

# Многолетние измерения спектров нисходящего радиотеплового излучения атмосферы в диапазоне 18-27,2 ГГц

Смирнов М.Т., Аквилонова А.Б.

ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН

# Цель работы

- Получение ряда экспериментальных данных о спектрах радиоярких температур нисходящего излучения атмосферы для статистического анализа и отработки методик применения результатов измерений в различных задачах
- Анализ качества полученных данных

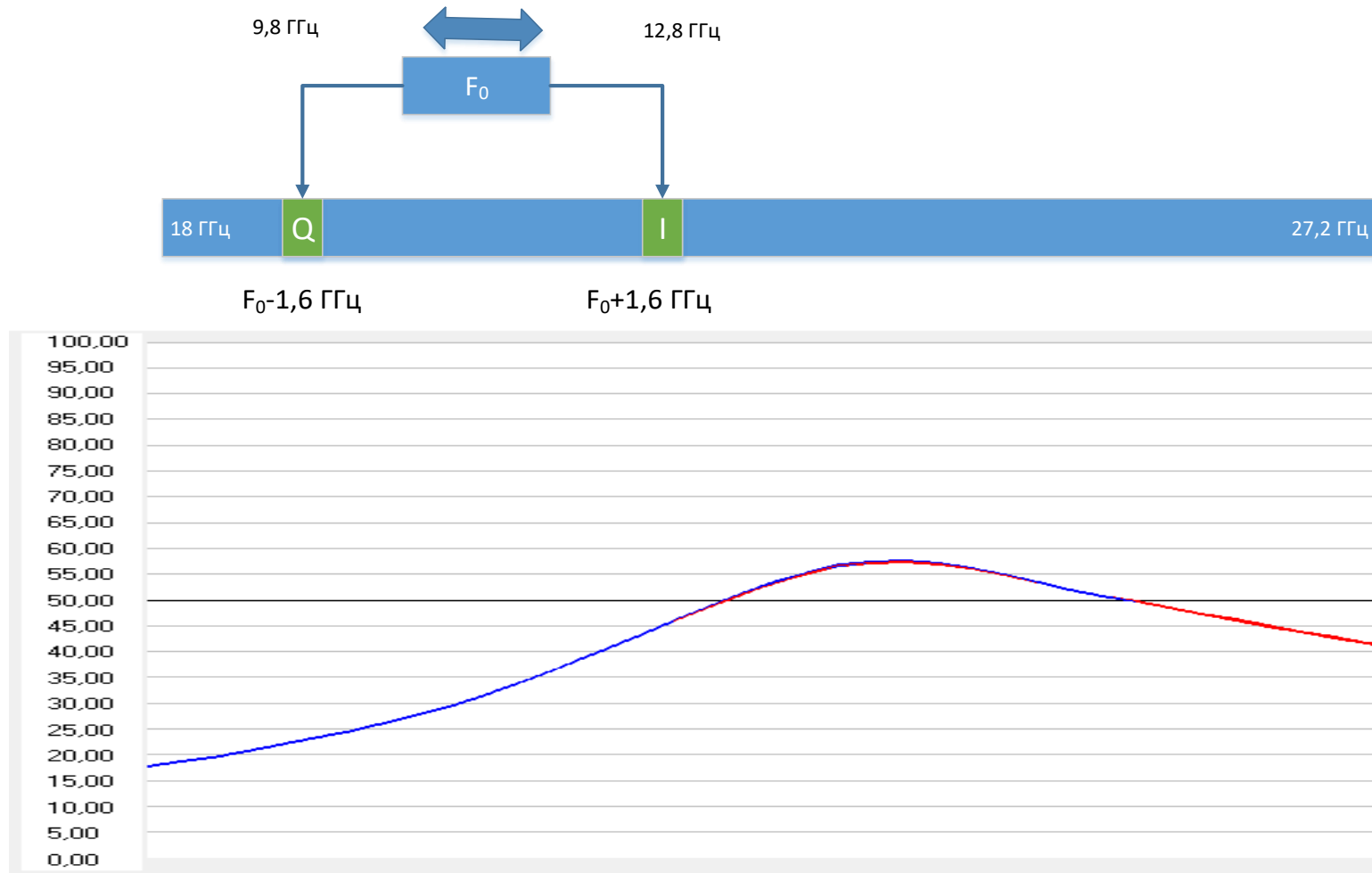
# Экспериментальная установка

## СВЧ радиометр-спектрометр Р22М

- Установлен в комнате, окно которой закрыто лавсановой радиопрозрачной пленкой
- По программе с компьютера можно проводить измерения на различных частотах в диапазоне 18-27,2 ГГц с шагом 0,2 ГГц
- Возможно изменение углов наблюдения в диапазоне 50-85° от зенита, основной угол наблюдения 51°
- Управление вращением радиометра производится с компьютера

