

СТАТЬЯ

УДК 551.51:528.83

DOI 10.17513/use.38324

**МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ РАДИОТЕПЛООВОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
СКАНИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА****Венславский В.Б., Козлов А.К., Середин Д.В.***ФГБУН Институт природных ресурсов, экологии и криологии**Сибирского отделения Российской академии наук, Чита, e-mail: lgc255@mail.ru*

Цель исследования заключается в разработке методики измерения радиофизических параметров земной атмосферы с использованием микроволновой радиометрии для мониторинга состояния атмосферы. В основе методики радиофизического исследования атмосферных объектов применен метод непрерывного сканирования диаграмм направленности микроволновых радиометров через эталонные источники и направление в зенит. Круговое вращение диаграмм направленности антенн радиометров осуществлялось за счет металлического зеркала, отражающего принимаемое радиотепловое излучение. Программирование режима кругового сканирования позволяло обеспечить внешнюю калибровку радиометров по разнесенным эталонным источникам и выделять любые направления на объекты исследования. В состав аппаратного комплекса были включены измеритель освещенности в вертикальном направлении, датчики температуры и флюксометр для синхронного определения вертикальной составляющей атмосферного электрического поля. Система сбора данных со всех каналов позволяла программировать частоту опроса в соответствии с динамикой сканирования атмосферных образований. Данная методика использования аппаратного комплекса позволяла измерять радиофизические и другие метеорологические параметры приземной атмосферы. Использование комплекса в режиме мониторинга позволило выполнять калибровку и измерения при прохождении атмосферного снежного фронта, оценить абсолютные значения и вариации радиояркостной температуры для различных углов к зениту. Эта методика позволяет оценивать интегральное влагосодержание атмосферы, синхронно фиксировать связанные с облачностью изменения значения атмосферного электричества.

Ключевые слова: радиотепловое излучение, радиояркостная температура, микроволновый радиометр, калибровка, сканирующее зеркало

**METHODOLOGY FOR MEASURING RADIOTHERMAL RADIATION
OF THE ATMOSPHERE USING A SCANNING DEVICE****Venslavskiy V.B., Kozlov A.K., Seredin D.V.***Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Chita, e-mail: lgc255@mail.ru*

The aim of this work is to develop a methodology for measuring the radio physical parameters of the Earth's atmosphere using microwave radiometry for atmospheric monitoring. The methodology for radio physical research of atmospheric objects is based on the continuous scanning method of the radiation pattern of microwave radiometers through reference sources and zenith direction. Circular rotation of the radiation patterns of the radiometer antennas was achieved through a metallic mirror reflecting the received radiothermal radiation. Programming the circular scanning mode allowed for external calibration of the radiometers using spaced reference sources and enabled the selection of any direction towards the study objects. The instrumentation complex included a vertical illuminance meter, temperature sensors, and a fluxmeter for synchronous determination of the vertical component of the atmospheric electric field. The data collection system from all channels allowed programming the polling frequency in accordance with the dynamics of scanning atmospheric formations. This methodology for utilizing the instrumentation complex enabled the measurement of radio physical and other meteorological parameters of the near-surface atmosphere. Using the complex in monitoring mode allowed for calibration and measurements during the passage of an atmospheric snow front, as well as assessing absolute values and variations of radiobrightness temperature for different angles to zenith. This methodology allows for the assessment of integrated moisture content in the atmosphere and synchronous recording of changes in atmospheric electricity associated with cloudiness.

Keywords: radiothermal radiation, radiobrightness temperature, microwave radiometer, calibration, scanning mirror

Введение

Исследования объектов криосферы Земли, в том числе и атмосферных образований, дистанционными радиофизическими методами зондирования сопряжены с измерениями вариаций и абсолютных значений радиояркостной температуры принимаемого радиотеплового излучения синхронно с другими измеряемыми параметрами [1]. В ряде задач исследования природных

объектов требуется контроль поглощения и рассеяния радиотеплового излучения в атмосферных образованиях и аэрозолях различной природы (сажевые, ледяные, пылевые частицы и т.п.) [2, с. 390]. В летнее время в атмосфере формируется мощная облачность, наблюдается выпадение осадков, в том числе образование ледяных частиц и выпадение града. В осеннее и зимнее время усиление кристаллизации в облаках является предметом наблюдения и изуче-

ния. Многие важные процессы, связанные с зарождением атмосферных явлений, еще изучены недостаточно. Примером является недавно открытый лед 0 [3; 4], являющийся переходной формой ко льдам Ih и Ic и образующийся при температуре ниже -23°C из переохлажденной воды [5–7].

