

Метеорологический спутник «Метеор-М» № 2-3: предварительные результаты микроволнового зондирования Земли

И. А. Барсуков¹, Л. М. Митник², В. В. Болдырев¹, В. П. Кулешов²,
С. А. Гришунин¹, Г. Е. Евсеев¹, М. Л. Митник², А. В. Баранюк², А. М. Стрельцов¹

¹ АО «Российские космические системы», Москва, 111250, Россия
E-mail: Barsukov_IA@spacecorp.ru

² Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва ДВО РАН
Владивосток, 690041, Россия,
E-mail: mitnik@poi.dvo.ru

Рассмотрены характеристики метеорологического спутника «Метеор-М» № 2-3 с усовершенствованным сверхвысокочастотным (СВЧ) радиометром МТВЗА-ГЯ (Модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы, ГЯ — в память о Геннадии Яковлевиче Гуськове (1918–2002)). Спутник был запущен 27 июня 2023 г. с космодрома «Восточный» на круговую солнечно-синхронную орбиту высотой 830 км. Сорок каналов радиометра принимают восходящее излучение Земли на частотах в диапазоне от 6 до 190 ГГц. Ширина полосы обзора при сканировании по конусу под углом 65° к местной нормали составляет 1750 км. Внутренняя калибровка для коррекции вариаций коэффициента усиления каналов МТВЗА-ГЯ проводится на каждом скане. Внешняя калибровка, выполняемая по расчётным значениям яркостной температуры над однородными «горячими» (тропические дождевые леса Амазонки) и «холодными» (Южный океан при слабом ветре и отсутствии облаков) областями, обеспечивает преобразование измеряемой антенной температуры в яркостную. Построены поля яркостной температуры на различных частотах на вертикальной и горизонтальной поляризации в меркаторской и полярной проекции. Они дают представление о температуре поверхности океана, земных и растительных покровов, о скорости приводного ветра и распределении морского льда в Северном и Южном полушарии, о зонах мощной облачности и осадков в тропических и умеренных широтах. При интерпретации данных МТВЗА-ГЯ использованы измерения спутникового радиометра AMSR2 (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer 2). Наблюдения на новых частотах МТВЗА-ГЯ перспективны для обнаружения облачности с малым водозапасом над океаном и зон глубокой конвекции и осадков над океаном и над сушей.

Ключевые слова: «Метеор-М» № 2-3, микроволновый радиометр МТВЗА-ГЯ, моделирование, яркостная температура, глобальные поля, глубокая конвекция, осадки, Арктика, Антарктика, AMSR2, калибровка, радиочастотные помехи

Одобрена к печати: 05.12.2024
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-315-326

Введение

27 июня 2024 г. исполнился год с момента успешного запуска космического аппарата (КА) «Метеор-М» № 2-3 — пятого аппарата космического комплекса гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-3М», предназначенного для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в интересах оперативной метеорологии, гидрологии, агрометеорологии, мониторинга климата и окружающей среды, в том числе околоземного космического пространства. Гидрометеорологический КА был запущен с космодрома «Восточный» на круговую солнечно-синхронную орбиту высотой 830 км. Спутник изготовлен в АО «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы имени А. Г. Иосифьяна» (Научно-производственная корпорация «ВНИИЭМ» — Всесоюзный научно-исследовательский институт электромеханики; входит в Госкорпорацию «Роскосмос»). Спутник предназначен для решения задач гидрометеорологического обеспечения, мониторинга климата и окружающей среды, изучения природных ресурсов Земли

и др. Основным сенсором является сканирующий микроволновый радиометр МТВЗА-ГЯ (Модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы, ГЯ — в память о Геннадии Яковлевиче Гуськове (1918–2002), который стоял у истоков создания российских приборов этого класса).

Радиометр был разработан и усовершенствован в «Центре космических наблюдений» (впоследствии Научно-технологический центр «Космонит», ныне отделение 60 АО «Российские космические системы»). За последние 15 лет в отделении были созданы радиометры МТВЗА-ГЯ для КА «Метеор-М» № 1 (запущен в 2009 г.), № 2 (2014), № 2-1 (аварийный запуск, 2017 г.), № 2-2 (2019), № 2-3 (2023) и № 2-4 (2024) (Барсуков и др., 2011; Болдырев и др., 2008; Чернявский, 2007; Чернявский и др., 2018; Barsukov et al., 2016; Cherny et al., 2010; Mitnik et al., 2016, 2017, 2022). Радиометр установлен выше остальных инструментов и солнечных панелей. Для оптимизации генерируемой мощности ориентация панелей меняется при переходе от восходящих орбит к нисходящим. При этом изменяются ширина и положение центра сектора сканирования, в котором солнечные панели не затевают Землю. Коническое сканирование выполняется под углом 65° к местной нормали.

На спутнике «Метеор-М» № 2-3 ширина полосы обзора усовершенствованного радиометра МТВЗА-ГЯ ≥ 1750 км. Впервые измерения выполняются на 40 каналах в диапазоне частот ν от 6,9 до 190 ГГц. Частоты 7,3; 34,0; 45,0; 165,5; $183,31 \pm 1,8$ и $183,31 \pm 4,5$ ГГц ранее на российских спутниках не использовались. Цель данной работы заключается в оценке функционирования радиометра в космосе по глобальным полям антенной температуры $T_{\text{ант}}(\nu)$, измеренной в период лётных испытаний спутника «Метеор-М» № 2-3 на протяжении трёх месяцев. Актуальность работы связана с появлением новых каналов на новых частотах, а также с запуском спутников «Метеор-М» № 2-4 29 февраля 2024 г. и «Метеор-М» № 2-5 в 2025 г. с такими же радиометрами на борту. Необходимыми составляющими работы является моделирование яркостной температуры на новых частотных каналах, в том числе над калибровочными областями при ясном небе и при облачности.

Моделирование яркостной температуры

Для моделирования измерений радиометра, внешней калибровки и оценки его потенциала была использована усовершенствованная программа переноса микроволнового излучения в системе «подстилающая поверхность — атмосфера». Программа позволяет рассчитать яркостную температуру $T_{\text{я}}^{\text{B},\Gamma}(\nu)$ в диапазоне частот ν от 5 до 250 ГГц на вертикальной (В) и горизонтальной (Г) поляризации при различных углах падения θ и вариациях параметров поверхности и атмосферы (Mitnik et al., 2009). На рис. 1 (см. с. 317) показаны спектры $T_{\text{я}}^{\text{B},\Gamma}(\nu)$ над океаном для двух безоблачных и одной облачной ситуации.

