О сопоставлении СВЧ-радиометрических измерений нисходящего излучения безоблачной атмосферы в диапазоне 18–27,2 ГГц с модельными расчётами по данным радиозондов

А. Б. Аквилонова [1], М. Т. Смирнов [1], Б. Г. Кутуза [2]

[1] *Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязино, Московская обл., 141190, Россия*
E-mail: anna@fireras.su

[2] *Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН Москва, 125009, Россия*
E-mail: kutuza@cplire.ru

Проведено сопоставление результатов наземных спектральных СВЧ-радиометрических измерений излучения безоблачной атмосферы в области линии поглощения водяного пара с расчётами яркостной температуры, вычисленной по радиозондовым данным ближайшей метеостанции. Измерения проводились при помощи СВЧ-радиометра-спектрометра Р22М в диапазоне 18,0–27,2 ГГц на территории Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН (г. Фрязино). Данные радиозондирования использовались с ближайшей метеостанции «Долгопрудная», расположенной на расстоянии примерно 40 км от г. Фрязино. Анализ показал, что совпадение/несовпадение экспериментальных данных и расчётных по радиозондам зависит от направления потоков воздуха в месте как проведения СВЧ-радиометрических измерений, так и запуска радиозондов. Лучшее совпадение наблюдается при устойчивой антициклональной ситуации. Получены средние отклонения расчётных и экспериментальных данных за 2023 и 2024 гг. Наибольшие расхождения между экспериментальными и расчётными данными наблюдаются на низкочастотном склоне линии. Анализируются возможные причины этой разности, обусловленные ошибками калибровки и погрешностями используемых моделей, а также синоптической обстановки и направления движения воздушных масс. Проведено сравнение результатов измерений с расчётами по трём моделям излучения. Показано, что все они дают разный результат в зависимости от конкретных профилей температуры и влажности атмосферы.

Ключевые слова: СВЧ-радиометрия, радиояркостная температура, влажность атмосферы

Одобрена к печати: 08.12.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-87-99

Введение

Существуют два метода определения высотного распределения влажности в атмосфере: радиозондовый и сверхвысокочастотный (СВЧ) радиометрический. Оба метода обладают преимуществами и недостатками. Радиозонд позволяет контактно с высокой точностью измерять влажность в приземном слое воздуха. Однако на высотах более 3–5 км точность его измерения резко падает и показания прибора под действием ветра могут сместиться от места запуска зонда. Основной недостаток радиозондовых измерений в том, что они выполняются всего лишь два раза в сутки. Сверхвысокочастотный радиометрический метод позволяет проводить непрерывные измерения радиоизлучения атмосферы в течение длительного времени и обладает высокой чувствительностью к временной изменчивости поля влажности. Недостатком его является необходимость постоянной калибровки, учёта ошибок измерения яркостной температуры и неточностей модельных представлений. Инструментальные и методические ошибки влияют на точность восстановления высотного распределения влажности при решении обратной задачи.

Наземные СВЧ-радиометрические измерения в диапазоне миллиметровых и коротких сантиметровых волн по изучению земной атмосферы проводятся начиная с 60-х гг. прошлого века. При этом измерения, как правило, осуществляются на отдельных конкретных частотах.

Обзоры этих работ можно найти, например, в публикациях (Аквилонова и др., 2022; Березин и др., 2016; Караваев, Щукин, 2015; Askne, Westwater, 1986).

Для валидации результатов СВЧ-радиометрических измерений их сравнивают с радиозондовыми данными. При этом это сравнение осуществляется либо по интегральному влагосодержанию атмосферы Q (Быков и др., 2020; Гурвич и др., 1972; Плечков, 1969; Плечков и др., 1970), либо в виде высотных профилей влажности (Березин и др., 2016; Askne, Westwater, 1986; Cimini et al., 2002, 2003; Skoog et al., 1982; Xu et al., 2015). В некоторых работах сопоставляется непосредственно яркостная температура излучения атмосферы $T_я$ с расчётными значениями $T_я$ по радиозондовым данным (Cimini et al., 2003). Есть исследования, в которых на основе сравнения СВЧ-радиометрических и радиозондовых данных проводится анализ используемых радиационных моделей при восстановлении параметров атмосферы по наземным измерениям (Belikovich et al., 2022).

С середины 2017 г. на территории Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН (ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН) (г. Фрязино Московской обл.) осуществляются непрерывные измерения радиоизлучения атмосферы с помощью СВЧ-радиометра-спектрометра Р22М, работающего в диапазоне частот 18,0–27,2 ГГц. За это время накоплен обширный материал, позволяющий исследовать изменчивость пространственно-временных характеристик радиоизлучения как безоблачной, так и облачной атмосферы. Подробное описание аппаратуры, методики измерений, их результаты, анализ экспериментальных данных при различных ситуациях состояния атмосферы приведены в публикациях (Аквилонова и др., 2022; Смирнов и др., 2017).

Цель настоящей работы — сопоставление измеренной яркостной температуры $T_я$ в пределах всей линии поглощения водяного пара 1,35 см (в диапазоне частот 18–27 ГГц) с рассчитанными значениями $T_я$ по радиозондовым данным, что позволит выявить спектральные особенности расхождения между экспериментальными значениями $T_я$ и рассчитанными по данным радиозондирования. Анализ и выявленные причины расхождения между радиозондовыми и СВЧ-радиометрическими данными могут быть использованы для уточнения геофизических моделей и развития СВЧ-радиометрического метода измерения атмосферы, включая выбор частотных каналов измерений.

Экспериментальная установка и сопутствующая информация

Экспериментальная установка ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН для проведения измерений характеристик атмосферы включает:

- СВЧ-радиометр-спектрометр Р22М;
- две метеостанции Vantage Pro2, расположенные на расстоянии порядка 300 м;
- видеокамеру HI3516C для визуальной фиксации метеоусловий.

Прибор Р22М разработан и изготовлен в АО «Конструкторское бюро радиотехники и электроники» (в прошлом Федеральное государственное унитарное предприятие «Специальное конструкторское бюро Института радиотехники и электроники РАН») для проведения лабораторных экспериментов и представляет собой СВЧ-радиометр с возможностью перестройки частоты приёма с полосой 200 МГц в пределах рабочего диапазона 18,0–27,2 ГГц.

Его основные характеристики следующие:

- рабочий диапазон частот от 18,0 до 27,2 ГГц;
- спектральное разрешение 200 МГц;
- всего частот 47;
- для ускорения измеряется излучение одновременно на двух частотах со сдвигом 3,2 ГГц;
- время получения полного спектра (при времени интегрирования 0,3 с) ~11 с;
- чувствительность приёмника 0,02 К в полосе частот 200 МГц;
- стабильность поддержания температуры ключевых элементов 0,002 К.

Управление измерениями осуществляется с компьютера и позволяет изменять время накопления сигнала и частоты приёма с шагом 200 МГц по произвольному закону.

