Моделирование яркостной температуры и первые результаты, полученные микроволновым радиометром МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 2-2

Г. М. Чернявский¹, Л. М. Митник², В. П. Кулешов², М. Л. Митник², А. М. Стрельцов¹, Г. Е. Евсеев¹, И. В. Черный¹

¹ ОАО «Российские космические системы», Москва, 117997, Россия E-mail: icherny@cpi.space.ru ² Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН Владивосток, 690041, Россия E-mail: mitnik@poi.dvo.ru

Рассмотрены технические характеристики микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ на метеорологическом спутнике «Метеор-М» № 2-2, запущенном на солнечно-синхронную круговую орбиту высотой 830 км 5 июля 2019 г. Радиометр принимает уходящее излучение Земли на частотах v в диапазоне 5–200 ГГц при сканировании по конусу под углом 65° к местной нормали. Рассмотрены экспериментальные данные о вариациях температуры горячей согласованной нагрузки, которые вместе с измерениями реликтового излучения используются при внутренней калибровке радиометра. Внутренняя калибровка проводится на каждом скане, что обеспечивает коррекцию вариаций коэффициента усиления и представление данных в шкале антенных температур $T_{a}^{B,\Gamma}(v)$ на вертикальной (В) и горизонтальной (Г) поляризациях. Выпол-нены расчёты спектров яркостных температур $T_{g}^{B,\Gamma}(v)$ уходящего излучения Земли на каналах радиометра МТВЗА-ГЯ. В качестве входных данных взяты радиозондовые вертикальные профили давления, температуры и влажности атмосферы, профили водности облаков, значения температуры и солёности воды и коэффициенты излучения различных земных покровов. С использованием $T_{g}^{B,\Gamma}(v)$ выполнена внешняя калибровка МТВЗА-ГЯ на частотах имаджера. Приведены глобальные поля $T_{g}^{B,\Gamma}(v)$ Земли на нисходящих (ширина полосы обзора L = 1500 км) и восходящих (L = 2500 км) витках. Поля $T_{g}^{B,\Gamma}(\nu)$ на вертикальной и горизонтальной поляризациях дают представление о температуре поверхности океана и скорости приводного ветра, интегральном содержании в атмосфере водяного пара, капельной облачности и осадков, характеристиках циклонов, фронтов и атмосферных рек над океаном, распределении морских льдов и свойствах ледяных щитов Антарктиды и Гренландии, температуре земных и растительных покровов и др. В связи с планируемыми запусками последующих спутников серии «Метеор-М» № 2 подчёркнута необходимость совершенствования моделирования яркостной температуры, разработки алгоритмов восстановления параметров, проведения калибровки радиометров и валидации продуктов. Данные измерений и продукты должны быть доступны для пользователей в нашей стране и за рубежом.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, микроволновая радиометрия, моделирование, калибровка, МТВЗА-ГЯ, «Метеор-М» № 2-2, глобальные поля яркостных температур, водяной пар, облачность, осадки

Одобрена к печати: 28.04.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-51-65

Введение

Спутник «Метеор-М» № 2-2, запущенный с космодрома «Восточный» 5 июля 2019 г. на солнечно-синхронную орбиту высотой 830 км, продолжил измерения гидрометеорологических и гелиогеофизических параметров, начатые в июле 2014 г. со спутника «Метеор-М» № 2 (Чернявский и др., 2018; Mitnik et al., 2017). Получение сведений о различных слоях атмосферы и подстилающей поверхности осуществляет усовершенствованный многоканальный сканирующий микроволновый (МВ) радиометр МТВЗА-ГЯ (модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы, назван в память о выдающемся конструкторе космических приборов Г.Я. Гуськове). Радиометр принимает уходящее излучение Земли на 22 частотах (v) в диапазоне 6,9–190 ГГц, интегрируя тем самым функции имаджера и зондировщика. Антенна МТВЗА-ГЯ сканирует Землю по конусу под углом 65° к местной нормали в полосе шириной 1500–2500 км. Измерения на частотах 42,0 и 48,0 ГГц впервые были применены на спутнике «Метеор-М» № 2, что улучшило индикацию облаков с малым водозапасом. Для улучшения оценок температуры поверхности океана и интенсивности дождя, а также регистрации радиочастотных помех в МТВЗА-ГЯ на спутнике «Метеор-М» № 2-2 были добавлены каналы на частоте 6,9 ГГц.