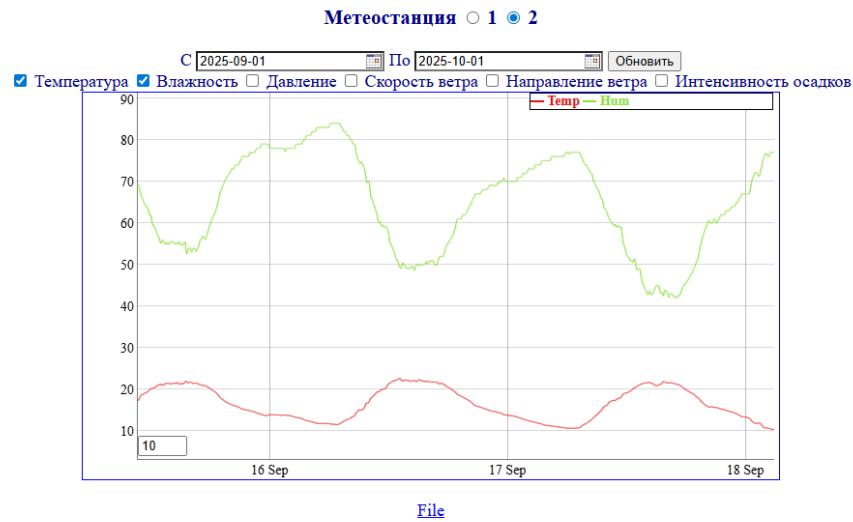


# Особенности работы СВЧ радиометра-спектрометра Р22М



# Сопутствующие измерения

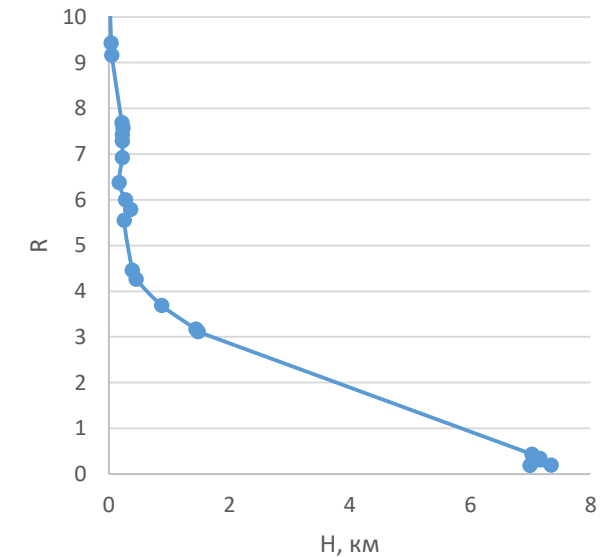
## Метеостанция



## Видеокамера

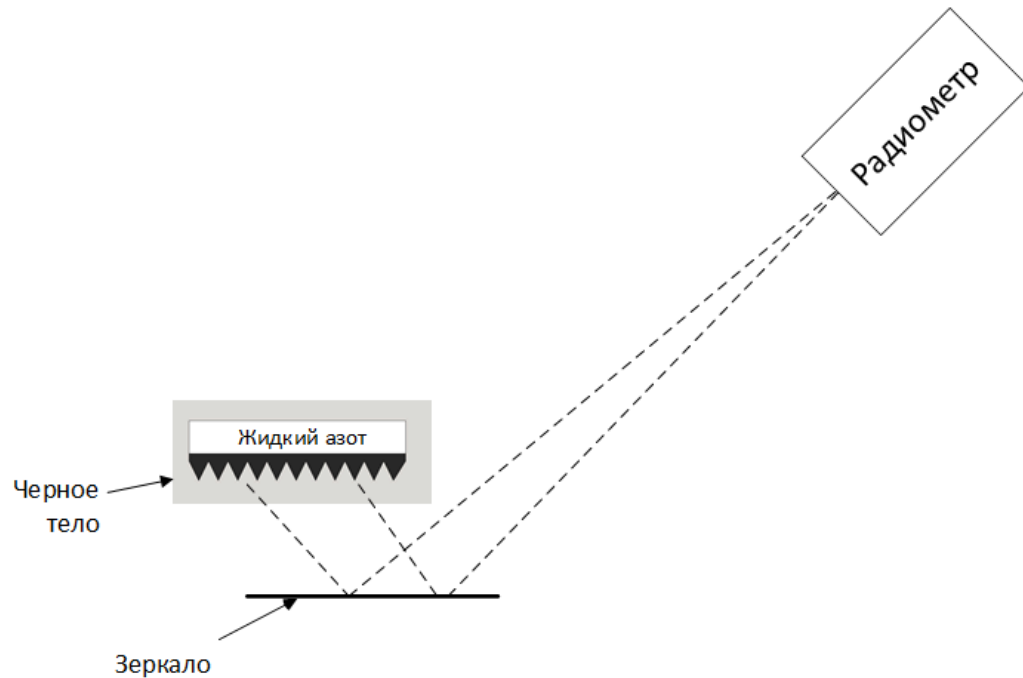


## Радиозондовые измерения



Долгопрудный

# Калибровка измерений



Калибровка производится по излучению черного тела при комнатной температуре и при охлаждении жидким азотом.