Измерения проводятся через окно, закрытое радиопрозрачной лавсановой плёнкой. Измерения выполняются круглосуточно. За сеанс регистрируется 1000 спектров, длительность одного сеанса составляет примерно 3 ч. За сутки осуществляются 7–8 сеансов.

Сверхвысокочастотный радиометр Р22М установлен на поворотном устройстве. В основном режиме наблюдения ведутся под углом 51° от зенита.

Общий вид СВЧ-радиометра Р22М с системой калибровки представлен на *рис. 1.*

Рис. 1. Общий вид СВЧ-радиометра Р22М с системой калибровки

Калибровка радиометра проводится периодически по излучению чёрного тела при двух значениях температуры (примерно 290 и 85 К). Для калибровки радиометр поворачивается так, чтобы диаграмма направленности его антенны была направлена на зеркало и принималось излучение чёрного тела. Схема этих измерений приведена на *рис. 2.* Сначала измеряется излучение чёрного тела при комнатной температуре (первый уровень излучения), затем в специальный контейнер сверху чёрного тела заливается жидкий азот и после охлаждения измеряется второй уровень излучения.

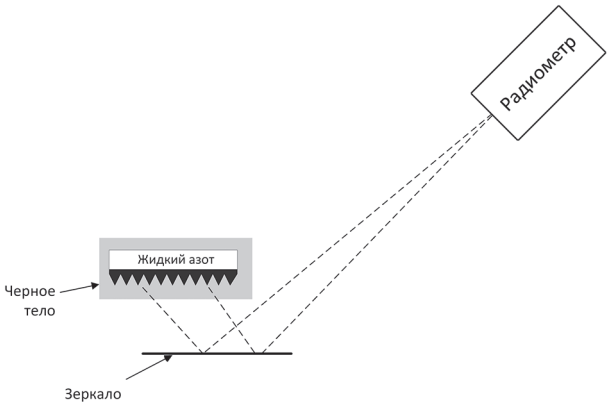


Рис. 2. Схема калибровки радиометра по чёрному телу

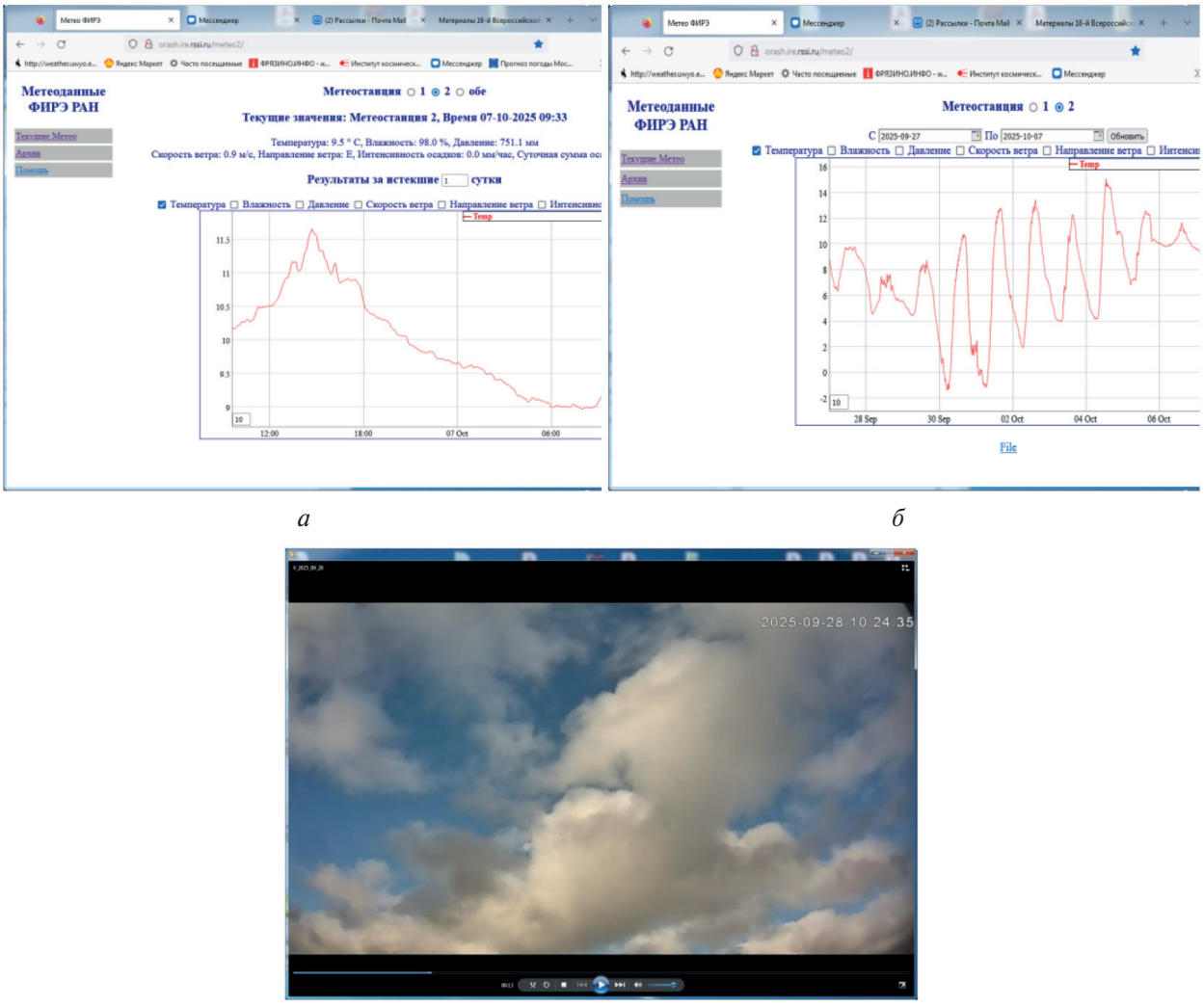
Чёрное тело с контейнером для азота находится в теплоизолирующей коробке из пенополистирола. Физическая температура чёрного тела измеряется при помощи контактных датчиков, расположенных внутри него. Размер чёрного тела составляет 40×40 см и полностью перекрывает главный лепесток диаграммы направленности. Уровень боковых лепестков диаграммы направленности антенны не превышает 30 дБ, и при эксплуатации внутри помещения, где температура окружающей среды изменяется не более чем на 10–20 К в течение года, вклад излучения через них можно считать практически не изменяющимся.

Благодаря поддержанию температуры ключевых элементов радиометра с высокой точностью (порядка 0,002 К) его усиление и опорный уровень меняются медленно. Опыт эксплуатации прибора показал, что для обеспечения абсолютной точности измерений порядка 1 К, калибровку можно проводить примерно один раз в месяц.

