов В.И., Большаков О.С., Бубнов Г.М., Вдовин В.Ф., Зинченко И.И., Марухно А.С., Никифоров П.Л., Федосеев Л.И., Швецов А.А. // *Приборы И Техника Эксперимента* – 2016. – Т. 2016, №. 3 – № 3 – С.49–56.

82. Артеменко Ю.Н. Двухчастотный измеритель атмосферного поглощения в миллиметровом диапазоне волн. / Артеменко Ю.Н., Бубнов Г.М., Большаков О.С., Вдовин В.Ф., Данилевский Д.Б., Зинченко И.И., Никифоров П.Л., Носов В.И., Федосеев Л.И., Шевцов А.А., Шанин Г.И. // *Узбекский физический журнал* – 2014. – Т. 16 – № 6 – С.421–429.

83. Бубнов Г.М. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЯ АСТРОКЛИМАТА В КОРОТКОВОЛНОВОЙ ЧАСТИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН НА ПЛАТО СУФФА / Бубнов Г.М., Артеменко Ю.Н., Вдовин В.Ф., Данилевский Д.Б., Зинченко И.И., Носов В.И., Никифоров П.Л., Шанин Г.И., Раупов Д.А. // *Изв. Вузов Радиофизика* – 2016. – Т. 59 – № 8–9 – С.852–861.

84. Артеменко Ю.Н. Развитие проекта Международной обсерватории Суффа Санкт-Петербург, 2016. – 5с.

85. Власов С.Н. Просветление раздела диэлектриков гофрированием их границы. / Власов С.Н., Копосова Е.В. // *Ж.Т.Ф.* – 1993. – Т. 63 – № 7 – С.123–130.

86. Радзиховский В.Н. ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОБАРЬЕРНЫХ ДЕТЕКТОРНЫХ ДИОДОВ ШОТТКИ В ШИРОКОПОЛОСНОМ РАДИОМЕТРЕ 3 ММ ДИАПАЗОНА / В. Н. Радзиховский, С. Е. Кузьмин, В. Б. Хайкин, С. В. Шлензин, В. Р. Закамов, В. И. Шашкин – , 2008.

87. Zakamov V.R. Receiver module for passive imaging system in 3 mm waves band , 2009. –

79–80с.

88. Khaikin V.B. A wideband receiver-module for passive MM wave imaging array: optimization and test results , 2010. – 1–3с.

89. Закамов В.Р. Сверхширокополосные согласующие цепи детекторов трехмиллиметрового диапазона длин волн для матричных радиометрических применений. / Закамов В.Р., Кузьмин С.Е., Радзиховский В.Н., Хайкин В.Б. // Успехи современной радиоэлектроники – 2011. – № 12 – С.79–84.

90. Тимофеева А.А. Определение геометрических размеров рупорных облучателей с диаграммами направленности близкими к оптимальным / Тимофеева А.А. // Электросвязь – 1977. – Т. 5 – С.28–33.

91. Щелкунов С.А. Антенны. Теория и практика. / С. А. Щелкунов, Г. Т. Фриис – Москва: Сов. Радио, 1955.

92. Захарьев Л. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Захарьев Л., Леманский А., Турчин В. // Радио и связь – 1985.

93. Радиометр миллиметрового диапазона для измерения атмосферного поглощения / – НГТУ, Дипломная работа магистра, 2013.

94. Bubnov G.M. Searching for new sites for THz observations in Eurasia / Bubnov G.M., Abashin E.B., Balega Y.Y., Bolshakov O.S., Dryagin S.Y., Dubrovich V.K., Marukhno A.S., Nosov V.I., Vdovin V.F., Zinchenko I.I. // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology – 2015. – Т. 5 – № 1 – С.64–72.

95. Бубнов Г.М. Текущие результаты и планы исследования астроклимата в мм диапазоне длин волн Пушино, 2014. – 146с.

96. Dark ages & Wight nights symposium (DAWN-2016).

97. Бубнов Г.М. Результаты длительных исследований миллиметрового астроклимата в бадарах и на суффе и перспективы реализации наземных радиоастрономических наблюдений на длинах волн до 1 мм Москва: ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, 2016. – 379–381с.

98. Bubnov G.M. Millimeter-wave astroclimate investigations on badary observatory near Baikal lake / Bubnov G.M., Vdovin V.F., Bukov V.Y., Makarov T.A., Il'in G.N., Zinchenko I.I. // 2017 32nd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science, URSI GASS 2017 – 2017. – Т. 2017- Janua – № August – С.1–4.