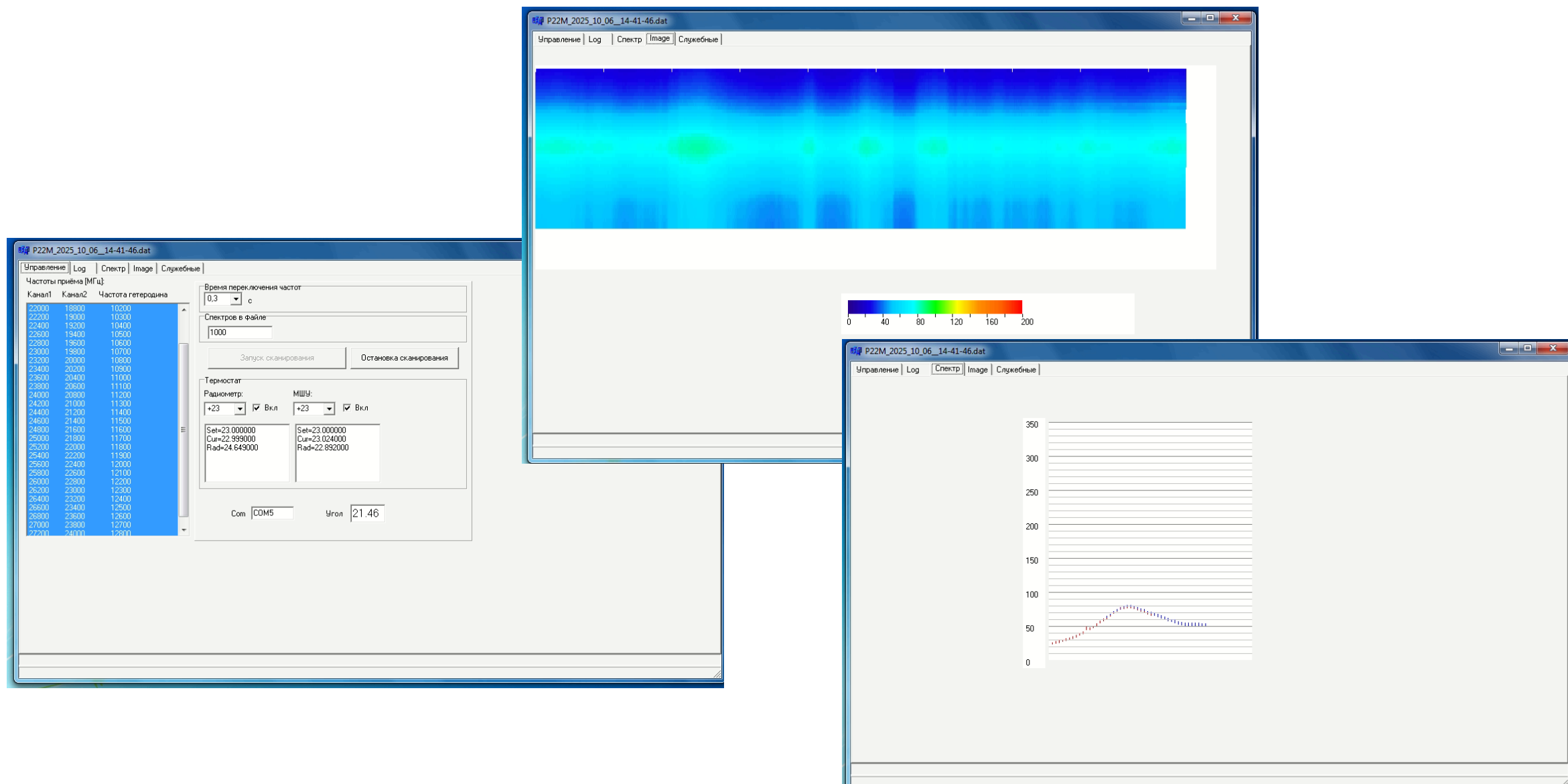
Черное тело помещено в радиопрозрачную пенополистироловую коробку и имеет тепловой контакт с нижней стороной контейнера для жидкого азота.

Расстояние от антенны до черного тела составляет примерно 1,5 м. Размер его 40x40 см.

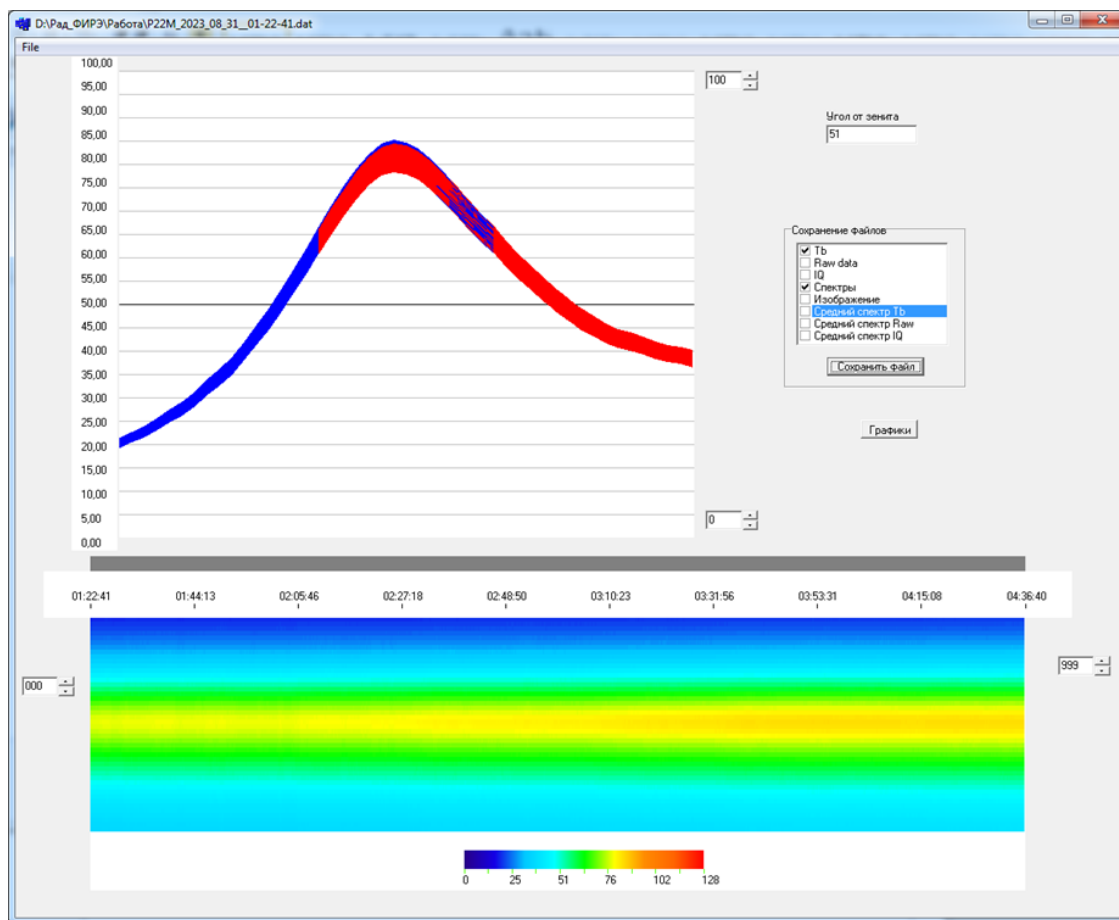
На черном теле расположены контактные датчики температуры.