Цель исследования – разработка методики измерения радиофизических параметров земной атмосферы с использованием микроволновой радиометрии для мониторинга состояния атмосферы.

Материалы и методы исследования

Для наземных измерений параметров атмосферы использован метод непрерывного сканирования диаграмм направленности через направление в зенит. Основой используемой методики радиофизического исследования атмосферных образований являлось круговое сканирование за счет вращения диаграмм направленности антенн радиометров. Использована внешняя калибровка по *эталону абсолютно черного тела* (ЭАЧТ) при их известной термодинамической температуре и фоновом излучении при безоблачной атмосфере в зенит [8; 9]. Мониторинговая регистрация яркостных температур заданной угловой области, включая зенитное направление, синхронно с измеряемыми параметрами других каналов и метеоданных, использована для накопления

экспериментальных данных при решении задач дистанционного зондирования.

В состав аппаратно-программного комплекса были включены несколько сменных микроволновых радиометров диапазонов 0,88 см и 1,35 см, датчик температуры воздуха и эталонного излучателя, измеритель освещенности и электростатический флюксметр для оценки вертикальной составляющей атмосферного электрического поля [10] (рис. 1). В установке использовали вращающееся зеркало (1), установленное на оси поворотного устройства (2) под углом 45° , что позволило выполнить сканирование $\pm 90^{\circ}$ от зенита. Радиометры (3) располагали в защищенном от атмосферных осадков помещении.

Калибровку по ЭАЧТ (4) выполняли при ориентации диаграмм антенн на этот эталон. При применении двух эталонов отсутствовала необходимость калибровки по атмосфере. Точность измерений радиояркостной температуры (Тя) около 1 К; для случая калибровки по атмосфере требуется уточнение вертикального профиля температуры и влажности и выполнения расчетов их вклада в радиояркость атмосферы [2, с. 390].

Показания в каналах измерителя освещенности и флюксметра в процессе мониторинга позволяли регистрировать отклонения от характеристик стандартной атмосферы при атмосферных процессах.

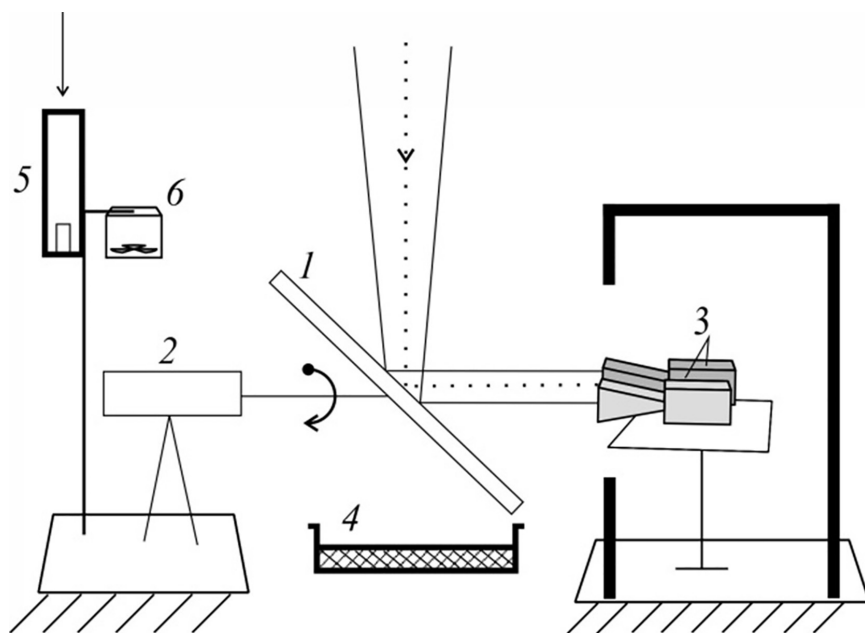


Рис. 1. Схема установки: 1 – вращающееся зеркало-отражатель, 2 – поворотное устройство, 3 – набор сменных радиометров, 4 – тепловой эталонный излучатель, 5 – измеритель освещенности с вертикального направления, 6 – электростатический флюксметр [10]