Для интерпретации СВЧ-радиометрических измерений регулярно собираются результаты метеонаблюдений с двух расположенных на расстоянии порядка 300 м метеостанций

Vantage Pro2 и проводится фотофиксация метеоусловий наблюдений при помощи видеокамеры HI3516C. Метеостанции измеряют температуру и относительную влажность воздуха, атмосферное давление, скорость и направление ветра, интенсивность и сумму осадков. Все данные хранятся в архиве, к которому есть открытый доступ.

На *рис. 3* приведён пример визуализации сопутствующей информации.



а *б*

в

Рис. 3. Пример визуализации сопутствующей информации: *а* — временной ход интересуемого параметра (например, температуры) на текущую дату измерений; *б* — архивные данные параметра за интересуемый период; *в* — данные видео камеры о метеоусловиях в районе СВЧ-радиометрических измерений на текущую или заданную дату

В качестве дополнительной информации использовались синоптические карты с сайта Гидрометцентра РФ (https://meteoinfo.ru/mapsynop). Полезная информация имеется также на сайте компании Windy.com. В частности, по ней можно просмотреть профили температуры и влажности и отследить траекторию полёта радиозонда для конкретно выбранной станции.

Особенности обработки данных для сопоставления

Первичная обработка данных с целью калибровки и визуализации результатов проводилась при помощи специально созданной программы. Интерфейс программы обработки приведён на *рис. 4* (см. с. 91).

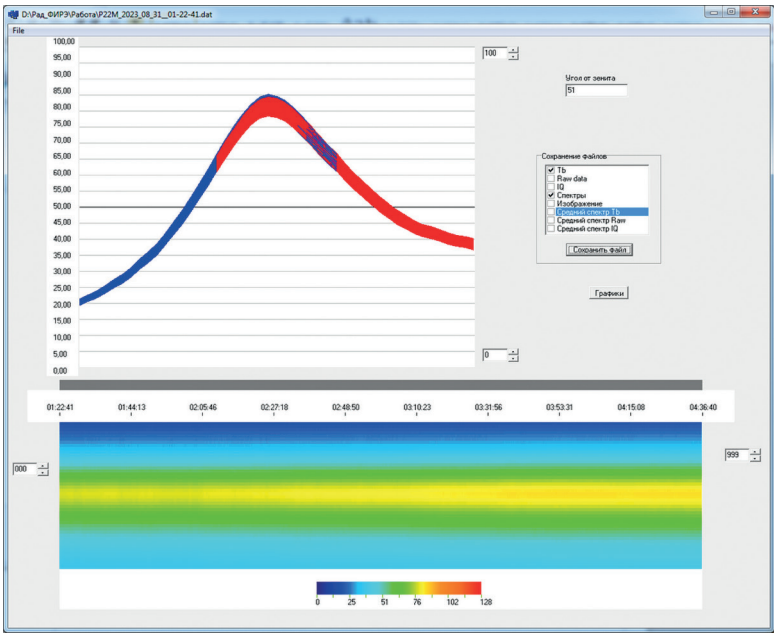


Рис. 4. Интерфейс программы первичной обработки СВЧ-радиометрических данных (сеанс P22M_2023_08_31__01-22-41)

В верхней части рисунка строятся спектры яркостной температуры. По вертикальной оси — $T_я$, К; по горизонтальной оси — частота, ГГц. В нижней части приведены эти же данные, но в виде изображения в пространстве «частота – время». Здесь по вертикальной оси — частота, ГГц; по горизонтальной — текущее время. Яркостная температура кодируется псевдоцветом.

Результаты первичной обработки могут быть записаны в файлы различного формата и временной длительности, определяемой интерактивно. Формат файла выбирается исходя из потребностей дальнейшей обработки.

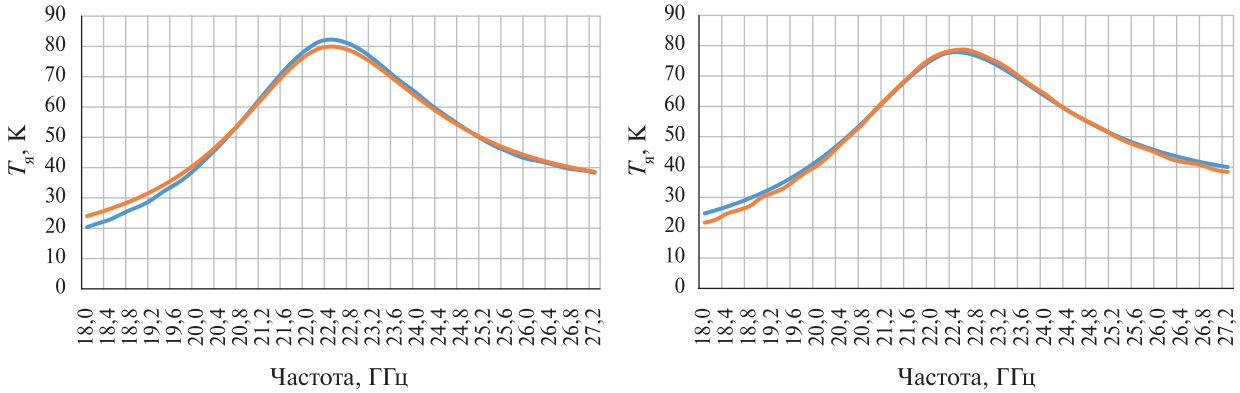
В настоящей работе сопоставление СВЧ-радиометрических и радиозондовых данных осуществлялось для безоблачной атмосферы. Анализ выполнен для данных, полученных с марта по сентябрь 2023 г. (всего сеансов 52) и с февраля по сентябрь 2024 г. (всего сеансов 49). Результаты измерений для безоблачной атмосферы за 2021 г. и их анализ приведены в работе (Аквилонова и др., 2022).

Для сопоставления СВЧ-радиометрических измерений нисходящего излучения атмосферы с модельными расчётами использовались радиозондовые данные с сайта Вайоминг-ского университета (*англ.* University of Wyoming) (http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.shtml) для аэрологической станции «Центральная аэрологическая обсерватория» (ЦАО) 27713 «Долгопрудная», которая находится примерно в 40 км от г. Фрязино. Для сравнения данных результаты СВЧ-радиометрических измерений усреднялись за 15–20-мин интервал вблизи времени запуска радиозондов. Анализ данных осуществлялся для сеансов с интегральным влагосодержанием Q не ниже 10 кг/м^2. Расчёт яркостной температуры по радиозондовым данным для получения статистических характеристик расхождений модельных и экспериментальных данных выполнялся главным образом по модели из работы (Кутуза и др., 2015). Обсуждения отличий расчётов по разным моделям приведены ниже.

Результаты сопоставления экспериментальных и расчётных данных

На *рис. 5* (см. с. 92) представлены примеры сопоставления результатов измерений спектров нисходящего излучения и расчётов по модели, описанной в работе (Кутуза и др., 2015): для фрагмента сеанса, приведённого на *рис. 4*, близкого по времени с измерениями радиозонда

(см. *рис. 5а*); для фрагмента сеанса, выполненного уже через год (в 2024 г.) для близкой даты (см. *рис. 5б*). Из рисунков видно достаточно хорошее совпадение результатов. Основные различия в большинстве сеансов наблюдаются в центре линии и низкочастотной области спектра.