Моделирование $T_{\text{я}}^{\text{B},\Gamma}(\nu, \theta)$ выполнялось на частотах радиометров МТВЗА-ГЯ и AMSR2 на КА GCOM-W1 (англ. Global Change Observation Mission-W1) при $\theta = 65$ и 55° соответственно. Расчётная и экспериментальная яркостная температура AMSR2 применялась для оценки стабильности работы МТВЗА-ГЯ в космосе, а также при интерпретации результатов зондирования системы «атмосфера — океан» (Чернявский и др., 2018). В качестве входных данных использовались вертикальные профили температуры, давления и относительной влажности атмосферы по показаниям радиозондов, взятым с сайта Университета Вайоминга (англ. University of Wyoming) <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>. Они были дополнены вертикальными профилями водности облаков различных типов. Коэффициенты излучения гладкой поверхности океана $\kappa(\nu, t, S, \theta)$ находились по формулам Френеля по заданным значениям температуры поверхности океана t и солёности S . Влияние ветра на $\kappa(\nu, t, S, \theta)$ рассчитывалось по поправкам $\Delta\kappa(\nu, t, S, \theta, W)$, где W — скорость ветра, с эмпирически полученными коэффициентами. Значения $T_{\text{я}}^{\text{B},\Gamma}(\nu, \theta)$ над земными покровами рассчитывались по экспериментальным значениям $\kappa^{\text{B},\Gamma}(\nu, \theta)$.

Значения $T_{\text{я}}$, рассчитанные по данным радиозондов, ближайшим к выбранным участкам в лесах Амазонки и Южном океане и с минимальной разностью по времени с данными МТВЗА-ГЯ, использовались для определения калибровочных коэффициентов на частотах

сканерных каналов. Учитывались и другие факторы, которые могли влиять на уходящее излучение системы «поверхность – атмосфера» (Митник, Митник, 2016; Mitnik et al., 2022).

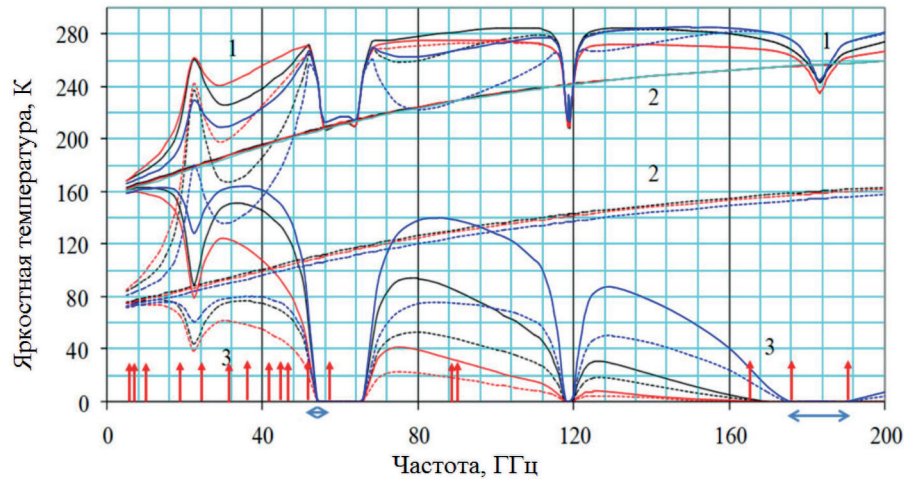


Рис. 1. Спектры яркостной температуры системы «океан – атмосфера» (1), океана на нижней (2) и верхней (3) границе атмосферы. Сплошные линии — В-поляризация, пунктирные — Г-поляризация. Паросодержание атмосферы $V = 59 \text{ кг/м}^3$ и водозапас облаков $Q = 0 \text{ кг/м}^3$ (чёрные линии); $V = 28 \text{ кг/м}^3$ и $Q = 0 \text{ кг/м}^3$ (синие линии); $V = 61 \text{ кг/м}^3$ и $Q = 0,6 \text{ кг/м}^3$ (красные линии). Красные стрелки отмечают частоту радиометра МТВЗА-ГЯ; синие стрелки — диапазоны для определения температуры (52,8–57,6 ГГц) и влажности (176–190 ГГц) воздуха

Усовершенствованный радиометр на КА «Метеор-М» № 2-3

Радиометр МТВЗА-ГЯ на КА «Метеор-М» № 2-3 усовершенствован по сравнению с прибором на КА «Метеор-М» № 2-2. Новые частоты зондирования расположены в окнах прозрачности атмосферы (6,9; 7,3; 34; 45 и 165 ГГц) и в области резонанса водяного пара с центром на 183,31 ГГц ($183,31 \pm 1,8$ и $183,31 \pm 4,5$ ГГц). Частоты выбраны на основе анализа развития спутниковой микроволновой радиометрии, результатов моделирования переноса излучения в системе «атмосфера – подстилающая поверхность» и рекомендаций организаций Росгидромета. Согласно техническому заданию (ТЗ), ширина полосы обзора МТВЗА-ГЯ — 1500 км, а период сканирования — 2,5 с. Оценочные значения этих параметров — 1750 км и $2,499 \pm 0,001$ с. Основные характеристики МТВЗА-ГЯ приведены в таблице, а изображения сканирующей платформы и геометрии сканирования прибора представлены на рис. 2 (см. с. 319).

Пространственное разрешение связано с размером антенного пятна и находится по параметрам диаграммы направленности антенны (ДНА) на различных частотах. При коническом сканировании в рабочем секторе каждая точка наблюдения (пиксель) равноудалена от радиометра на орбите. Антенное пятно имеет форму эллипса. Его размер (как и элемента разрешения данных) определяется длиной малой (по дуге конического сканирования) и большой (вдоль линии визирования) осей.