Первоначально калибровка аппаратно-программного комплекса при безоблачной атмосфере была проведена 10.10.23 при температуре ЭАЧТ 300 К на лабораторной площадке корпуса ИПРЭЖ СО РАН в г. Чита. С учетом излучения в атмосферных газах для безоблачной атмосферы и уменьшенного слоя тропосферы (высота комплекса над уровнем моря 650 м) по оценке для стандартной атмосферы радиояркость температура зенитного направления для данных диапазонов составляет ~ 10 К [8]. При вымороженной атмосфере в зимний период времени и установке аппаратуры на высоте ~ 1050 м этот показатель может быть ниже.

При обработке результатов эксперимента в первую очередь было обращено внимание на направление в зенит, соответствующее регистрации освещенности и вертикальной составляющей электрического поля. Стационарно установленные микроволновые радиометры, измеряющие тепловое излучение, принимали сигналы, отраженные от сканирующего зеркала диаметром 1,2 м для кругового вращения диаграмм направленности антенн с программируемым периодом вращения и установки зеркала для измерения и калибровок с любым значением временных интервалов (рис. 1).

Система сбора была настроена на подключение заданного количества сигналов от микроволновых радиометров, каналов датчиков температуры воздуха и ЭАЧТ, каналов освещенности и флюксметра для исследования проявления тропосферных явлений. Полученные экспериментальные

данные позволяют исследователю построить графики для заданных углов диаграмм направленности и в угловых пределах исследовать радиотепловые характеристики атмосферных объектов [9; 11].

Результаты исследования и их обсуждение

В данном разделе приведен пример выполненных измерений по выявлению атмосферного фронта с использованием предложенной методики измерений.

Прохождение атмосферного фронта было визуально зафиксировано 25.10.2023 с 08:00 (местное время) по повышению облачности. Относительная влажность изменялась от 26% (8:00) до 53% (15:00) при западном ветре до 15 м/с. Вариации радиояркости температуры зенитного направления в канале микроволнового радиометра 0,88 см за сутки изменялись в пределах от 12 до 26 К, в канале 1,35 см от 12 до 18 К (рис. 2). Максимальные вариации сигналов радиометров были зарегистрированы при прохождении атмосферного фронта с 09:00 до 15:00 (рис. 2).

Разность между значениями радиояркости температур в каналах радиометров в 0:00 для зенитного направления отсутствовала, а при прохождении атмосферного фронта возросла до ~ 5 К. Авторы считают, что определенный вклад в увеличение вариаций радиояркости температуры при регистрации атмосферного фронта может вносить появление в облаках ледяных образований, на что указывает уменьшение T_g на 1,35 см [3; 4].