На каждой частоте вычисляются коэффициенты выражения  $T_b = a + b \cdot u$

# Интерфейс программы управления



# Интерфейс предварительной программы обработки



Программа предварительной обработки данных позволяет:

- ✓ перевести отсчеты сигналов единицы радиоярких температур
- ✓ визуализировать результаты в виде графиков спектров и изображений радиоярких температур в пространстве частота-время
- ✓ выделить фрагмент измерений на заданный интервал времени
- ✓ сохранить результаты в различных форматах для дальнейшей обработки

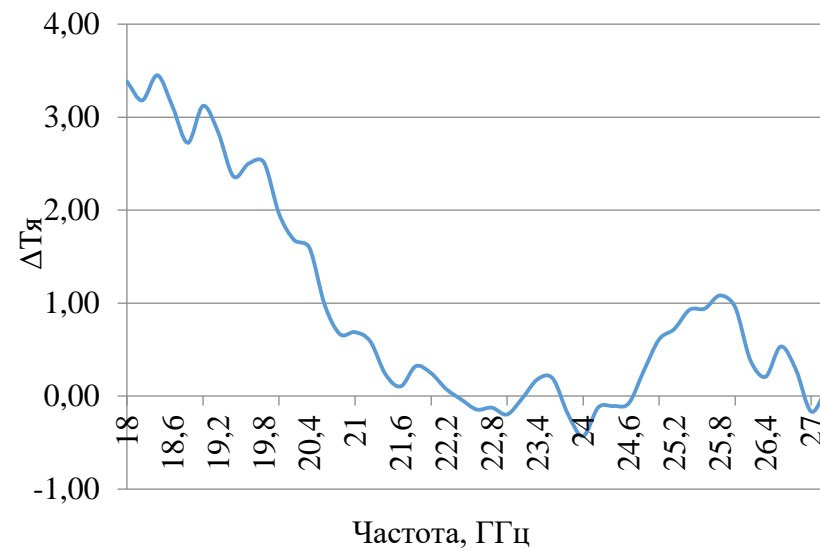


# Полученные ряды данных

- Экспериментальная установка работает с 2017 г. по настоящее время в автоматическом режиме круглосуточно с небольшими перерывами на время проведения экспедиционных работ и технического обслуживания аппаратуры
- В основном режиме измерения проводятся под углом  $51^\circ$  от надира сеансами по 1000 спектров. Время измерения 1 спектра примерно 12 с. Все результаты измерений автоматически передаются на сервер
- К настоящему времени получено около 50 ГБ СВЧ радиометрических данных
- Изображения с видеокамеры снимаются с интервалом в 30 с и записываются в виде видеофайлов
- В базе данных хранятся метеоданные за весь период измерений

# Разность экспериментальных и расчетных значений радиоярких температур безоблачной атмосферы

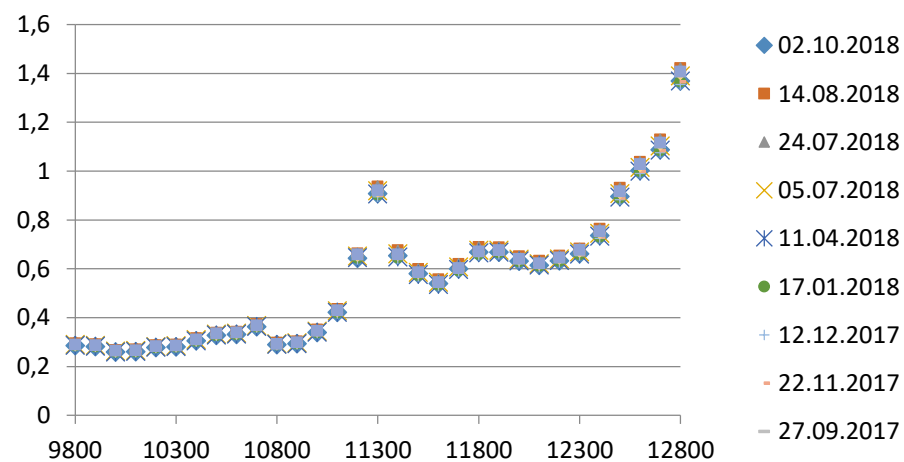
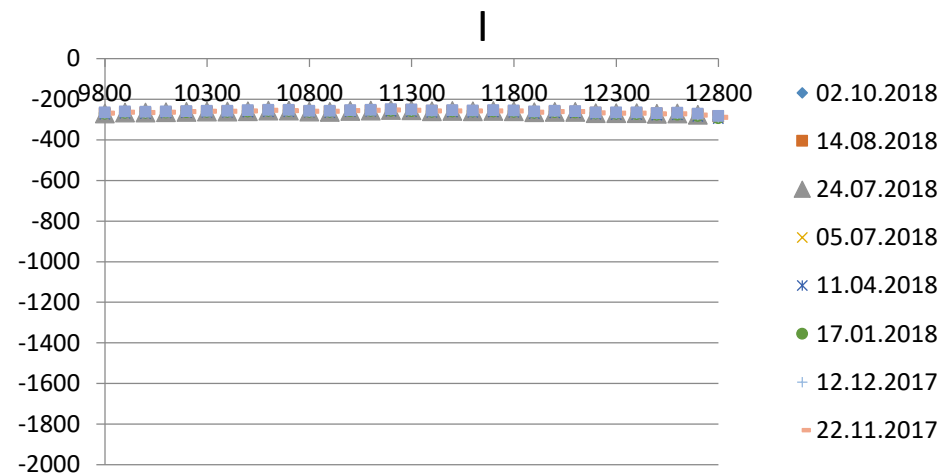
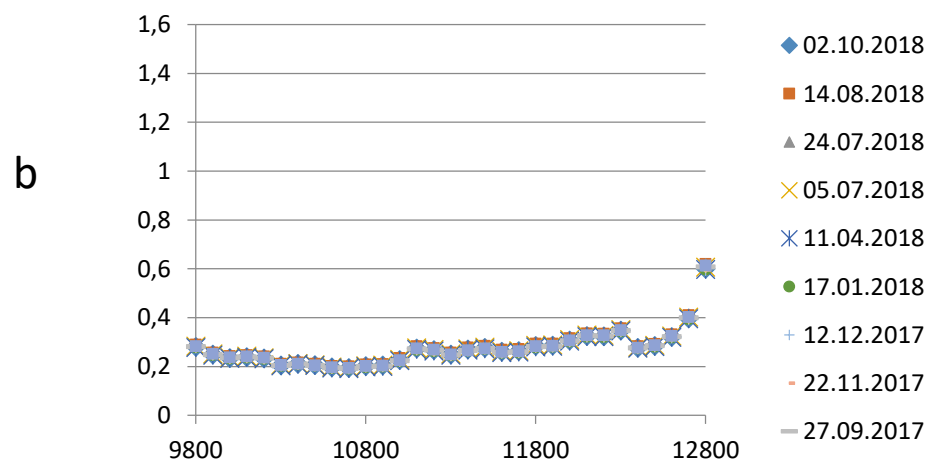
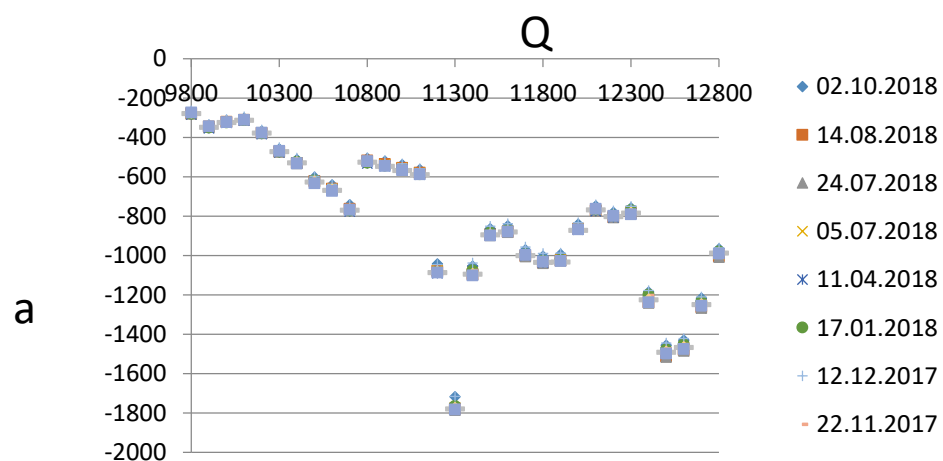
2023