Антенная система МТВЗА-ГЯ представляет собой однозеркальную антенну с боковым облучением параболического зеркала размером 0,67 м (см. рис. 2а). Групповой многочастотный антенный облучатель включает четыре рупора, которые оптимизированы в диапазонах от 6,9–23,8; 31,5–48; 52–91 и 165–183 ГГц. Оптические оси антенных лучей каналов ориентированы так, чтобы они являлись образующими конуса сканирования с углом при вершине $53,30017^\circ$ (см. рис. 2б). Расхождение антенных лучей, обусловленное применением группового облучателя, лежит в пределах углов $\pm 6,5^\circ$. Из анализа профилей $T_{\text{ант}}(\nu)$, полученных при пересечении лимба Земли при повороте спутника, следует, что в пределах ДНА на $\nu = 6,3$ ГГц находятся ДНА на других частотах. Небольшая коррекция (на 1–2 пикселя) может быть сде-

лана при обработке длинных временных рядов $T_{\text{ант}}(\nu)$. Вращение сканирующей платформы осуществляется с помощью блока привода и блока управления приводом. Нестабильность вращения характеризуется уровнем 10^{-4} .

Технические характеристики радиометра МТВЗА-ГЯ по результатам лётных испытаний спутника «Метеор-М» № 2-3

Частота, ГГц	Пространственное разрешение, км		Размер пикселя изображения, км
	Значения по ТЗ	Оценённое значение	
6,90	136×280	134×275	32×32
7,30	122×250	120×248	
10,60	89×198	86×197	
18,70	52×116	50×115	
23,80	42×94	41×94	
31,50	35×76	35×74	
36,50	30×67	29×65	
42,00	26×60	25×59	
48,00	24×43	24×42	
52,80	21×48	21×48	48×48
53,30			
53,80			
54,64			
55,63			
$\nu_0 \pm 0,3222 \pm 0,1000$			
$\nu_0 \pm 0,3222 \pm 0,0500$			
$\nu_0 \pm 0,3222 \pm 0,0250$			
$\nu_0 \pm 0,3222 \pm 0,0100$			
$\nu_0 \pm 0,3222 \pm 0,0050$			
91,65	14×30	14×29	16×16
165,50	12×25	12×25	32×32
183,31±7,00	9×21	9×21	
183,31±4,50			
183,31±3,00			
183,31±1,80			
183,31±1,40			

Примечание: $\nu_0 = 57,290344$ ГГц.

Приёмники сканера в диапазоне 6,9–48 ГГц — это радиометры компенсационного типа, которые построены по схеме прямого усиления на базе малошумящего усилителя. Приёмники на частотах 52–58, 91 и 165–190 ГГц также являются радиометрами компенсационного типа, но построены по супергетеродинной схеме.

На 11 частотах в диапазоне 6,9–48 ГГц, а также на частоте 91,6 ГГц излучение Земли принимается на В- и Г-поляризации. Кросс-поляризационная развязка на всех каналах не хуже –20 дБ. При ширине полосы пропускания каналов $\Delta\nu$ от 100 до 1000 МГц чувствительность составляет 0,05–0,08 К при постоянной времени 1 с. На частоте 165,5 ГГц и частотах в области 176–190 ГГц принимается излучение с В-поляризацией. Ближе к резонансной частоте водяного пара 183,31 ГГц значения $\Delta\nu$ уменьшаются от 3000 МГц на $\nu = 165,5$ ГГц до 500 МГц на $\nu = 183,31 \pm 1,4$ ГГц и шумы, соответственно, возрастают от 0,04 до 0,15 К.

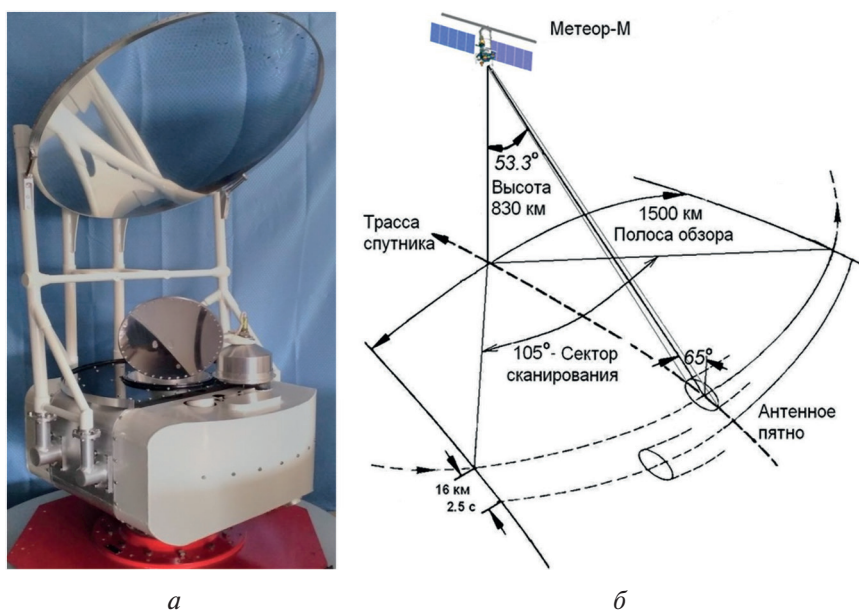


Рис. 2. Сканирующая платформа (а) и геометрия сканирования (б) радиометра МТВЗА-ГЯ с орбиты КА «Метеор-М» № 2-3

Круговое коническое сканирование МТВЗА-ГЯ выполняется в направлении кормы КА. Направление скана — справа налево, ширина рабочего сектора 105° (от -90 до 15° относительно трассы спутника). Ширина и несимметричность сектора сканирования определяются максимальным использованием области, которая не затеняется элементами конструкции КА. Ширина полосы обзора при этом не менее 1500 км.

За период сканирования 2,5 с нормаль спутника перемещается на поверхности Земли на 16 км, что близко к пространственному разрешению радиометра на частоте 91,6 ГГц (см. таблицу). Поэтому размер 16 км выбран в качестве пространственного элемента квантования сигнала для всех радиометрических каналов как вдоль трассы движения спутника, так и вдоль направления сканирования. Дальнейшее пространственное усреднение (сглаживание) данных проводится в наземных условиях.

При лётных испытаниях было установлено, что затенение ДНА происходит только на восходящих витках, что ограничивает зону сканирования сектором 105° . Ширина полосы обзора при этом $\Delta L \approx 1750$ км. На нисходящих витках положение солнечных панелей открывает обзор в секторе $>120^\circ$ и ΔL может достигать 2500 км.

На частотах в диапазонах 6,9–48 и 165–183 ГГц размер пикселя изображения принят равным 32×32 км, в каналах температурного зондирования в диапазоне 52,80–57,65 ГГц — 48×48 км.