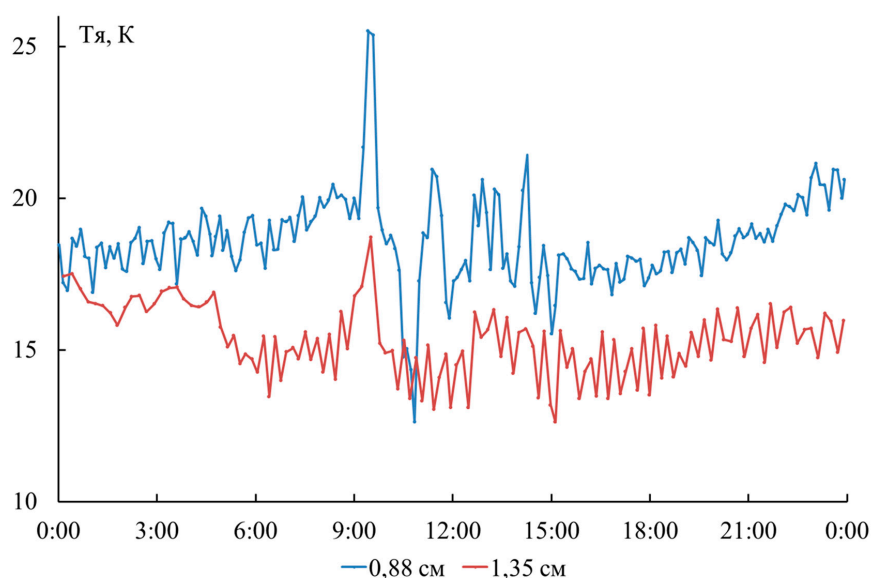


Рис. 2. Сигналы радиометров для зенитного направления антенн 25.10.2023 г. на длинах волн 0,88 см и 1,35 см в зависимости от времени

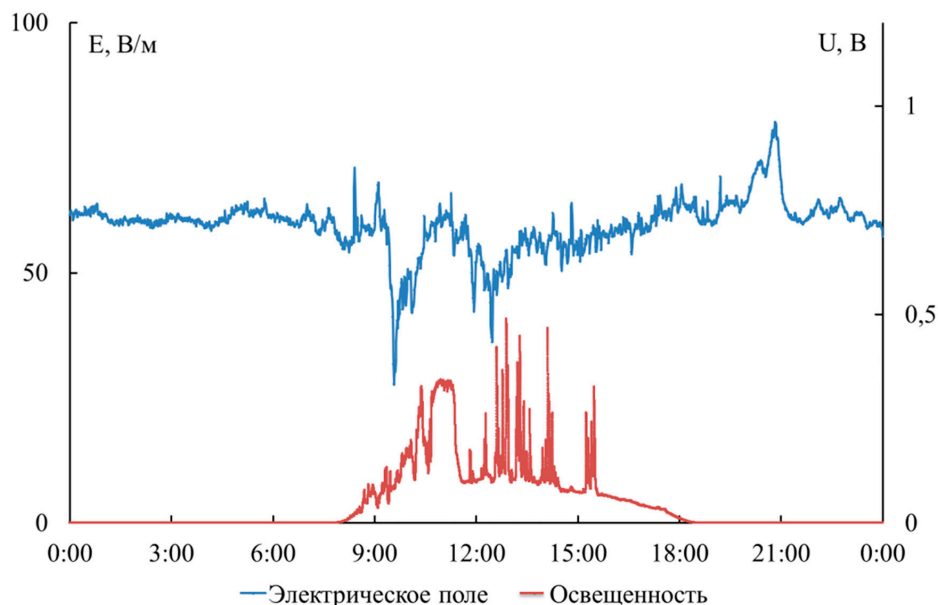


Рис. 3. Сигналы каналов флюксметра (напряженности вертикальной составляющей компоненты электрического поля E , В/м – верхний график) и освещенности (в единицах напряжения на выходе измерителя U , В) 25.10.2023 г.