а *б*

Рис. 5. Сравнение спектров радиояркостной температуры: *а* — 31.08.2023, 03:00 МСК (московское время), $Q = 28{,}57$ кг/м^2; *б* — 28.08.2024, 03:00 МСК, $Q = 28{,}04$ кг/м^2 (красная линия — экспериментальные данные, синяя — расчёт по данным радиозонда)

Среди отобранных файлов СВЧ-измерений не все из них показывали согласие с рассчитанными по радиозондовым данным, что иллюстрирует *рис. 6.* Такая ситуация, как оказалось, может быть связана с тем, что направление полёта радиозонда соответствовало противоположному направлению от СВЧ-радиометрических измерений. При этом направление приземного ветра может не совпадать с направлением движения радиозонда. Так, например, на *рис. 7* (см. с. 93) видно, что радиозонд улетел на юг относительно точки наших измерений. При этом, согласно синоптической карте (*рис. 8*, см. с. 93), к Московскому региону приближается холодный фронт, т. е. происходит изменение атмосферной ситуации.

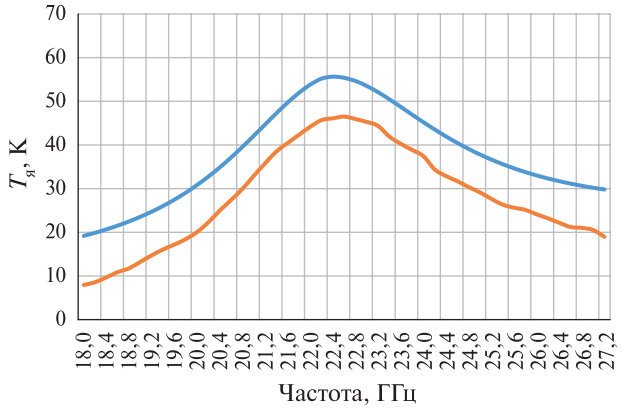


Рис. 6. Сравнение спектров радиояркостной температуры (26.07.2024, 03:00 МСК, $Q = 17{,}95$ кг/м^2) (красная линия — экспериментальные данные, синяя — расчёт по данным радиозонда)

Для безоблачных сеансов посчитано среднее значение разности между измеренной радиояркостной температурой $T_{я\,изм}$ и расчётной по радиозондовым данным $T_{я\,рз}$. На *рис. 9* (см. с. 94) приведена частотная зависимость средней разности $\Delta T_я = T_{я\,рз} - T_{я\,изм}$ для 2023 г., а на *рис. 10* (см. с. 94) — для 2024 г. Вертикальными линиями указаны вариации $\Delta T_я$ по спектру.

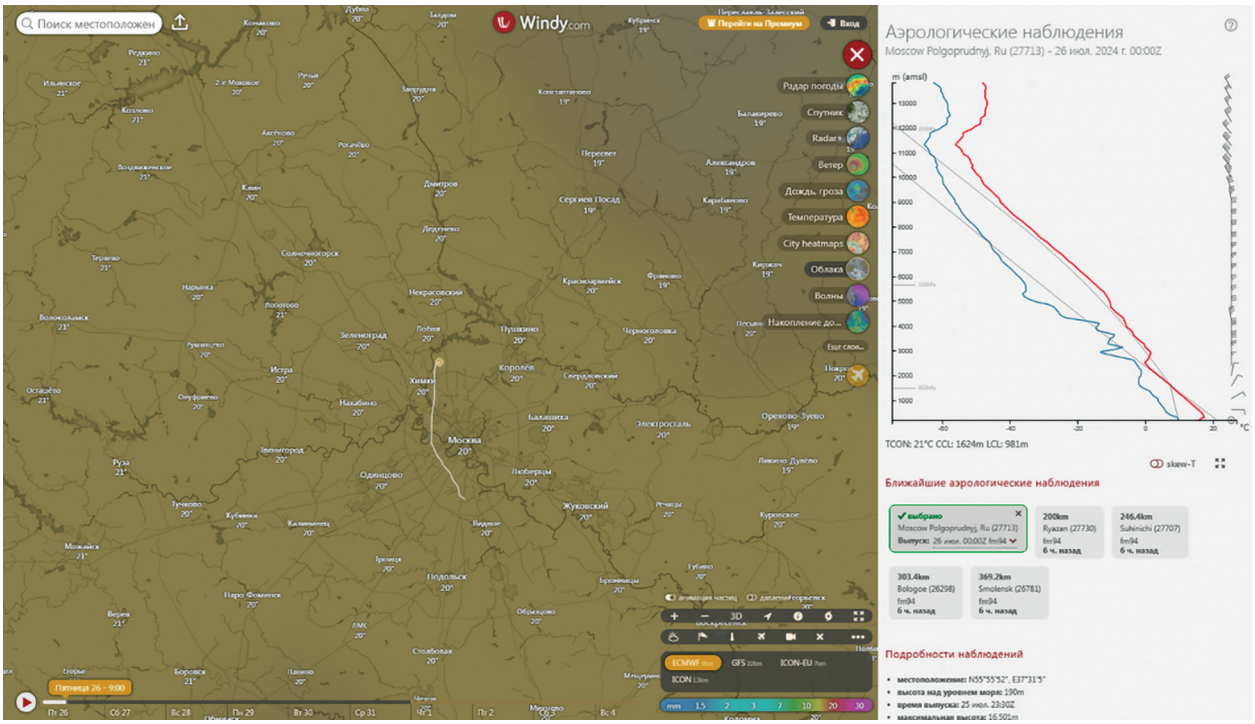


Рис. 7. Данные веб-сервиса Windy.com о траектории полёта радиозонда (на карте) и профилях температуры и влажности для станции «Долгопрудная»