На частотах 165,5, 183 ± 7 , ..., $183 \pm 1,4$ ГГц размеры антенного пятна при наземной обработке экстраполируются до размеров пикселя 16×16 км. В этом случае обзорные изображения Земли на выходе комплекса предварительной обработки данных будут без пробелов. При построении глобальных изображений размер пикселя может составлять 16×16 , 32×32 и 48×48 км. Поэтому по согласованию с «НИЦ «Планета», тематическим заказчиком, выходные массивы в каналах зондирования влажности могут быть построены с сеткой от $0,5$ до $2,5^\circ$, что удобно для усвоения данных.

Функционирование МТВЗА-ГЯ в космосе

Первое включение аппаратуры МТВЗА-ГЯ было осуществлено 4 июля 2023 г. на 101-м витке КА «Метеор-М» № 2-3 после тестирования служебных систем. Контроль исходного состояния, температурного режима и функционирования аппаратуры проводился по данным

телеметрического контроля. За время лётных испытаний проведён анализ более 800 файлов с данными телеметрии и измерений. Предусмотрено два режима сброса информации: непосредственная передача данных со средней скоростью 20,8 Кбит/с (мгновенная скорость 665,4 Кбит/с) через дециметровую радиолинию 1,7 ГГц в международном стандарте HRPT (англ. High Rate Picture Transmission) и сброс глобальной информации из блока накопления данных в сантиметровую радиолинию 8,2 ГГц со скоростью 15,36 Мбит/с.

С 8 октября 2023 г. из-за нештатной ситуации с радиолинией сантиметрового диапазона данные поступают только по дециметровой линии в режиме непосредственной передачи над территорией России. Данные принимаются в Дальневосточном (Хабаровск), Сибирском (Новосибирск) и Центральном центрах «НИЦ «Планета».

Глобальные поля яркостной температуры Земли

Короткое время работы МТВЗА-ГЯ в космосе, аппаратные помехи и отключения не позволили исследовать временную стабильность и другие параметры радиометра. Внешняя калибровка была, однако, выполнена. Переход к яркостной температуре $T_{я}(\nu, \theta)$ от антенной температуры (отсчётов, измеренных МТВЗА-ГЯ) осуществляется с помощью внутренней и внешней калибровки. В качестве внешней калибровки использовался перепад между излучением протяжённых «горячих» и «холодных» областей с малой и известной изменчивостью коэффициента излучения поверхности $\varepsilon^{B, \Gamma}(\nu, \theta)$ и характеристик атмосферы над ними. Горячей областью служил влажный тропический лес, а холодной — океаны, моря или большие озёра при безоблачной атмосфере, что позволило найти калибровочные коэффициенты по разности расчётных значений $T_{я}^{B, \Gamma}(\nu, \theta)$ над выбранными областями.

Как и в экспериментах с КА «Метеор-М» № 2 и 2-2 (Кулешов и др., 2020; Митник, Митник, 2016; Чернявский и др., 2020; Mitnik et al., 2017), были построены глобальные поля яркостной температуры уходящего излучения Земли в меркаторской и полярной проекции, в том числе и на новых частотах МТВЗА-ГЯ (рис. 3–5, см. с. 321).

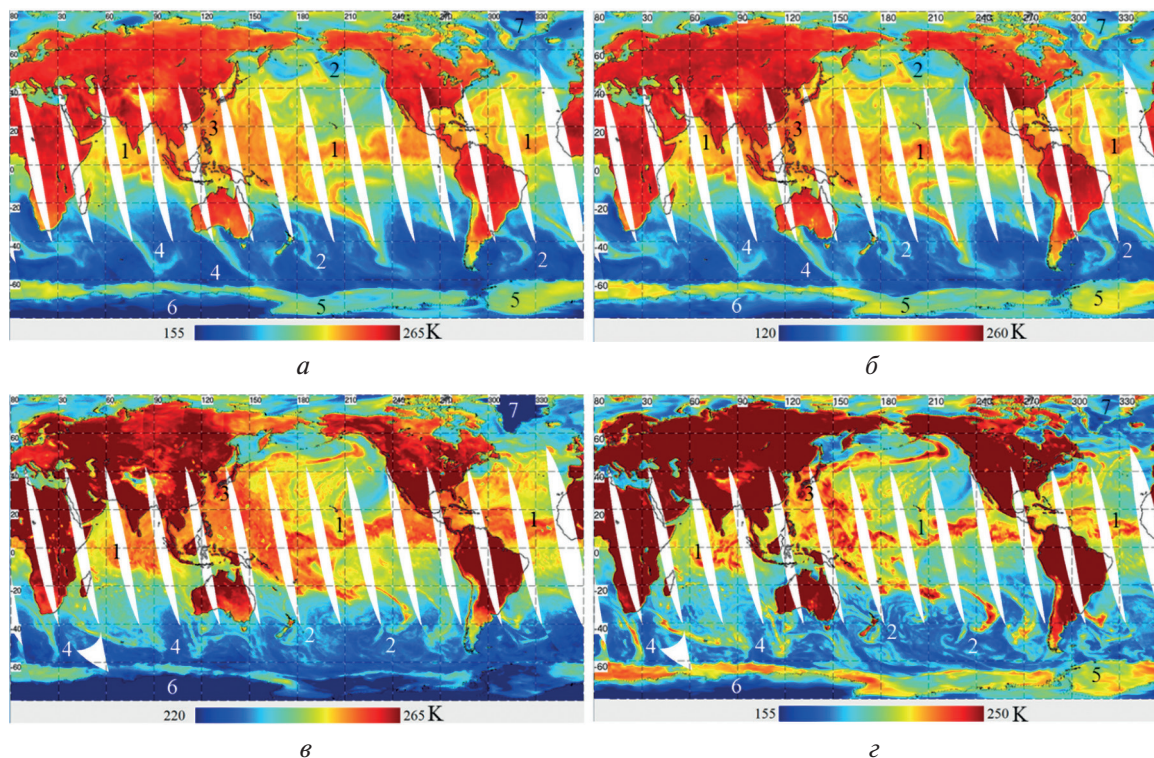


Рис. 3. Яркостная температура на частотах 23,8 ГГц 2 августа (а, б) и 45 ГГц 7 августа (в, г) 2023 г. на вертикальной (а, в) и горизонтальной (б, г) поляризации по данным МТВЗА-ГЯ на восходящих витках