В статье приведены и проанализированы глобальные поля яркостных температур $T_{\rm g}(v)$ на частотах имаджера 6,9 ГГц; 10,65; 18,7; 23,8; 31,5; 36,5; 42,0; 48,0 и 91,65 ГГц на вертикальной (В) и горизонтальной (Г) поляризациях. Измерения $T_{\rm g}$ на этих частотах используются для восстановления параметров и изучения явлений в Мировом океане (приводный ветер, температура поверхности воды, морской лёд), в атмосфере (паросодержание атмосферы, водозапас облаков, осадки, внетропические и тропические циклоны, атмосферные реки), в ледяных щитах Антарктиды и Гренландии, в материковых и растительных покровах (температура и влажность поверхности и др.). Параметры поверхности и атмосферы, восстановленые по данным имаджера и зондировщика, могут быть использованы как в оперативном режиме в Федеральной службе по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Роскомгидромет) и Министерстве Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС), так и при изучении изменчивости регионального и глобального климата.

Микроволновый радиометр МТВЗА-ГЯ

Основные технические характеристики МТВЗА-ГЯ приведены ниже. Более подробно функциональные и технические параметры прибора и схема сканирования рассмотрены в работах (Барсуков и др., 2009, 2010; Успенский и др., 2016; Чернявский и др., 2018).

Технические характеристики МТВЗА-ГЯ

Диапазон частот	. 6,9 ГГц; 10,6; 18,7; 23,8; 31,5; 36,5; 42,0; 48,0; 52–57; 91,6;176–190 ГГц
Апертура антенны	. 0,65 м
Пространственное разрешение	. 16—137 км
Ширина полосы обзора	. 1500—2500 км
Сканирование	. коническое, круговое
Режим работы	. непрерывный
Период сканирования	. 2,5 c
Чувствительность	. 0,3–1,7 К/пиксель
Поток данных	. 35 Кбит/с
Объём запоминающего устройства	. 1 Гбайт
Масса	. не более 94 кг
Потребление	. не более 80 Вт

Бортовая калибровка каналов радиометра МТВЗА-ГЯ для определения шкалы антенной температуры проводится вне рабочего сектора на каждом периоде сканирования. Блок калибровки обеспечивает измерение интенсивности излучения двух согласованных нагрузок с известными «горячей» и «холодной» яркостными температурами $T_{\rm g}$. Горячей нагрузкой служит бортовой калибратор — имитатор абсолютно чёрного тела, яркостная температура которого находится в пределах 240–300 K, а холодной — реликтовое излучение с $T_{\rm g} = 2,73$ K, которое принимается калибровочной антенной, ориентированной в космическое пространство (Барсуков и др., 2009, 2010).

В предположении линейности калибровочной функции, функции перехода от выходных сигналов U_c^i к антенной температуре T_a^i (*i* — индекс канала радиометра), величину T_a^i для каждого пикселя в рабочем секторе можно найти по выражению:

$$T_{\rm a}^{i} = \left(\overline{T_{\rm r}} - T_{\rm x}\right) \frac{U_{\rm c}^{i} - U_{\rm x}^{i}}{\overline{U_{\rm r}^{i} - U_{\rm x}^{i}}} + T_{\rm x},\tag{1}$$

где $T_r = \varepsilon t_r$ — яркостная температура горячей нагрузки, К; ε — коэффициент излучения калибратора ($\ge 0,999$); t_r — физическая температура калибратора, К; $T_x = 2,73$ К — яркостная температура «холодной» нагрузки (реликтового излучения).

Для уменьшения погрешности внутренней калибровки величины T_r^i , U_r^i , U_x^i и их разности в выражении (1) усредняются на *m* последовательных сканах. Величина *m* уточняется в период лётных испытаний и составляет 10 < m < 60.