2024

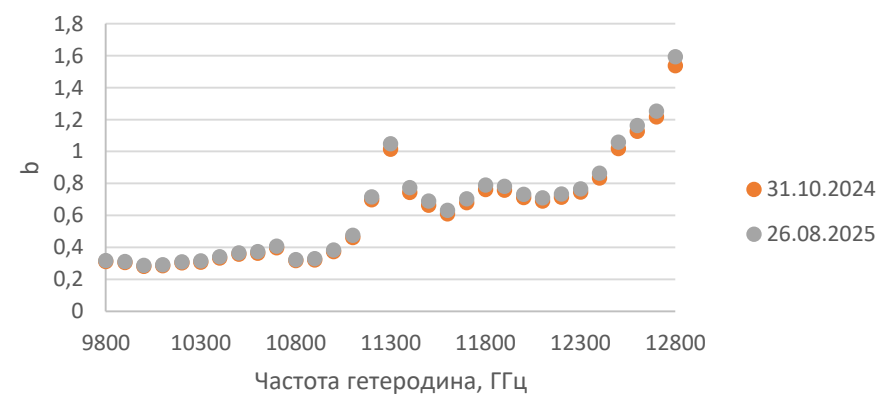
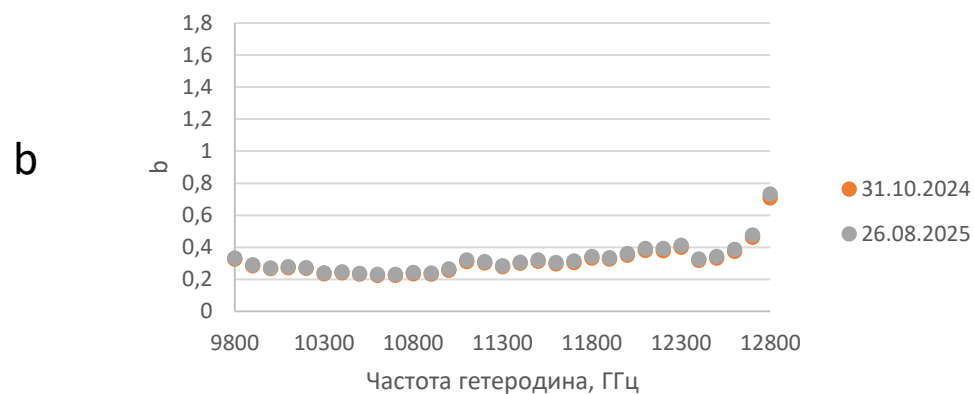
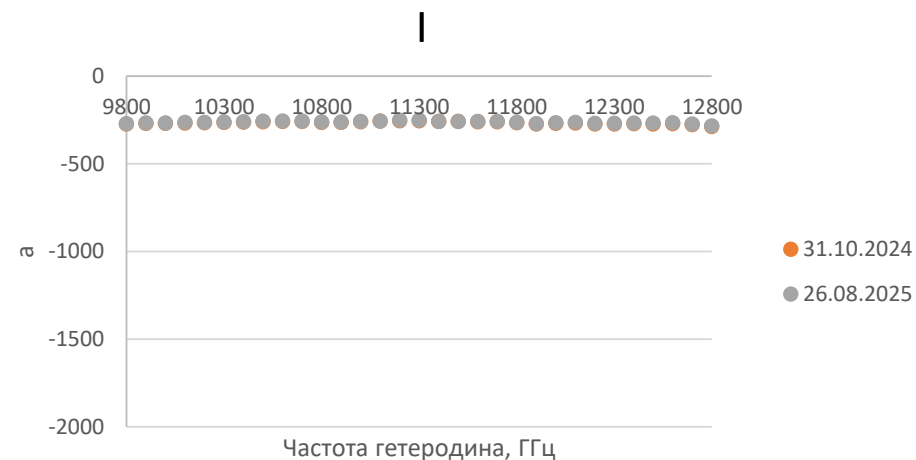
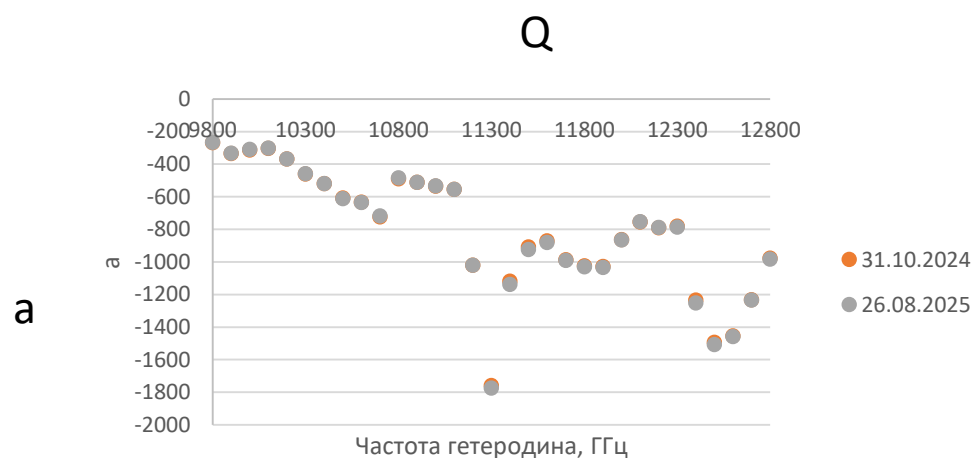