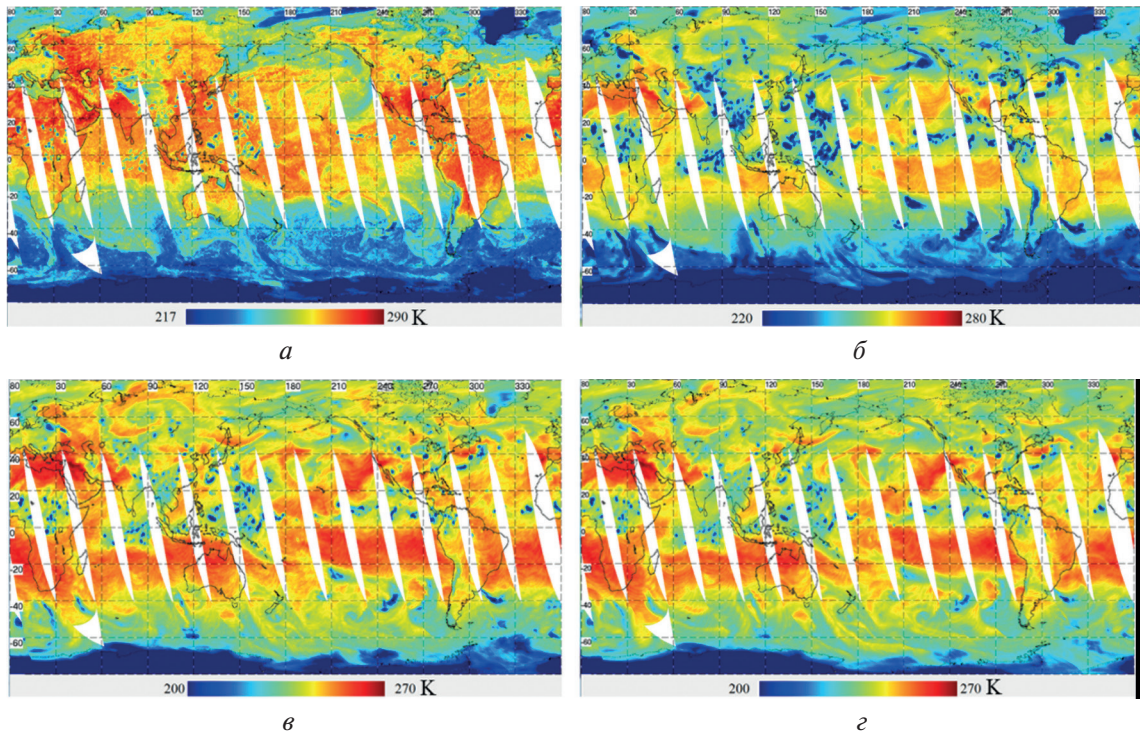


Рис. 4. Яркостная температура Земли на частотах 91,6 (а), 165,5 (б), 183±7 (в) и 183±1,8 ГГц (г) на вертикальной поляризации по измерениям радиометра МТВЗА-ГЯ 7 августа 2023 г.

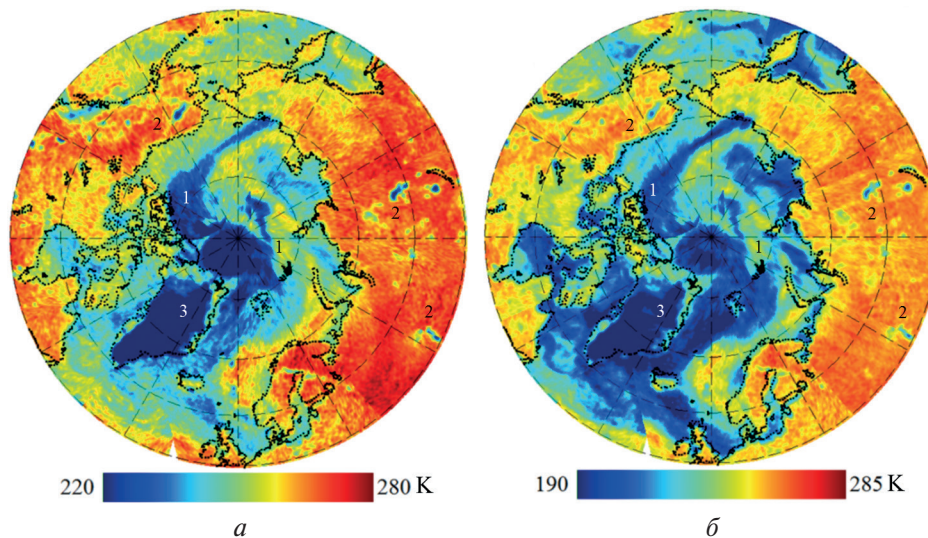


Рис. 5. Яркостная температура арктической и субарктической зон на частоте 91,6 ГГц на вертикальной (а) и горизонтальной (б) поляризации по данным МТВЗА-ГЯ 8 августа 2023 г.

На рис. 3 в полях $T_{я}$ особенности циркуляции атмосферы в августе 2023 г. отчётливо проявляются в высоких значениях паросодержания атмосферы и водозапаса облаков во внутритропической зоне конвергенции над Атлантическим, Индийским и Тихим океаном (1); циклонах Северного и Южного полушария (2); области тайфуна Ханун (3) и атмосферных реках (4). Яркостная температура морского льда вокруг Антарктиды (5) заметно выше $T_{я}$ Южного океана. Самые низкие значения яркостной температуры отмечаются в Восточной Антарктиде (6) и Гренландии (7). Отмеченные особенности типичны для летних месяцев, что следует из сравнения с полями $T_{я}$ за другие даты, построенными по микроволновым данным как МТВЗА-ГЯ, так и радиометра AMSR2 (Чернявский и др., 2018).

На высоких частотах T_j зависит не только от поглощения в атмосферных газах, облаках и осадках, но и от рассеяния излучения на крупных частицах (капли дождя, град) в зонах развитой конвекции, наблюдаемых в атмосферных фронтах циклонов умеренных широт и в тропических циклонах. Зоны с рассеянием излучения на гидрометеорах и высоким интегральным поглощением в атмосфере, которое ослабляет излучение поверхности, выделяются над океаном и материковыми покровами по пониженным значениям яркостной температуры (см. *рис. 3 и 4*) (Митник и др., 2023; Chen, Bennartz, 2020).

Важным приложением данных МТВЗА-ГЯ является исследование полярных зон Земли, где отмечаются опасные процессы в тропосфере (взрывные циклоны, атмосферные реки) и стратосфере (внезапные стратосферные потепления), высокая изменчивость морского льда, таяние ледяных щитов Гренландии и Антарктиды. На *рис. 5* приведена яркостная температура субарктической и арктической зоны летом.