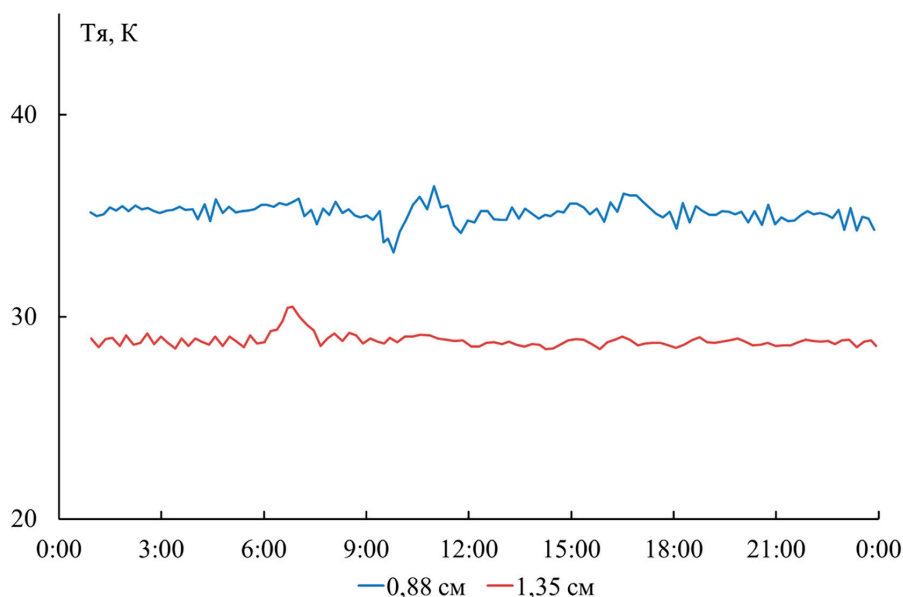


Рис. 4. Сигналы радиояркостной температуры для направления диаграмм направленности антенн под углом 150° к зениту

По показаниям каналов освещенности и флюксметра при прохождении снежного облачного фронта происходили изменения освещенности до 30% и уменьшение вертикальной составляющей напряженности электрического поля до 40 В/м (рис. 3).

В канале флюксметра при прохождении атмосферного фронта наблюдалось увеличение вариаций сигнала и резкий скачок на понижение напряженности с 70 до 30 В/м.

Также при прохождении облачного фронта в период с 09:00 до 21:00 были зафиксированы вариации вертикальной составляющей электрического поля и освещенности, коррелирующие с данными каналов микроволновых радиометров (рис. 2, 3).

Для угла 15° к зениту при прохождении данного атмосферного фронта радиояркостная температура каналов радиометров на вертикальной поляризации на рис. 4.

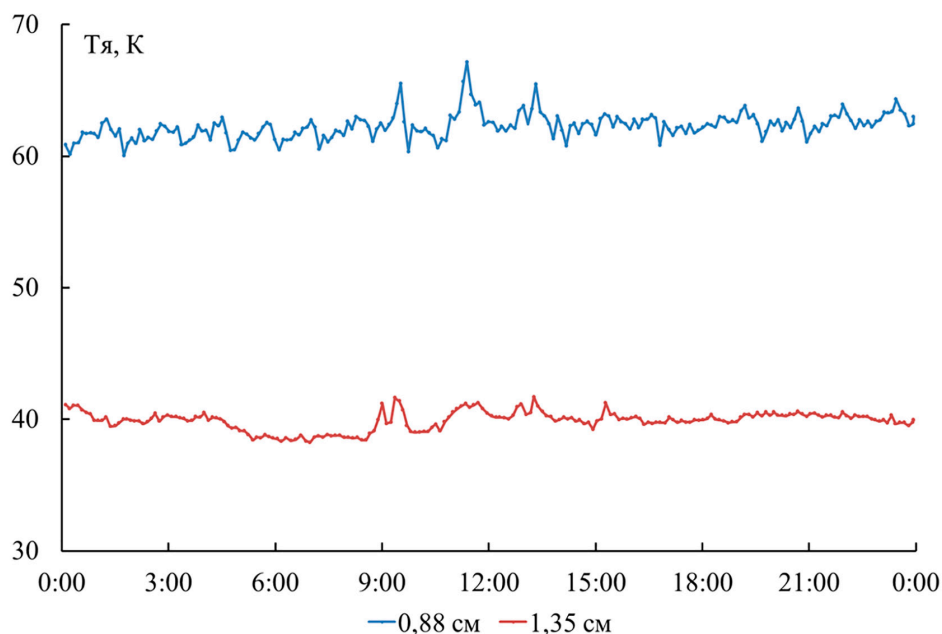


Рис. 5. Сигналы радиояростной температуры для направления диаграмм направленности антенн под углом 30° к зениту

Разница между сигналами канала радиометра 0,88 см и 1,35 см для направления 15° к зениту составила ~ 7 К, значения яркостной температуры в канале радиометра 0,88 см 35 К, а для 1,35 см – 28 К. Вариации радиояростной температуры при зондировании атмосферного фронта под углом 15° из-за утолщения слоя атмосферы оказались сглаженными, а в канале 1,35 см наблюдалось некоторое увеличение на 2 К за два часа ранее (рис. 4).