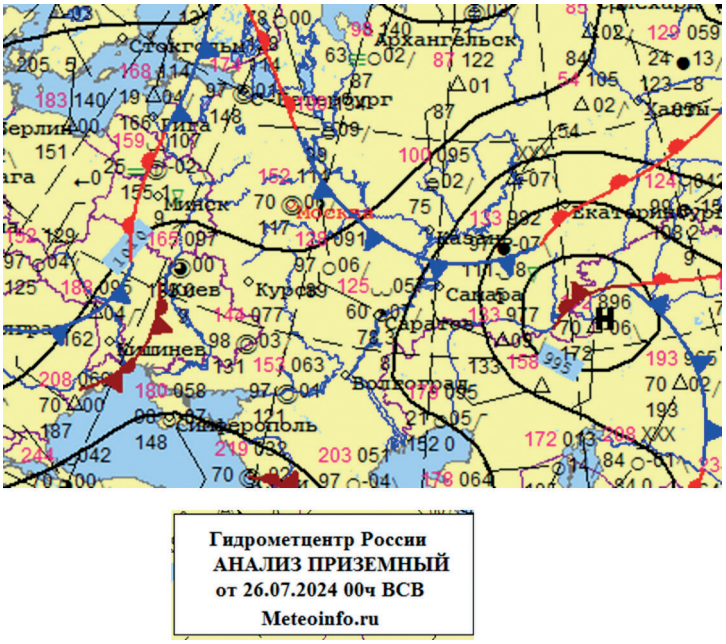


Рис. 8. Синоптическая карта Гидрометцентра России на 26.07.2024

На графиках видно, что наибольшее расхождение между $T_{\text{я рз}}$ и $T_{\text{я изм}}$, превышающее 1 K, наблюдается на низкочастотном склоне линии. При этом в 2024 г. вариации $\Delta T_{\text{я}}$ были меньше, чем в 2023 г. Из общего количества сеансов с безоблачной атмосферой хорошее совпадение (меньше 1 K) показали: 2023 г. — 18 сеансов (из общего количества 52), 2024 г. — 22 сеанса (из общего количества 49). Наибольшие отличия наблюдались при неустойчивой метеорологической ситуации и несоответствии направления движения радиозонда относительно места измерений.

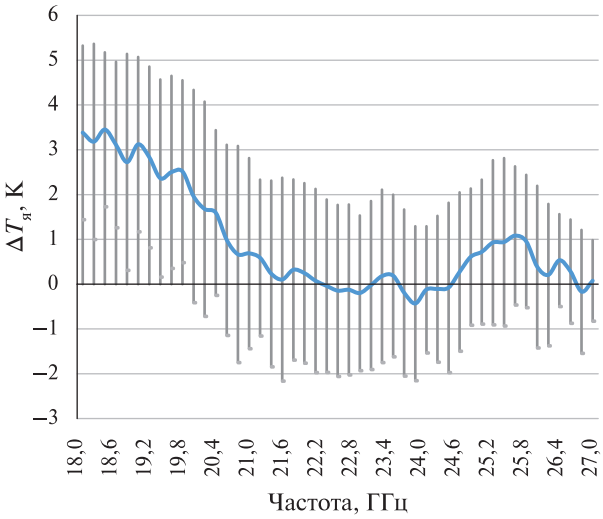


Рис. 9. Зависимость $\Delta T_я$ от частоты за период 05.04–29.09.2023 (голубая линия — средние значения)

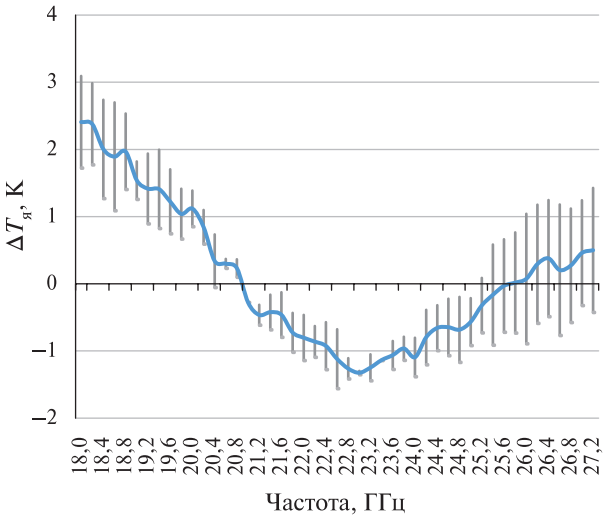


Рис. 10. Зависимость $\Delta T_я$ от частоты за период 21.06–18.09.2024 (голубая линия — средние значения)

Анализ причин расхождения измеренных и расчётных значений радиояркостной температуры

Основными причинами спектральной зависимости расхождения между $T_{я\,рз}$ и $T_{я\,изм}$, наблюдаемой на *рис. 9* и *10*, могут быть технические проблемы калибровки и неточность используемой модели излучения атмосферы.

Следует отметить ещё один фактор, а именно: сами радиозондовые данные так же имеют погрешности (Фридзон, Ермошенко, 2009). На основе многолетних метрологических исследований, проведённых в ЦАО, были вычислены величины как составляющих (систематических и случайных), так и суммарных погрешностей измерений температуры и влажности при радиозондировании на аэрологической сети Росгидромета. Эти погрешности оказались значительными как по температуре, так и по влажности, а при измерении влажности выше 5–7 км просто неприемлемы. Авторы работы делают заключение, что поскольку эти выводы были сделаны на основе того, что средние величины систематических составляющих погрешностей измерений температуры и влажности характеризуют смещение результатов, получаемых системой радиозондирования как типом, то они не могут применяться в качестве поправок при конкретных выпусках радиозондов. В исследовании (Островский, Фридзон, 2008) авторы предполагают: для проведения сравнений дистанционных методов измерений с данными, полученными в результате радиозондирования, необходимо использовать специально подготовленные и проверенные радиозонды.

Смещение среднего значения $\Delta T_я$ между 2023 г. и 2024 г. может быть связано с изменением методики калибровки посредством уточнения направления визирования чёрного тела. Ошибки калибровки вероятно обусловлены тем, что температура чёрного тела при охлаждении жидким азотом по измерениям контактными датчиками достигает значений только около 85 K, тогда как радиояркостная температура атмосферы находится существенно ниже. При этом возникают погрешности линейной экстраполяции результатов.

Для оценки качества используемой нами калибровки было проведено сравнение результатов при использовании чёрного тела и независимого метода наклонной калибровки (Сазонов и др., 2025). Данный метод основан на измерениях радиотеплового излучения атмосферы под несколькими углами и последующего поиска «холодной точки». Этот метод применим для малой оптической толщины атмосферы и предполагает линейную зависимость измеряемой радиояркостной температуры от косинуса угла наблюдения. На *рис. 11* (см. с. 95) приведён пример сравнения результатов калибровки по двум методикам.

Основные различия наблюдаются в области центра линии поглощения, где применение наклонной калибровки не совсем корректно из-за возможной нелинейности задачи. В низкочастотной области измеренного спектра, где наблюдаются максимальные $\Delta T_{я}$ (см. *рис. 9*, *10*), результаты калибровки достаточно хорошо совпадают. Разность значений радиояркостной температуры при этом на частоте 18 ГГц составляет 1,2 К.