При предварительной обработке данных была выполнена оценка электромагнитной совместимости радиометра с другими бортовыми системами КА. При включении радиолокатора в бортовом радиолокационном комплексе (Габриэльян и др., 2024) измерения МТВЗА-ГЯ стали невозможны из-за высокого уровня помех. Такой же вывод был сделан ранее при анализе данных на КА «Метеор-М» № 2 и 2-3 (на КА «Метеор-М» № 2-2 бортовой радиолокационный комплекс не был установлен).

Помехи от наземных радиоэлектронных систем были зарегистрированы на В- и Г-поляризации на частотах 6,9, 7,3 и 10,6 ГГц над европейскими (Англия, Франция, Испания, Россия и др.) и азиатскими (Индия, Китай, Корея, Япония и др.) странами, а также в Африке, Северной и Южной Америке, что иллюстрирует *рис. 6*.

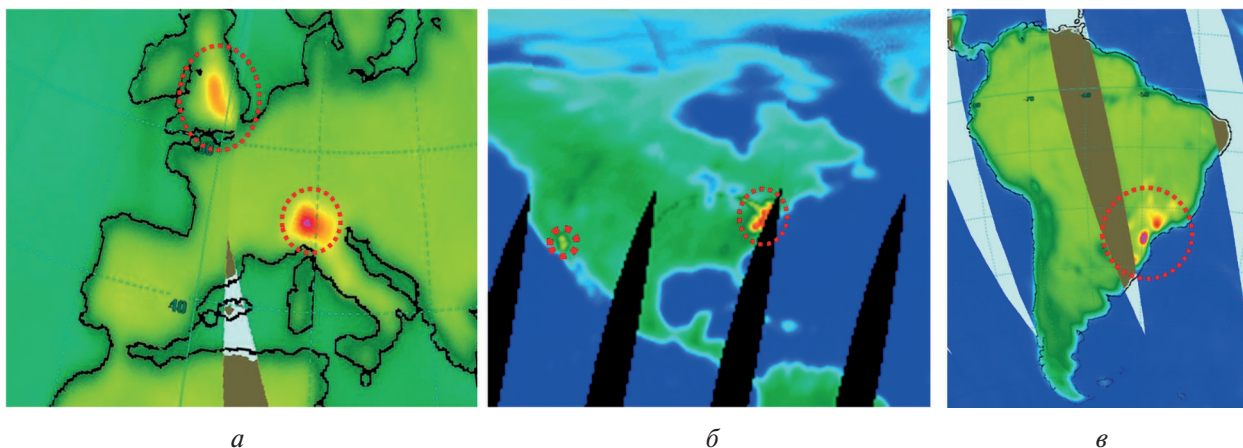


Рис. 6. Помехи от наземных телекоммуникационных и радиолокационных средств на частоте 10,6 ГГц в период 1–11 сентября 2023 г. Красные пунктирные окружности отмечают границы областей с интенсивными (>300 К) помехами

Помехи от наземных радиоэлектронных систем регистрировались ранее радиометрами AMSR-E (спутник Aqua), AMSR-2 (спутник GCOM-W1), а также МТВЗА-ГЯ (спутники «Метеор-М» № 1, 2 и 2-2) (Стрельцов и др., 2012; Чернявский и др., 2018, 2020; Mitnik et al., 2017). Алгоритмы, основанные на совместном анализе данных на нескольких частотах (Zabolotskikh et al., 2015), обеспечивают и обнаружение помех, и снижение их влияния.

Заключение

Радиометр МТВЗА-ГЯ, установленный на КА «Метеор-М» № 2-3, является следующим шагом в развитии СВЧ-приборов космического базирования, предназначенных для получения глобальной гидрометеорологической информации. В приборе реализованы схемные

и конструктивные решения с максимально возможным применением отечественных компонентов. Данные о восходящем микроволновом излучении Земли были получены на 40 каналах в диапазоне частот от 6,9 до 190 ГГц с 4 июля по 8 октября 2023 г. Пространственные и временные вариации излучения обусловлены изменчивостью характеристик поверхности океана, ледяного покрова, земных и растительных покровов, а также параметров и явлений в атмосфере. Особый интерес представляют экстремальные явления в атмосфере, наблюдаемые в зонах глубокой конвекции и часто связанные с интенсивными осадками и наводнениями. Из-за технической неисправности сантиметровой радиoliniии данные измерений после 9 октября передаются только по дециметровой линии и принимаются исключительно на территории Российской Федерации, обеспечивая её полное ежедневное покрытие.

Результаты лётных испытаний и эксплуатации многоканального сканирующего радиометра МТВЗА-ГЯ на спутниках серии «Метеор-М» (Митник и др., 2023; Чернявский и др., 2018, 2020; Barsukov et al., 2016; Mitnik et al., 2016) используются при доработке создаваемых спутниковых приборов и при разработке перспективных СВЧ-радиометров (Cherny et al., 2017).

Обработка данных информационного потока (целевой информации), полученных над земным шаром в июле – октябре 2023 г., позволила оценить технические характеристики МТВЗА-ГЯ. Значения чувствительности большинства частотных каналов были близки к величинам, установленным до запуска спутника, за исключением каналов в диапазоне 52,8–57,6 ГГц, предназначенных для термического зондирования атмосферы Земли, в которых наблюдается сильный полосовой шум. Из анализа глобальных данных за трёхмесячный период следует, что информационные и технические характеристики других частотных каналов соответствуют требованиям, предъявляемым к рассматриваемой аппаратуре.

29 февраля 2024 г. на орбиту был выведен следующий спутник серии «Метеор-М» № 2-4. Радиометр МТВЗА-ГЯ на этом КА также предназначен для измерения микроволнового излучения Земли. Как и на спутнике «Метеор-М» № 2-3, радиометр МТВЗА-ГЯ расположен вне герметичного отсека, что при длительных глобальных измерениях позволит исследовать влияние природных космических и антропогенных (радиофизические помехи) факторов на характеристики прибора.

Работа выполнена при поддержке госбюджетной темы (регистрационный номер 124022100080-0) «Комплексное использование методов дистанционного зондирования Земли, а также наземных и подводных измерительных систем в исследованиях морских погодных образований, гидродинамических и биогеохимических процессов в верхнем слое океана и морей».