99. Шабунин С.Н. Волноводы и объемные резонаторы: Методические указания по курсу / С. Н. Шабунин, И. П. Соловьянова – , 1998. – 40с.

100. Daubechies 6 wavelet (db6) properties, filters and functions - Wavelet Properties Browser [Электронный ресурс]. URL: <http://wavelets.pybytes.com/wavelet/db6/> (accessed: 09.09.2020).

101. Lee G. PyWavelets: A Python package for wavelet analysis / Lee G., Gommers R., Waselewski F., Wohlfahrt K., O'Leary A. // Journal of Open Source Software – 2019. – Т. 4 – № 36 –



C.1237.

102. Коэффициент корреляции Пирсона [Электронный ресурс]. URL: [http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Коэффициент\\_корреляции\\_Пирсона](http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Коэффициент_корреляции_Пирсона) (accessed: 09.09.2020).

103. Newville M. LMFIT: Non-Linear Least-Square Minimization and Curve-Fitting for Python / Newville M., Ingargiola A., Stensitzki T., Allen D.B. // Zenodo – 2014. – № <http://doi.org/10.5281/zenodo.11813>.

104. Pedregosa F. Scikit-learn: Machine Learning in Python / Pedregosa F., Grisel O., Weiss R., Passos A., Brucher M., Varoquax G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Prettenhofer P., Weiss R., Dubourg V., Brucher M. // Journal of Machine Learning Research – 2011. – Т. 12 – С.2825–2830.

105. Zemlyanukha P.M. The Spatial–Kinematic Structure of the Region of Massive Star Formation S255N on Various Scales / Zemlyanukha P.M., Zinchenko I.I., Salii S. V., Ryabukhina O.L., Liu S.Y. // Astronomy Reports – 2018. – Т. 62 – № 5 – С.326–345.

106. Smirnov G.T. Computer Approximation of the Spectrograms of Radiosources / Smirnov G.T., Tsivilev A.P. // Soviet Astronomy – 1982. – Т. 26 – С.616–621.

107. Bubnov G. Observations of astro-climate with the broad band radiometer using the atmospheric dip method American Institute of Physics Inc., 2020. – 020014с.

108. Агафонов М.И. Результаты наблюдений астроклимата на Крымском полуострове в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн / Агафонов М.И., Бубнов Г.М., Бубукин И.Т., Вдовин В.Ф., Горбунов Р.В., Зинченко И.И., Лапченко В.А., Носов В.И., Панкратов А.Л., Ракуть И.В. // АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ БЮЛЛЕТЕНЬ – 2018. – Т. 2018, том – № 3 – С.412–417.

109. Bubnov G.M. Consistent Determination of the Integral Humidity and Effective Optical Depth of the Atmosphere in the Millimeter Wavelength Range Using Wideband Radiometers / Bubnov G.M., Grigor'ev V.F., Zinchenko I.I., Zemlyanukha P.M., Il'in G.N., Kabanov D.M., Nosov V.I., Vdovin V.F. // Radiophysics and Quantum Electronics – 2020. – Т. 62 – № 12 – С.820–829.

110. Бубнов Г.М. Исследования астроклимата миллиметрового диапазона в республике Крым / Г. М. Бубнов, В. Ф. Вдовин, И. В. Ракуть, А. Л. Панкратов, А. Е. Вольвач, И. В. Бубукин, М. И. Агафонов, И. И. Зинченко – ВАК, 2017.

111. Bubnov G. Svalbard astroclimate research: Expedition and first results / Bubnov G., Vdovin V.F., Zemlyanukha P.M., Okunev V.S., Grigor'Yev V.F. // EPJ Web of Conferences – 2018. – Т. 195.

112. Artemenko Y.N. New stage of the Suffa Submm Observatory in Uzbekistan Project Gothenburg, Sweden, 2019. – 124с.

113. Вдовин В.Ф. Разработка и исследования характеристик микроволновых приемников для современных радиоастрономических проектов Москва, 2018. – 152–154с.