# Стабильность работы радиометра 2017-2018



$$T_b = a + bu$$

# Стабильность работы радиометра 2024-2025

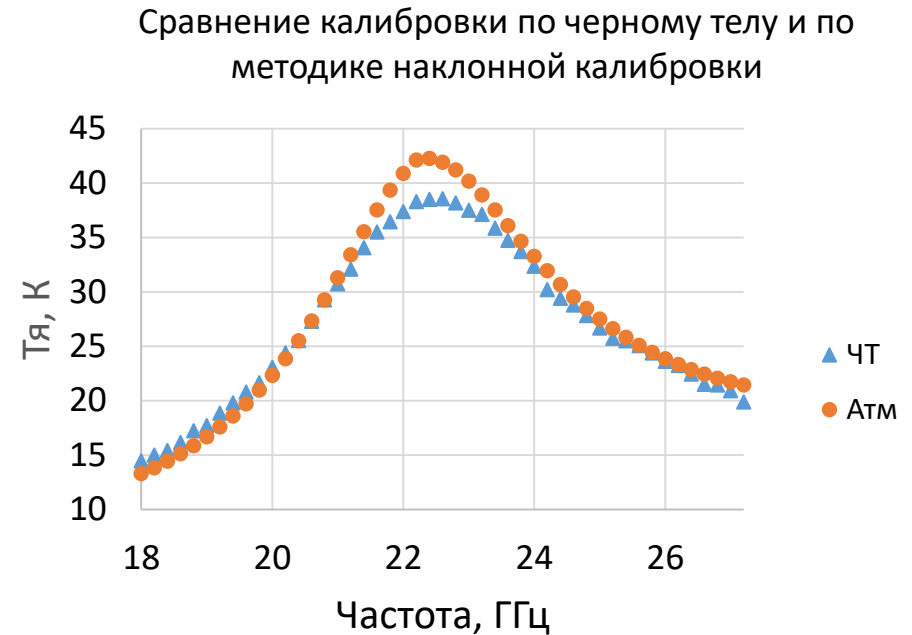


$$T_b = a + bu$$

# Погрешности калибровки

## Источники погрешностей

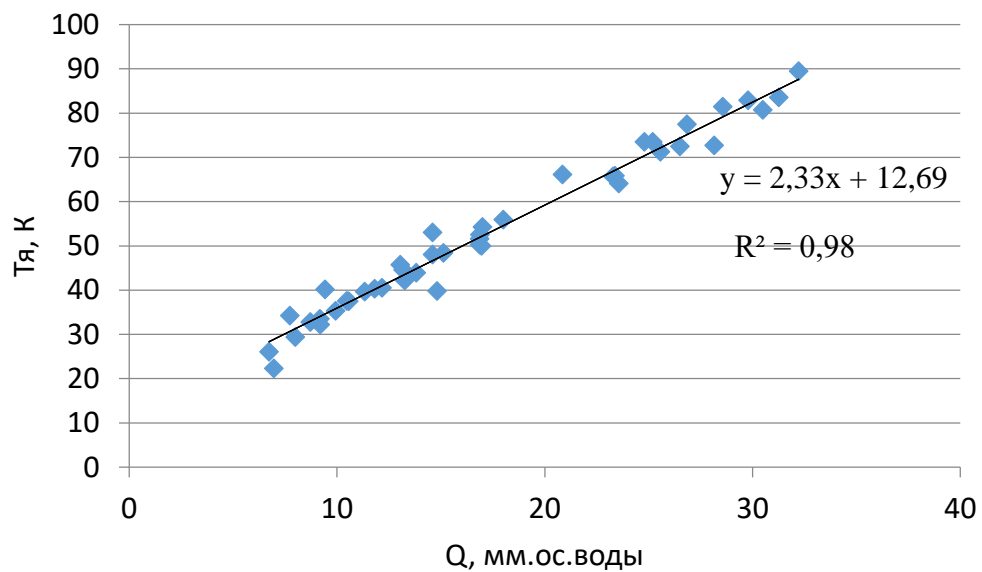
- Неполное заполнение апертуры черным телом
- Излучение окружающей среды через боковые лепестки
- Неопределенность коэффициента излучения черного тела
- Погрешности измерений физической температуры черного тела