Литература

1. Барсуков И. А., Никитин О. В., Стрельцов А. М., Черный И. В., Чернявский Г. М. Предварительная обработка данных СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ КА «Метеор-М» № 1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 257–263.
2. Болдырев В. В., Горбеев Н. Н., Ильгасов П. А., Никитин О. В., Панцов В. Ю., Прохоров Ю. Н., Стрельников Н. И., Стрельцов А. М., Черный И. В., Чернявский Г. М., Яковлев В. В. Спутниковый микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 1. С. 243–248.
3. Габриэлян Д. Д., Демченко В. И., Занин К. М. и др. Принципы построения антенной системы БРЛК КА «Метеор-М» № 2-3, 2-4 и верификации её характеристик на орбите // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 2. С. 73–85. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-73-85.
4. Кулешов В. П., Митник Л. М., Митник М. Л. Глобальные поля яркостной температуры Земли в диапазоне 10–190 ГГц по измерениям со спутников «Метеор-М» № 2 и 2-2 // Тр. Военно-косм. акад. им. А. Ф. Можайского. Вып. 674. Проблемы военно-приклад. геофизики и контроля состояния природ. среды. 2020. С. 223–228.
5. Митник Л. М., Митник М. Л. Калибровка и валидация — необходимые составляющие микроволновых радиометрических измерений со спутников серии «Метеор-М» № 2 // Современные

- проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 95–104. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-95-104.
6. Митник Л. М., Баранюк А. В., Митник М. Л. Тайфун «Хиннамнор» (2022): воздействие на дальневосточные моря, Приморский и Хабаровский края по данным активного и пассивного микроволнового зондирования из космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. С. 336–345. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-336-345.
 7. Стрельцов А. М., Никитин О. В., Барсуков И. А., Черный И. В., Чернявский Г. М. Радиочастотные помехи, влияющие на качество информации СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ спутника «Метеор-М» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 181–184.
 8. Чернявский Г. М. Отечественные технологии спутниковой СВЧ-радиометрии // Аэрокосм. курьер. 2007. № 6. С. 22–24.
 9. Чернявский Г. М., Митник Л. М., Кулешов В. П. и др. Микроволновое зондирование океана, атмосферы и земных покровов по данным спутника «Метеор-М» № 2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 78–100. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-78-100.
 10. Чернявский Г. М., Митник Л. М., Кулешов В. П. и др. Моделирование яркостной температуры и первые результаты, полученные микроволновым радиометром МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 2-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 51–65. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-51-65.
 11. Barsukov I., Cherniavsky G., Cherny I. V. et al. New Russian meteorological satellite Meteor-M N 2: Sensing of the subsurface, surface and atmospheric characteristics by MTVZA-GY microwave imager/sounder // 2016 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS), Beijing, China. 2016. P. 5528–5531. DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7730442.
 12. Chen R., Bennartz R. Sensitivity of 89–190-GHz microwave observations to ice particle scattering // J. Applied Meteorology and Climatology. 2020. V. 59. No. 7. P. 1195–1215. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0293.1>.
 13. Cherny I. V., Mitnik L. M., Mitnik M. L. et al. On-orbit calibration of the “Meteor-M” microwave imager/sounder // 2010 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS), Honolulu, HI, USA. 2010. P. 558–561. DOI: 10.1109/IGARSS.2010.5651139.
 14. Cherny I. V., Chernyavsky G. M., Mitnik L. M. et al. Advanced microwave imager/sounder MTVZA-GY-MP for new Russian meteorological satellite // 2017 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS), Fort Worth, TX, USA. 2017. P. 1220–1223. DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8127178.
 15. Mitnik L. M., Mitnik M. L., Zabolotskikh E. V. Microwave sensing of the atmosphere-ocean system with ADEOS-II AMSR and Aqua AMSR-E // J. Remote Sensing Soc. of Japan. 2009. V. 29. No. 1. P. 156–165.
 16. Mitnik L. M., Mitnik M. L., Chernyavsky G. M., Cherny I. V., Vykochko A. V., Pichugin M. K., Zabolotskikh E. V. Sea surface wind and Sea ice in the Barents Sea using microwave sensing data from Meteor-M N 1 and GCOM-W1 satellites in January–March 2013 // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. V. 52. No. 9. P. 1041–1050.
 17. Mitnik L., Kuleshov V., Mitnik M. et al. Microwave scanner sounder MTVZA-GY on new Russian meteorological satellite Meteor-M No. 2: modeling, calibration and measurements // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2017. V. 10. No. 7. P. 3036–3045. DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2695224.
 18. Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L. et al. Microwave radiometer MTVZA-GY on new Russian satellite Meteor-M No. 2-2 and sudden stratospheric warming over Antarctica // IEEE J. Selected Topics of Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2022. V. 15. P. 820–830. DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3133425.
 19. Zabolotskikh E. V., Mitnik L. M., Chapron B. Radio-frequency interference identification over oceans for C- and X-band AMSR2 channels // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2015. V. 12. No. 8. P. 1705–1709. DOI: 10.1109/LGRS.2015.2420120.

Meteorological satellite Meteor-M No. 2-3: Preliminary results of microwave sensing of the Earth

I. A. Barsukov¹, L. M. Mitnik², V. V. Boldyrev¹, V. P. Kuleshov², S. A. Grishunin¹,
G. E. Evseev¹, M. L. Mitnik², A. V. Baranyuk², A. M. Streltsov¹

¹ JSC “Russian Space Systems”, Moscow 111250, Russia
E-mail: Barsukov_IA@spacecorp.ru

² V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia
E-mail: mitnik@poi.dvo.ru

The characteristics of the meteorological satellite Meteor-M № 2-3, equipped with the advanced microwave radiometer MTVZA-GYa (Microwave Atmospheric Temperature and Humidity Sounding Module, GYa — in memory of G. Ya. Gus'kov (1918–2002)), are discussed. The satellite was launched on June 27, 2023, from the Vostochny Cosmodrome into a circular sun-synchronous orbit at an altitude of 830 km. The radiometer's 40 channels measure Earth's outgoing radiation at frequencies ranging from 6 to 190 GHz. The swath width during conical scanning at an angle of 65° to the local normal is 1,750 km. Internal calibration to correct for variations in the gain coefficients of the MTVZA-GYa channels is performed on each scan. External calibration based on calculated brightness temperatures over homogeneous “hot” (tropical rainforests of the Amazon) and “cold” (the Southern Ocean under low wind and clear-sky conditions) reference areas ensures the conversion of measured antenna temperatures to brightness temperatures. Brightness temperature fields at various frequencies in vertical and horizontal polarizations were constructed in Mercator and polar projections. These fields provide insights into sea surface temperature, land and vegetation cover, wind speed over the ocean surface, and sea ice distribution in the Northern and Southern Hemispheres, as well as regions of intense cloudiness and precipitation in tropical and temperate latitudes. In interpreting MTVZA-GYa data, measurements from the satellite radiometer AMSR2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) were utilized. Observations at the new MTVZA-GYa frequencies show promise for detecting low liquid water content cloud cover over the ocean, as well as areas of deep convection and precipitation over both ocean and land.