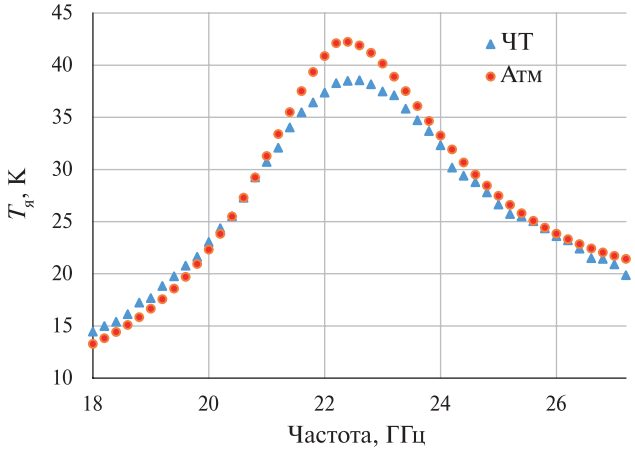
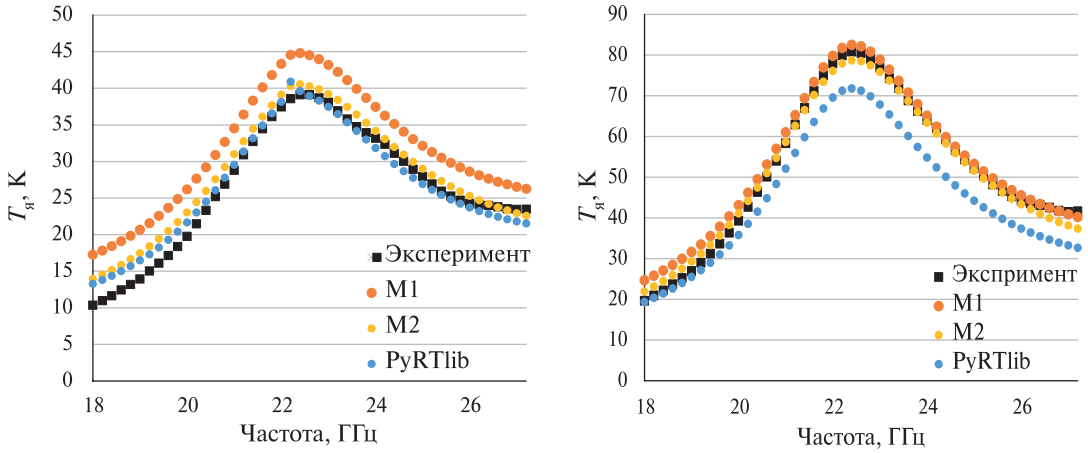


Рис. 11. Измеренные спектры излучения атмосферы при использовании двух типов калибровки (синие треугольники — калибровка по чёрному телу (ЧТ), красные кружки — метод наклонной калибровки (Атм), данные за 26.05.2025)

В литературе имеется много различных моделей, описывающих спектр радиотеплового излучения атмосферы. Основной вклад в излучение атмосферы (около 99 %) дают водяной пар и кислород. На *рис. 12* представлены характерные примеры сравнения экспериментальных и модельных спектров радиояркостной температуры.



а *б*

Рис. 12. Сравнение экспериментальных данных и расчётов по трём моделям: *а* — 10.09.2025; *б* — 22.09.2025

Модель M1, часто называемая моделью Баррета—Чанга, основана на аппроксимации экспериментальных данных по поглощению радиоволн в водяном паре (Кутуза и др., 2015). Поглощение в кислороде рассчитывается путём суммирования вклада ближайших линий поглощения.

Модель M2 основана на рекомендациях Международного союза электросвязи ITU (*англ.* International Telegraph Union) ITU-R (*англ.* ITU Radiocommunication Sector) (https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-3-199708-S!!PDF-E.pdf), в которых описывается метод приблизительной оценки мгновенного значения затухания в атмосферных газах на наклонных трассах, относимого к кислороду и водяному пару, для радиоволн в диапазоне частот от 1 до 350 ГГц.

Модель, отмеченная на *рис. 12* как PyRTlib (Larosa et al., 2024), представляет собой не просто алгоритм, а библиотеку на языке Python, позволяющую автоматически запросить данные радиозондов с сайта Вайомингского университета и вычислить радияркостную температуру на заданной частоте и угле наблюдения. Библиотека основана на алгоритме MPM (Liebe, 1989) с последующими уточнениями на основе спектроскопических измерений и позволяет суммировать вклады линий поглощения атмосферными газами.

Сравнение результатов обработки измерений с расчётами по имеющимся моделям показало, что они дают разный результат в зависимости от конкретных профилей температуры и влажности атмосферы и качества данных с радиозондов. Так, для измерений 10.09.2025 (см. *рис. 12а*) расчёты по модели M1 дают превышение радияркостной температуры на 5–7 K, тогда как расчёты по моделям M2 и PyRTlib достаточно хорошо совпадают с экспериментальными данными в центре линии и немного расходятся в низкочастотной области. Тогда как для сеанса за 22.09.2025 (на рис. *12б*) наблюдается хорошее совпадение с расчётами по моделям M1 и M2, но сильное занижение (до 10 K) для модели PyRTlib. Анализ причин различий результатов расчётов на приведённых рисунках показал, что одним из факторов, приводящих к ним, становится малое количество уровней, на которых проведены измерения с радиозонда 22.09.2025 (см. *рис. 12б*), и, как следствие, недостаточность информации о реальном профиле температуры и влажности. Выбор адекватной модели для интерпретации результатов измерений и последующего использования при решении обратных задач требует дальнейшего исследования.

Заключение

В работе приведены результаты непрерывных СВЧ-радиометрических измерений радиоизлучения безоблачной атмосферы на территории ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН (г. Фрязино, Московская обл.) с помощью СВЧ-радиометра-спектрометра Р22М, работающего в диапазоне частот 18,0–27,2 ГГц (линия поглощения водяного пара $\lambda \approx 1{,}35$ см). Эти результаты были сопоставлены с расчётными значениями $T_{я\,рз}$ по данным радиозондирования атмосферы на аэрологической станции ЦАО 27713 «Долгопрудная», которая находится примерно в 40 км от г. Фрязино. Сопоставление было выполнено для данных, полученных с марта по сентябрь 2023 г. (всего сеансов 52) и с февраля по сентябрь 2024 г. (всего сеансов 49) в пределах всего диапазона частот 18–27,2 ГГц. Для сравнения данных результаты СВЧ-радиометрических измерений усреднялись за 15–20-мин интервал вблизи времени запуска радиозондов.

Анализ сопоставления экспериментальных СВЧ-радиометрических данных и модельных расчётов по радиозондовым данным показал, что совпадение/несовпадение экспериментальных и расчётных данных зависит от направления потоков воздуха в атмосфере в месте как проведения СВЧ-радиометрических измерений, так и запуска радиозондов. Лучшее совпадение наблюдается при устойчивой антициклональной ситуации. Основные различия отмечаются в центре линии и низкочастотной области спектра, при этом наибольшие расхождения, превышающие 1 K, обнаруживаются на низкочастотном склоне линии. Характер частотной зависимости расхождения $T_{я\,изм}$ и $T_{я\,рз}$ и в 2023, и в 2024 г. сохранился. Однако наблюдается некоторое смещение, которое может быть связано с изменением методики калибровки.