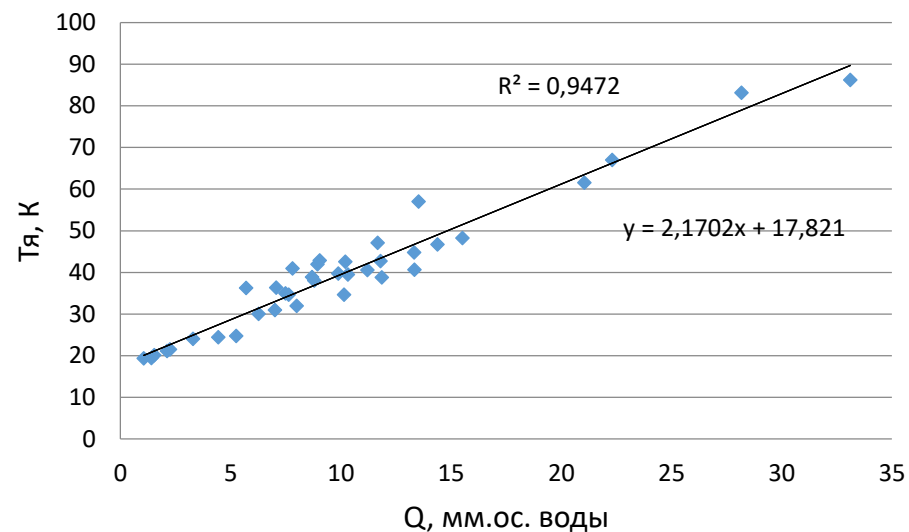
Сазонов Д. С. и др. Метод наклонной калибровки радиометрического приёмника в натурных условиях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 4. С. 40–50