Keywords: Meteor-M No. 2-3, microwave radiometer MTVZA-GYa, modeling, brightness temperature, global fields, deep convection, precipitation, Arctic, Antarctic, AMSR2, calibration, radio-frequency interferences

Accepted: 05.12.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-315-326

References

1. Barsukov I. A., Nikitin O. V., Streltsov A. M., Cherny I. V., Chernyavsky G. M., Preliminary data processing of microwave radiometer MTVZA-GY based on spacecraft “Meteor-M” No. 1, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, V. 8, No. 2, pp. 257–263 (in Russian).
2. Boldyrev V. V., Gorobets N. N., Il'gasov P. A., Nikitin O. V., Pantsov V. Yu., Prokhorov Yu. N., Strelnikov N. I., Streltsov A. M., Cherny I. V., Chernyavsky G. M., Yakovlev V. V., Satellite microwave scanner/sounder MTVZA-GY, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Iss. 5, V. 1, pp. 243–248 (in Russian).
3. Gabrielyan D. D., Demchenko V. I., Zanin K. M. et al., Principle of construction of the antenna system of the radar complex of Meteor-M No. 2-3, 2-4 satellites and verification of its characteristics in orbit, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 2, pp. 73–85 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-73-85.
4. Kuleshov V. P., Mitnik L. M., Mitnik M. L., Global fields of the Earth's brightness temperature in the frequency range 10–190 GHz as measured from satellites Meteor-M No. 2 and 2-2, *Trudy Voenno-kosmicheskoi akademii imeni A. F. Mozhaiskogo*, Iss. 674. Problemy voenno-prikladnoi geofiziki i kontrolya sostoyaniya prirodnoi sredy, 2020, pp. 223–228 (in Russian).
5. Mitnik L. M., Mitnik M. L., Calibration and validation as prerequisite components of satellite microwave radiometer measurements from Meteor-M No. 2 series satellites, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, V. 13, No. 1, pp. 95–104 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-95-104.

6. Mitnik L. M., Baraniuk A. V., Mitnik M. L., Typhoon Hinnamnor (2022): Impact on the Far Eastern seas, Primorsky and Khabarovsk Krai based on active and passive microwave sensing data from space, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 6, pp. 336–345 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-336-345.
7. Streltsov A. M., Nikitin O. V., Barsukov I. A., Cherny I. V., Chernyavsky G. M., Radio-frequency interference affecting the MTVZA-GY microwave radiometer data of spacecraft “Meteor-M”, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, V. 9, No. 2, pp. 181–184 (in Russian).
8. Chernyavsky G. M., Domestic technology of satellite microwave radiometry, *Aehrokosmicheskii kur'er*, 2007, No. 6, pp. 22–24 (in Russian).
9. Chernyavsky G. M., Mitnik L. M., Kuleshov V. P. et al., Microwave sensing of the ocean, atmosphere and land surface from Meteor-M No. 2 data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 4, pp. 78–100 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-78-100.
10. Chernyavsky G. M., Mitnik L. M., Kuleshov V. P. et al., Brightness temperature modeling and first results derived from the MTVZA-GY radiometer of the Meteor-M No. 2-2 satellite, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, V. 17, No. 3, pp. 51–65 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-51-65.
11. Barsukov I., Cherniavsky G., Cherny I. V. et al., New Russian meteorological satellite Meteor-M N 2: Sensing of the subsurface, surface and atmospheric characteristics by MTVZA-GY microwave imager/sounder, *2016 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS), Beijing, China*, 2016, pp. 5528–5531, DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7730442.
12. Chen R., Bennartz R., Sensitivity of 89–190-GHz microwave observations to ice particle scattering, *J. Applied Meteorology and Climatology*, 2020, V. 59, No. 7, pp. 1195–1215, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0293.1>.
13. Cherny I. V., Mitnik L. M., Mitnik M. L. et al., On-orbit calibration of the “Meteor-M” microwave imager/sounder, *2010 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS), Honolulu, HI, USA*, 2010, pp. 558–561, DOI: 10.1109/IGARSS.2010.5651139.
14. Cherny I. V., Chernyavsky G. M., Mitnik L. M. et al., Advanced microwave imager/sounder MTVZA-GY-MP for new Russian meteorological satellite, *2017 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS), Fort Worth, TX, USA*, 2017, pp. 1220–1223, DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8127178.
15. Mitnik L. M., Mitnik M. L., Zabolotskikh E. V., Microwave sensing of the atmosphere-ocean system with ADEOS-II AMSR and Aqua AMSR-E, *J. Remote Sensing Soc. of Japan*, 2009, V. 29, No. 1, pp. 156–165.
16. Mitnik L. M., Mitnik M. L., Chernyavsky G. M., Cherny I. V., Vykochko A. V., Pichugin M. K., Zabolotskikh E. V., Sea surface wind and Sea ice in the Barents Sea using microwave sensing data from “Meteor-M” N 1 and GCOM-W1 satellites in January–March 2013, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, V. 52, No. 9, pp. 1041–1050.
17. Mitnik L., Kuleshov V., Mitnik M. et al., Microwave scanner sounder MTVZA-GY on new Russian meteorological satellite Meteor-M No. 2: modeling, calibration and measurements, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, V. 10, No. 7, pp. 3036–3045, DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2695224.
18. Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L. et al., Microwave radiometer MTVZA-GY on new Russian satellite Meteor-M No. 2-2 and sudden stratospheric warming over Antarctica, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, V. 15, pp. 820–830, DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3133425.
19. Zabolotskikh E. V., Mitnik L. M., Chapron B., Radio-frequency interference identification over oceans for C- and X-band AMSR2 channels, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, V. 12, No. 8, pp. 1705–1709, DOI: 10.1109/LGRS.2015.2420120.