Систематическая разность экспериментальных и расчётных данных может быть обусловлена как систематическими ошибками калибровки, так и погрешностями используемых моделей. Сопоставление с независимой методикой калибровки продемонстрировало, что

разница значений радиояркостной температуры при этом не превышает 1,2 K в низкочастотной области спектра.

Сравнение результатов обработки измерений с расчётами по имеющимся моделям показало, что они дают разный результат в зависимости от конкретных профилей температуры и влажности атмосферы. Выбор адекватной модели для интерпретации результатов измерений и последующего использования при решении обратных задач требует дальнейшего исследования.

Работа выполнена по государственному заданию ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН № 075-00395-25-00.

Литература

1. *Аквилонова А. Б.*, *Егоров Д. П.*, *Кутуза Б. Г.*, *Смирнов М. Т.* Изучение характеристик облачной атмосферы по результатам измерений спектров ее нисходящего СВЧ излучения в области резонансного поглощения водяного пара 18,0–27,2 ГГц // Метеорология и гидрология. 2022. № 12. С. 66–77. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-12-66-77.
2. *Березин Е.А*, *Тимофеев Ю. М.*, *Виролайнен Я. А.*, *Волкова К. А.* Сравнение наземных микроволновых измерений общего содержания водяного пара с радиозондовыми данными // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 1. С. 56–63. DOI: 10.15372/AOO20160107.
3. *Быков В. Ю.*, *Ильин Г. Н.*, *Караваев Д. М.*, *Щукин Г. Г.* СВЧ радиометрические измерения содержания парообразной и жидкокапельной влаги в тропосфере // Тр. Военно-косм. акад. им. А. Ф. Можайского. 2020. Вып. 567. С. 128–132.
4. *Гурвич А. С.*, *Ершов А. Т.*, *Наумов А. П.*, *Плечков В. М.* Исследование влагосодержания атмосферы методом наземной радиотеплолокации // Метеорология и гидрология. 1972. № 5. С. 22–27.
5. *Караваев Д. М.*, *Щукин Г. Г.* Современное состояние и перспективы применения микроволновой радиометрии атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 12. С. 1122–1127. DOI: 10.15372/AOO20151210.
6. *Кутуза Б. Г.*, *Данилычев М. В.*, *Яковлев О. И.* Спутниковый мониторинг Земли: микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: Изд-во ЛЕНАНД, 2015. 335 с.
7. *Островский Е. В.*, *Фридзон М. Б.* Надежность и достоверность определения общего влагосодержания дистанционными методами при их сопоставлении с данными стандартного радиозондирования атмосферы // Научный вестн. МГТУ ГА. Сер. Радиофизика и радиотехника. 2008. № 133. С. 40–44.
8. *Плечков В. М.* Корреляция между радиометрическими и аэрологическими данными о содержании паров воды в атмосфере // Физика атмосферы и океана. 1969. Т. 5. № 9. С. 970–972.
9. *Плечков В. М.*, *Гурвич А. С.*, *Снопков В. Г.* Экспериментальные исследования интегрального содержания водяного пара над океаном при радиометрических измерениях теплового излучения атмосферы с корабля // Докл. Акад. наук СССР. Геофизика. 1970. Т. 193. № 5. С. 1041–1043.
10. *Сазонов Д. С.*, *Садовский И. Н.*, *Пашинов Е. В.*, *Кузьмин А. В.* Метод наклонной калибровки радиометрического приёмника в натурных условиях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 4. С. 40–50. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-40-50.
11. *Смирнов М. Т.*, *Саворский В. П.*, *Маречек С. В.*, *Турыгин С. Ю.* Спектральные измерения нисходящего радиотеплового излучения атмосферы в диапазоне 18–27 ГГц // Материалы Всероссийской науч. конф. «7-е Всероссийские Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». Муром: Изд-во Полигр. центр МИ ВлГУ, 2017. С. 175–179.
12. *Фридзон М.Б*, *Ермошенко Ю. М.* Радиозондирование атмосферы // Мир измерений. 2009. № 7. С. 17–21.
13. *Askne J. I. H.*, *Westwater E. R.* A review of ground-based remote sensing of temperature and moisture by passive microwave radiometers // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1986. V. GE-24. No. 3. P. 340–352.
14. *Belikovich M. V.*, *Makarov D. S.*, *Serov E. A. et al.* Validation of atmospheric absorption models within the 20–60 GHz band by simultaneous radiosonde and microwave observations: The advantage of using ECS formalism // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 23. Article 6042. https://doi.org/10.3390/rs14236042.
15. *Cimini D.*, *Westwater E. R.*, *Han Y.*, *Keihm S.* Ground-based microwave radiometer measurements and radiosonde comparisons during the WVIOP2000 field experiment // 12th ARM Science Team Meeting Proc. Saint Petersburg, Florida, 2002. 9 p.

16. *Cimini D.*, *Westwater E. R.*, *Han Y.*, *Keihm S. J.* Accuracy of ground-based microwave radiometer and balloon-borne measurements during the WVIOP2000 field experiment // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2003. V. 41. No. 11. P. 2605–2615. DOI: 10.1109/TGRS.2003.815673.
17. *Liebe H. J.* MPM — An atmospheric millimeter-wave propagation model // Intern. J. Infrared and Millimeter Waves. 1989. V. 10. P. 631–650. https://doi.org/10.1007/BF01009565.
18. *Skoog B. G.*, *Askne J. I. H.*, *Elgered G.* Experimental determination of water vapor profiles from ground-based radiometer measurements at 21.0 and 31.4 GHz // J. Applied Meteorology and Climatology. 1982. V. 21. Iss. 3. P. 394–400. DOI: 10.1175/1520-0450(1982)021<0394:EDOWVP>2.0.CO;2.
19. *Larosa S.*, *Cimini D.*, *Gallucci D. et al.* PyRTlib: an educational Python-based library for non-scattering atmospheric microwave radiative transfer computations. // Geoscientific Model Development. 2024. V. 17. Iss. 5. P. 2053–2076. https://doi.org/10.5194/gmd-17-2053-2024.
20. *Xu G.*, *Xi B.*, *Zhang W. et al.* Comparison of atmospheric profiles between microwave radiometer retrievals and radiosonde soundings // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2015. V. 120. Iss. 19. P. 10313–10323. https://doi.org/10.1002/2015JD023438.