# Зависимость $T_{я}$ от интегрального влажносодержания на частоте 22,2 ГГц

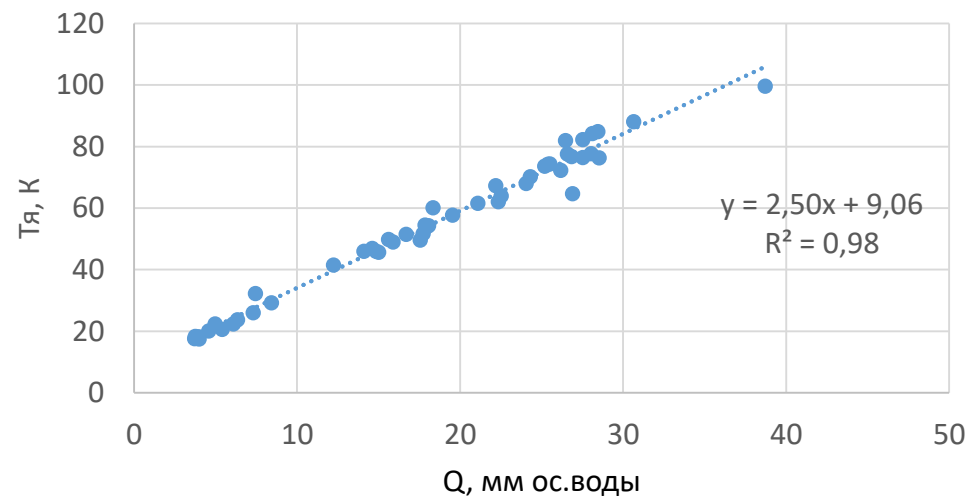
2023



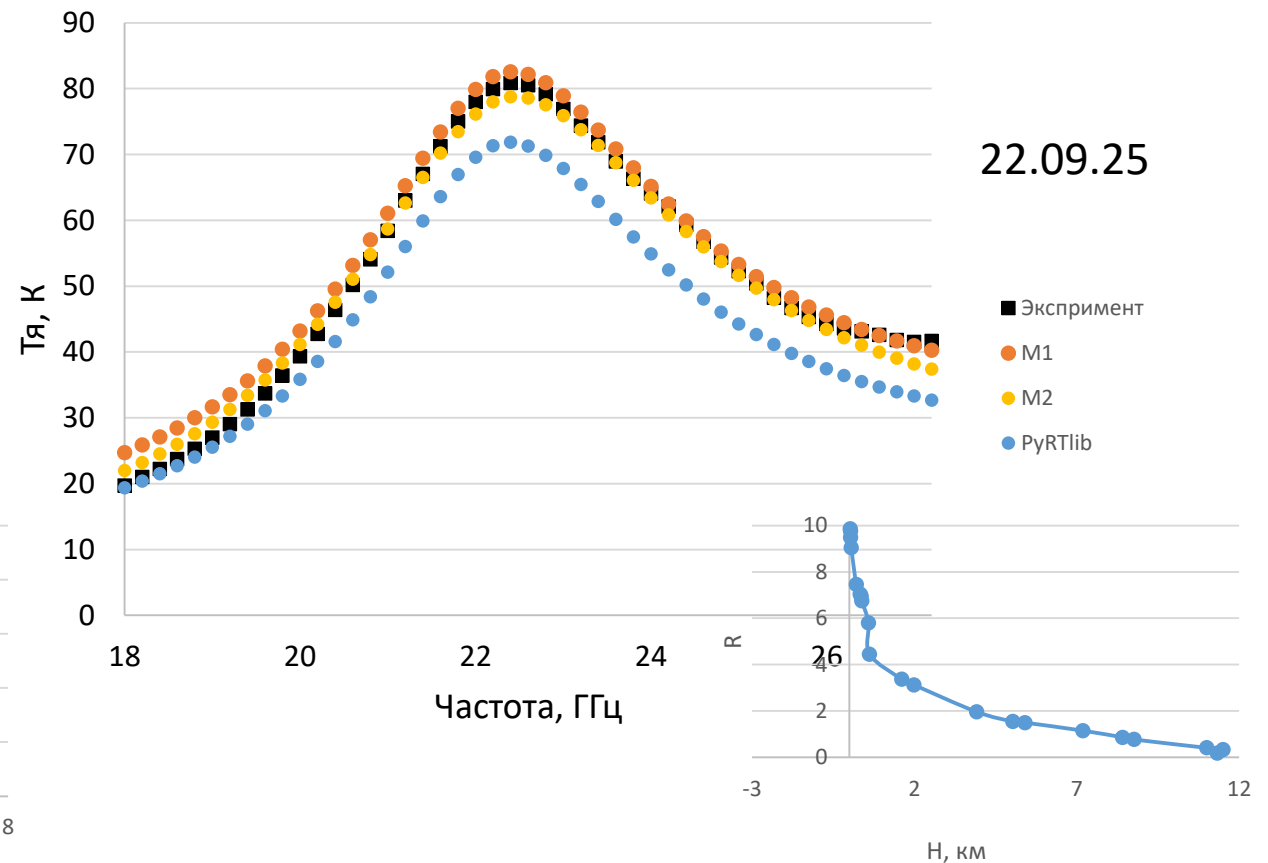
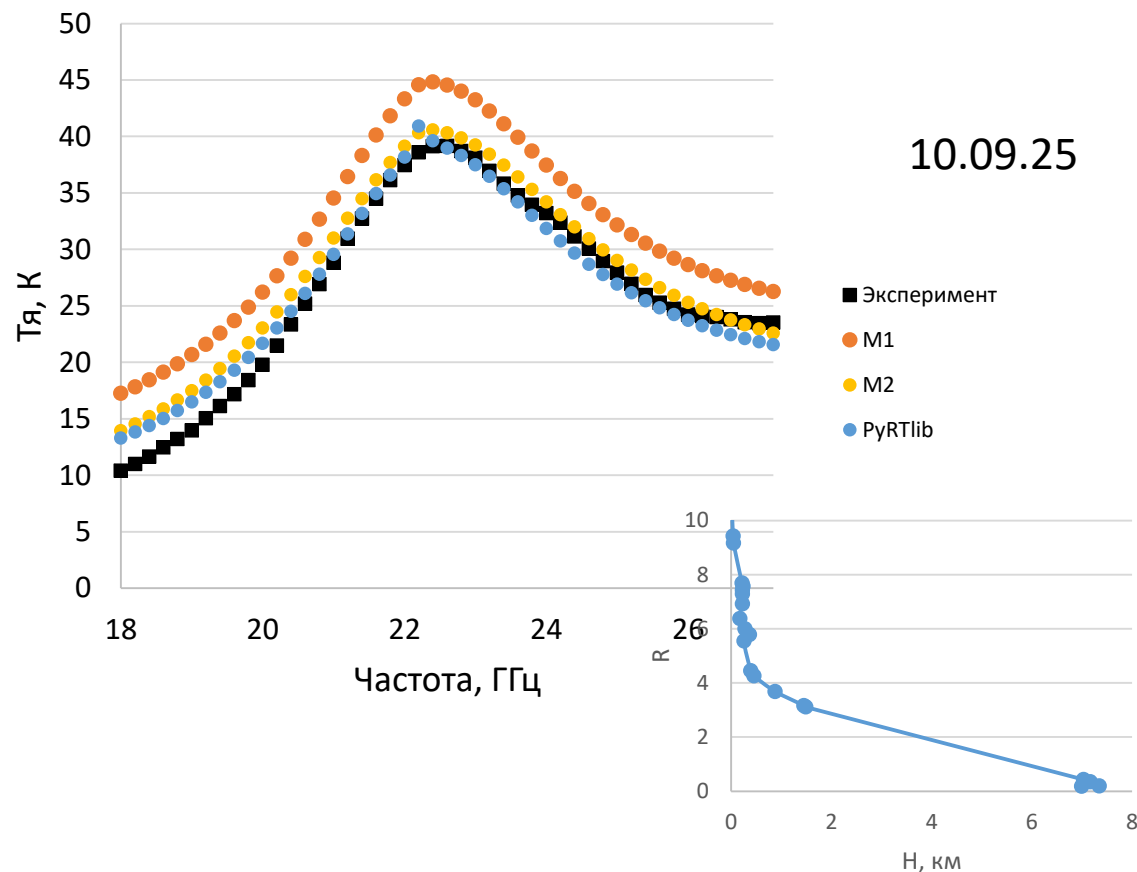
2021



2024



# Погрешности моделей излучения



## M1 – “Баррет-Чанг”

Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. – Москва, ЛЕНАНД, 2015

## M2 – рекомендации международного союза электросвязи (ITU-R)

[https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/RREC-P.676-3-199708-S!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/RREC-P.676-3-199708-S!!PDF-E.pdf)

## PyRTlib – суммирование линий

S. Larosa, Cimini D. et al. PyRTlib: an educational Python-based library for non-scattering atmospheric microwave radiative transfer computations. // Geoscientific Model Development, 2024. 17. 2053-2076. 10.5194/gmd-17-2053-2024.

# Использование данных

- Пашинов Е. В. Восстановление трёхмерных полей тропосферного водяного пара по данным многочастотных дистанционных радиометрических измерений // Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, Москва, 2021
- Егоров Д.П. Пространственные неоднородности атмосферы и учет их влияния при СВЧ-радиометрическом зондировании Земли из космоса// Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, Москва, 2024
- **Экспериментальные данные доступны пользователям по запросу**



# Основные результаты

- В результате эксперимента накоплен большой ряд измерений нисходящего радиотеплового излучения атмосферы
- Получены средние отклонения экспериментальных и расчетных данных по радиозондам для безоблачной атмосферы
- Проанализированы основные источники этих отклонений, обусловленные погрешностями калибровки радиометра и неточности моделей
- Сравнение экспериментальных и расчётных данных по нескольким моделям показало, что модели дают различные значения в зависимости от метеоусловий