114. Bubnov G.M. A refined method of the data processing for astroclimate measurements in mm-waves Pasadena, CA, USA, 2018. – 164–168с.
115. Артеменко Ю.Н. Проекты развития микроволновых радиообсерваторий: РТ-70 Суффа, (Узбекистан) и 110-м радиотелескоп в Урумчи (Китай) Москва – 333с.
116. Vdovin V.F. et al Present status and future prospects of the radioobservatory at Plateau Suffa in Uzbekistan Tashkent, Uzbekistan, 2018.
117. Абашин Е.Б. Исследования терагерцового астроклимата в предгорьях вершины Мус-Хая и перспективы создания научного стационара в северо-восточной Якутии Нижний Новгород, 2013. – 117с.
118. Абашин Е.Б. Исследование атмосферного поглощения в мм диапазоне длин волн в восточной Якутии и центральной части России , 2013. – 68–70с.
119. Bubnov G.M. □Search for New Sites for THz Observations in Eurasia The 25th International Symposium on Space Terahertz Technology, 2014. – 76с.
120. Крупнов А.Ф. О возможности экспериментального наблюдения отдельных вращательных линий димера воды в равновесной газовой фазе / Крупнов А.Ф., Зобов П.Ф. // Оптика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 20 – № 9 – С.772–775.
121. Шанин В.Н. Автоматизированный резонаторный спектрометр миллиметрового диапазона для исследования малого поглощения в газах / Шанин В.Н., Доровских В.В., Третьяков М.Ю., Паршин В.В., Шкаев А.П. // Приборы и техника эксперимента – 2003. – Т. 46 – № 6 – С.79–85.
122. Parshin V. V. Modern Resonator Spectroscopy at Submillimeter Wavelengths / Parshin V. V., Tretyakov M.Y., Koshelev M.A., Serov E.A. // IEEE Sensors Journal – 2012. – Т. 13 – № 1 – С.18–23.
123. Серов Е.А. Лабораторное исследование континуального поглощения атмосферы в миллиметровом диапазоне длин волн / Серов Е.А. – 2013.
124. Исследование электромагнитных свойств материалов на ТГц волнах.
125. Kogelnik H. Laser Beams and Resonators / Kogelnik H., Li T. // Applied Optics, Vol. 5, Issue 10, pp. 1550-1567 – 1966. – Т. 5 – № 10 – С.1550–1567.
126. Вентура Г. Искусство криогеники / Г. Вентура, Л. Ризегари / под ред. Л.П. Межов-Деглин. – Долгопрудный: Издательский Дом “Интеллект,” 2011.– 336с.
127. Малков М.П. Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения. / М. П. Малков – , 2013. Вып. Рипол Клас– 417с.
128. Скурат В.Е. Изменение интегральной степени черноты фторполимерных материалов в условиях околоземного космического пространства / Скурат В.Е. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике – 2016. – Т. 17 – № 3.
129. Исаченко В.П. Теплопередача: учебное пособие для вузов / В. П. Исаченко, В. А.

Осипова, А. С. Сукомел – Энергия, 1981.– 439с.

130. Jensen J.E. Brookhaven national laboratory selected cryogenic data notebook / Jensen J.E., Tuttle W.A., Stewart R.B., Brechna H. // Brookhaven national laboratory selected cryogenic data notebook – 1980. – Т. II – С.10200–10200.

131. Serov E.A. Reflectivity of Metals in the Millimeter Wavelength Range at Cryogenic Temperatures / Serov E.A., Parshin V.V., Bubnov G.M. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques – 2016. – Т. 64 – № 11 – С.3828–3838.

132. Koshelev M.A. New Frontiers in Modern Resonator Spectroscopy / Koshelev M.A., Leonov I.I.I., Serov E.A., Chernova A.I., Balashov A.A., Bubnov G.M., Andriyanov A.F., Shkaev A.P., Parshin V. V., Krupnov A.F., Tretyakov M.Y. // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology – 2018. – Т. 8 – № 6 – С.773–783.

133. Krupnov A.F. Accurate broadband THz molecular spectroscopy / Krupnov A.F., Belov S.P., Tretyakov M.Y., Golubiatnikov G.Y., 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. // EPJ Web of Conferences – 2018. – Т. 195 – С.06005.

134. Леонов И.И. Повышение быстродействия резонаторного спектрометра миллиметрового - субмиллиметрового диапазона волн Нижний Новгород, 2016. – 113с.

135. Серов Е.А. Отражательная способность металлов в ММ диапазоне длин волн при криогенных температурах СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. – 317–321с.

136. Serov E.A. Cryogenic resonator spectrometer for satellite reflectivity investigation at millimeter and terahertz bands Moscow, 2014. – 37с.

137. Grigoriy B. Analysis of variations in factors of specific absorption of sub-terahertz waves in the earth ' s atmosphere / Grigoriy B., Tremblin P., Vdovin V., Baron P., Khaikin V., Tremblin P., Baron P. // Proc. of 2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC), to be published 2020. – 2020. – Т. 0 – № 1 – С.1–4.

138. University of Wyoming, Atmospheric soundings [Электронный ресурс]. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.

139. Бубнов Г.М. Измерения астроклимата на плато Суффа в 2015 году и перспективы на 2016 год , 2016. – 99с.