Для угла 30° к зениту при прохождении данного атмосферного фронта радиояростная температура каналов радиометров при измерении на вертикальной поляризации представлена на рис. 5.

Под углом 30° значительно увеличивается толщина излучающего слоя атмосферы, что приводит к дополнительному возрастанию радиояростной температуры. Средний уровень яркостной температуры в канале радиометра 0,88 см превысил 60 К, а для 1,35 см – 40 К. Разница между сигналами канала радиометра 0,88 см и 1,35 см для диаграмм направленности антенн 30° по отношению к зениту составила ~ 22 К, что на ~ 10 К больше по сравнению с зенитным каналом. Значения радиояростной температуры с ее сканов для разных углов позволяют определить влагосодержание и решить другие вопросы исследования атмосферы.

Заключение

Использование разработанного комплекса аппаратуры в режиме вертикальных разрезов и постоянной калибровки по внешним излучателям в каналах микроволновых радиометров позволило выполнять запись многоканальных синхронных данных об атмосферных образованиях. Включение в комплекс измерителя вертикальной компоненты квазистатического электрического поля, кроме обычных приборов для метеоизмерений, дало возможность дополнительного анализа атмосферных явлений в тропосфере. В комплекс могут включаться радиометры на другие частоты, в том числе и ИК-диапазона.

Предлагаемая методика исследования радиотеплового излучения атмосферы позволяет проводить мониторинг облачности атмосферы, в частности определять интегральное влагосодержание атмосферы и динамику облачных образований. Созданный измерительный комплекс позволяет регистрировать и исследовать изменение характеристик атмосферного электричества, коррелирующего с вариациями радиояростной температуры.

Список литературы

1. Ермаков Д.М., Шарков Е.А., Чернушич А.П. Циркуляция скрытого тепла в атмосфере Земли: анализ 15 лет радиотепловых спутниковых измерений // Современные пробле-

мы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 6. С. 9–27. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-9-27.

2. Шарков Е.А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы: в 2 т. Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 544 с.

3. Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Орлов А.О., Казанцев В.А. Предполагаемый механизм свечения мезосферных облаков // Радиотехника и электроника. 2024. Т. 69, № 3. С. 124–127.

4. Бордонский Г.С., Крылов С.Д., Гурулев А.А. Лед 0 в природной среде. Экспериментальные данные и предполагаемые области его существования // Лед и снег. 2020. Т. 60, № 2. С. 263–273. DOI: 10.31857/S2076673420020039.

5. Гурулев А.А., Бордонский Г.С. Холодная вода и ее влияние на электромагнитные свойства криосферных объектов // Российская Арктика. 2024. Т. 6, № 1 (24). С. 62–70. DOI: 10.24412/2658-4255-2024-1-62-70.

6. Russo J., Romano F., Tanaka H. New metastable form of ice and its role in the homogeneous crystallization of water // Nature Materials. 2014. Vol. 13 (7). P. 733–739. DOI: 10.1038/nmat3977.

7. Quigley D., Alfe D., Slater B. On the stability of ice 0, ice I, and Ih // Journal of Chemical Physics. 2014. Vol. 141, Is. 16. P. 161102–1/5. DOI: 10.1063/1.4900772.

8. Затухание в атмосферных газах и связанное с ним воздействие. Рек. МСЭ-R. 08-2019. P. 676–812. [Электронный ресурс]. URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-12-201908-S!!MSW-R.docx (дата обращения: 20.08.2023).

9. Федосеева Е.В., Ростокин И.Н., Щукин Г.Г. Оценка условий приема в двухканальной СВЧ радиометрической системе по внешнему тестовому шумовому сигналу // Известия высших учебных заведений. Физика. 2016. Т. 59, № 12–3. С. 117–121.

10. Бордонский Г.С., Крылов С.Д. Измеритель квазистатического электрического поля // Приборы и техника эксперимента. 2003. Т. 46, № 6. С. 115–116.

11. Кузьмин А.В., Садовский И.Н., Горшков А.А., Ермаков Д.М. Приборная платформа для надводных измерений морской поверхности и атмосферы // Исследование Земли из космоса. 2020. № 1. С. 83–91. DOI: 10.31857/S0205961420010054.