Comparison of microwave radiometric measurements of descending radiation from cloudless atmosphere in the range of 18–27.2 GHz with model calculations based on radiosonde data

A. B. Akvilonova [1], M. T. Smirnov [1], B. G. Kutuza [2]

[1] *Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS*, *Fryazino Branch*
Fryazino, *Moscow Region 141190*, *Russia*
E-mail: anna@fireras.su
[2] *Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS*, *Moscow 125009*, *Russia*

The results of ground-based spectral microwave radiometric measurements of cloudless atmospheric radiation in the area of the water vapor absorption line are compared with brightness temperatures calculated from radiosonde data from the nearest weather station. The measurements were carried out using P22M microwave radiometer-spectrometer in the range of 18.0–27.2 GHz on the territory of V. A. Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch. The radiosonde data from the nearest Dolgoprudnaya weather station, located at a distance of about 40 km from Fryazino, were used. The analysis showed that the coincidence/discrepancy between experimental and radiosonde data depends on the direction of airflow both at the site of microwave radiometric measurements and at the launch site of radiosondes. The best match is observed in a stable anticyclonal situation. The average deviations between the calculated and experimental data for 2023 and 2024 are obtained. The largest discrepancies between experimental and calculated data are observed on the low-frequency slope of the line. The possible causes of this difference are analyzed, such as calibration errors and errors in the models used, as well as synoptic situation and direction of movement of air masses. The measurement results are compared with calculations based on three radiation models. It is shown that they all give different results depending on the specific profiles of temperature and humidity of the atmosphere.

Keywords: microwave radiometry, radio brightness temperature, atmospheric humidity

Accepted: 08.12.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-1-87-99

References

1. Akvilonova A. B., Egorov D. P., Kutuza B. G., Smirnov M. T., Study of cloudy atmosphere characteristics based on the results of measuring its downwelling microwave radiation spectra in the water vapor resonant absorption band 18.0–27.2 GHz, *Meteorologiya i gidrologiya*, 2022, No. 12, pp. 66–77 (in Russian), DOI: 10.52002/0130-2906-2022-12-66-77.

2. Berezin I. A., Timofeyev Y. M., Virolainen Y. A. et al., Comparison of ground-based microwave measurements of precipitable water vapor with radiosounding data, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2016, V. 29, No. 3, pp. 274–281, DOI: 10.1134/S1024856016030040.
3. Bykov V. Yu., Ilyin G. N., Karavaev D. M., Shchukin G. G., Microwave radiometric measurements of vapor and liquid droplet moisture content in the troposphere, *Trudy Voenno-kosmicheskoi akademii imeni A. F. Mozhajskogo*, 2020, Iss. 567, pp. 128–132 (in Russian).
4. Gurvich A. S., Yershov A. T., Naumov A. P., Plechkov V. M., Investigation of atmospheric moisture content by ground-based radioteplocation, *Meteorologiya i gidrologiya*, 1972, No. 5, pp. 22–27 (in Russian).
5. Karavaev D. M., Shchukin G. G., Status and prospects of application of microwave radiometry of the atmosphere, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2016, V. 29, No. 3, pp. 308–313, DOI: 10.1134/S1024856016030076.
6. Kutuza B. G., Danilychev M. V., Yakovlev O. I., *Sputnikovyi monitoring Zemli: mikrovolnovaya radiometriya atmosfery i poverkhnosti* (Satellite monitoring of the Earth: Microwave radiometry of the atmosphere and surface), Moscow: LENAND, 2015, 336 p. (in Russian).
7. Ostrovsky E. V., Fridzon M. B., Reliability and validity of determination of total moisture content by remote methods when compared with data from standard atmospheric radiosonde, *Nauchnyi vestnik MGTU GA. Ser. Radiofizika i radiotekhnika*, 2008, No. 133, pp. 40–44 (in Russian).
8. Plechkov V. M., Correlation between radiometric and aerological data on water vapor content in the atmosphere, *Fizika atmosfery i okeana*, 1969, V. 5, No. 9, pp. 970–972 (in Russian).
9. Plechkov V. M., Gurvich A. S., Snopkov V. G., Experimental studies of the integral content of water vapor over the ocean during radiometric measurements of atmospheric thermal radiation from a ship, *Doklady Akademii nauk SSSR. Geofizika*, 1970, V. 193, No. 5, pp. 1041–1043 (in Russian).
10. Sazonov D. S., Sadovsky I. N., Pashinov E. V., Kuzmin A. V., Tipping calibration of radiometric receiver in natural conditions, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 4, pp. 40–50 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-40-50.
11. Smirnov M. T., Savorsky V. P., Marechek S. V., Turygin S. Y., Spectral measurements of atmospheric radiothermal radiation in the range of 18–27 GHz, Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii "*7-e Vserossiiskie Armandovskie chteniya. Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya*, *radiolokatsii*, *rasprostraneniya i difraktsii voln* (Materials All-Russian Scientific Conf. "7th All-Russian Armandov Readings. Current Problems of Remote Sensing, Radar, Wave Propagation and Diffraction"), Murom: Izd. Poligraficheskii tsentr MI VlGU, 2017, pp. 175–179 (in Russian).
12. Fridzon M. B., Ermoshenko Yu. M., Radiosonding of the atmosphere, *Mir izmerenii*, 2009, No. 7, pp. 17–21 (in Russian).
13. Askne J. I. H., Westwater E. R., A review of ground-based remote sensing of temperature and moisture by passive microwave radiometers, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1986, V. GE-24, No. 3, pp. 340–352.
14. Belikovich M. V., Makarov D. S., Serov E. A. et al., Validation of atmospheric absorption models within the 20–60 GHz band by simultaneous radiosonde and microwave observations: The advantage of using ECS formalism, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 23, Article 6042, https://doi.org/10.3390/rs14236042.
15. Cimini D., Westwater E. R., Han Y., Keihm S., Ground-based microwave radiometer measurements and radiosonde comparisons during the WVIOP2000 field experiment, *12th ARM Science Team Meeting Proc.*, Saint Petersburg, Florida, 2002, 9 p.
16. Cimini D., Westwater E. R., Han Y., Keihm S. J., Accuracy of ground-based microwave radiometer and balloon-borne measurements during the WVIOP2000 field experiment, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, V. 41, No. 11, pp. 2605–2615, DOI: 10.1109/TGRS.2003.815673.
17. Liebe H. J., MPM — An atmospheric millimeter-wave propagation model, *Intern. J. Infrared and Millimeter Waves*, 1989, V. 10, P. 631–650, https://doi.org/10.1007/BF01009565.
18. Skoog B. G., Askne J. I. H., Elgered G., Experimental determination of water vapor profiles from ground-based radiometer measurements at 21.0 and 31.4 GHz, *J. Applied Meteorology and Climatology*, 1982, V. 21, Iss. 3, pp. 394–400, DOI: 10.1175/1520-0450(1982)021<0394:EDOWVP>2.0.CO;2.
19. Larosa S., Cimini D., Gallucci D. et al., PyRTlib: an educational Python-based library for non-scattering atmospheric microwave radiative transfer computations, *Geoscientific Model Development*, 2024, V. 17, Iss. 5, pp. 2053–2076, https://doi.org/10.5194/gmd-17-2053-2024.
20. Xu G., Xi B., Zhang W. et al., Comparison of atmospheric profiles between microwave radiometer retrievals and radiosonde soundings, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, V. 120, Iss. 19, pp. 10313–10323, https://doi.org/10.1002/2015JD023438.