140. Bubnov G. Astroclimate measurements on several points over Eastern hemisphere in 2-mm and 3-millimeter atmospheric transparency windows using tipping radiometer [Электронный ресурс]. URL: <https://zenodo.org/record/4973548> (accessed: 19.06.2021).

141. Абашин Е.Б. Научный отчёт по НИР «Исследование астроклимата в коротковолновой части ММ диапазона длин волн в окрестностях обсерватории ПРАО АКЦ / Е. Б. Абашин, О. С. Большаков, Г. М. Бубнов, А. В. Вдовин, В. Ф. Вдовин, И. И. Галанин, С. Ю. Дрягин, И. В. Кузнецов, Ю. Ю. Куликов, В. И. Носов, В. В. Орешко – Нижний Новгород, 2013.– 25с.

142. Gubkin S.M. Experimental Investigations of the Astroclimatic Characteristics of the Elbrus Region / Gubkin S.M., Emaleev O.N., Lukin V.P., Mutnitskii N.G., Pokasov V. V. // Soviet Astronomy – 1983. – Т. 27 – С.456–459.

143. Tretyakov M.Y. Resonator spectroscopy of the atmosphere in the 350-500GHz range / Tretyakov M.Y., Koshelev M.A., Vilkov I.N., Parshin V. V., Serov E.A. // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer – 2013. – Т. 114 – С.109–121.

144. Миллиметррон [Электронный ресурс]. URL: <https://www.millimetron.ru/glavnaya> (accessed: 14.07.2021).

145. Trunin M.R. Surface impedance of HTSC single crystals in the microwave band / Trunin M.R. // Uspekhi Fizicheskikh Nauk – 1998. – Т. 168 – № 9 – С.931.

146. Parshin V. V. Terahertz Reflectivity of  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  at Cryogenic Temperatures / Parshin V. V., Serov E.A., Bubnov G.M., Vdovin V.F., Nikolenko A.S., Lesnov I. V., Gunbina A.A., Smirnov A. V., Malginov V.A., Dolzhenko D.E., Khokhlov D.R. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity – 2020. – Т. 30 – № 8 – С.1–5.

147. Lesnov I.V. Investigation of the influence of the location on the rate of Sub THz space communications channels / Lesnov I.V., Bubnov G.M., Vdovin V.F. // EPJ Web of Conferences – 2018. – Т. 195 – С.09004.

148. Вдовин В.Ф. Повышение производительности субтГц беспроводных каналов за счет использования криогенного охлаждения в приемниках и гиротронов в передатчиках, 2018. – 152–154с.

149. Bernardis P. de OLIMPO Mission: Development and Results of Stratospheric Polar Balloon Sub Terahertz Observatories Нижний Новгород, 2019. – 93с.

150. Bubnov G.M. Data rates of SubTHz wireless telecommunication channels / под ред. A.G. Litvak. , 2017. – 02012с.

151. де Бернардис П. Миссия олимпо - обсерватория на воздушном шаре и перспективы использования шпигбергера для субтГц Радиоастрономии ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, 2016. – 378с.

152. Леснов И.В. Разработка и исследования характеристик криогенных малошумящих приёмных устройств для радиоастрономии, аэрономии и телекоммуникаций Нижний Новгород, 2016. – 100с.

153. Третьяков М.Ю. К вопросу о континуальном поглощении миллиметровых-субмиллиметровых волн атмосферным водяным паром. Иркутск, 2014. – 92–95с.

154. XVIII международная научно-техническая конференция. ИСТ– 2012. Секция криогенной наноэлектроники. С.8 Электронное издание, Формат CD. г. Н.Новгород, 18-20 апреля 2012.

155. X Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых

волн Н. Новгород, 26.02 – 01.03.2013, с. 117-.

156. Бубнов Г.М. Исследования астроклимата мм диапазона на архипелаге Шпицберген: первые результаты и особенности летнего периода Москва: ИРЭ им. Котельникова РАН, 2018. – 285–289с.

157. Леснов И.В. Проблемы дальней космической связи и криогенные Малошумящие приемники Москва: ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, 2016. – 373–377с.

158. Bolshakov O. Cryovacuum Tests of Materials & Systems for Millimetron mission Björkliden, Kiruna, Sweden: Chalmers, 2013. – 5с.

159. Абашин А. Проблемы физики и методики измерений характеристик наноструктур при субкельвинных температурах Нижний Новгород: ННГУ им. Лобачевского, 2013.

160. Abashin A. Electromagnetic and Thermal Performances Measurements of Components and Materials of Cryogenic Space Telescope Millimetron Alyeska Resort in Girdwood, 2013.