В качестве примера на *рис. 1* приведены записи калибровочных сигналов МТВЗА-ГЯ в канале 183,31 \pm 7,0 ГГц для трёх витков космического аппарата (КА) «Метеор-М» № 2-2 за 6 августа 2019 г. При переходе с солнечной стороны орбиты на теневую физическая температура калибратора меняется от -27 до -31 °C, а его яркостная температура — от 246 до 242 К. Яркостная температура космического пространства на всех витках регистрируется на уровне реликтового излучения 2,73 К, которое изотропно и стабильно. Согласно измерениям (Кардашев, Струков, 1987), вариации излучения не превышают $\pm 0,1$ мК (http://aether.lbl.gov/ www/projects/cobe/COBE_home/cobe_home.html). Приращения в пределах 3–8 мК отмечаются при пересечении Млечного Пути, но из-за малости по сравнению с собственными шумами сверхвысокочастотного радиометра их вклад можно не учитывать.

Погрешность измерений физической температуры калибратора составляет менее 0,05 °С. Поэтому погрешность (стабильность) яркостной шкалы определяется в основном величиной «шумовой дорожки» радиометра при соответствующей постоянной времени и для всех каналов МТВЗА-ГЯ не превышает 1 К (Барсуков и др., 2010; Чернявский и др., 2018; Успенский и др., 2016). Таким образом, в соответствии с выражением (1) яркостная шкала радиометра МТВЗА-ГЯ привязана к уровню реликтового космического излучения, и, следовательно, в этом случае можно говорить об абсолютной стабильности проводимых радиометрических измерений (см. *рис. 1*).

В действительности зависимость (1) нелинейна из-за наличия в тракте радиометра квадратичного детектора. Погрешность, обусловленная нелинейностью, является, однако, систематической и не превышает 0,4 К. Ей, как правило, можно пренебречь, поскольку случайная погрешность измерений $T_{\rm s}$ равна 0,5–1,5 К/пиксель, а систематическая погрешность абсолютной калибровки бортовых MB-радиометров составляет 2–3 К (Hollinger et al., 1990; Rosenkranz, 2001). Впервые нелинейная процедура была применена при внутренней калибровке радиометра ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder) на спутнике SNPP (Suomi National Polar-Orbiting Partnership) — зарубежного аналога MTB3A-ГЯ (Weng et al., 2013).

В период лётных испытаний КА «Метеор-М» № 2-2 параметры диаграммы направленности антенны (ДНА) и каналов радиометра были оценены по данным уникальной процедуры лимбовых измерений. При этом орбитальная ориентация КА была изменена на нескольких витках так, чтобы рабочий сектор сканирования захватывал частично и Землю, и космическое пространство.

Рис. 1. Опорные калибровочные сигналы радиометра МТВЗА-ГЯ в канале 183,31±7,0 ГГц по измерениям КА «Метеор-М» № 2-2 на 452-м, 453-м и 454-м витках 6 августа 2019 г.: физическая температура калибратора (*a*); яркостная температура калибратора (*б*) и космоса (*в*). Регистрограммы получены при постоянной времени $\tau = 30$ мс. Дисперсия шумов на горячей нагрузке равна 0,37 К, что соответствует чувствительности радиометрического канала 0,065 К при $\tau = 1$ с и 0,45 К/пиксель



Анализ изменения сигналов при пересечении диска планеты, радиогоризонта и холодного космоса позволяет оценить ширину главного лепестка ДНА, её потоковую эффективность и уровень боковых лепестков (Веселов и др., 1981), а также погрешность внутренней калибровки шкалы антенных температур (Барсуков и др., 2010; Чернявский и др., 2018). Методика оценки характеристик радиометра на орбите, основанная на манёвре КА, применялась для MB-сканеров AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer, спутник Aqua), TMI (Trimble Mobile Imaging, TRMM), SSMIS (Special Sensor Microwave Imager, DMSP) и WindSat (Coriolis) (Imaoka et al., 2003; Jones et al., 2006; Wentz et al., 2001).

При высоте орбиты 830 км, на которой функционируют спутники серии «Метеор-М», ширина полосы обзора МТВЗА-ГЯ *L* может быть ≥ 2000 км (Чернявский и др., 2018). Однако подвижные элементы конструкции КА и солнечные панели частично затеняют поле обзора на большей части орбиты. Так, для КА «Метеор-М» № 2, который находится на солнечно-синхронной утренней орбите (время пересечения экватора $t_{3\kappa B} = 09:00$), ширина полосы L = 1500 км. КА «Метеор-М» № 2-2 выведен на послеполуденную орбиту с $t_{3\kappa B} = 15:00$. При этом положение Солнца относительно плоскости орбиты спутника таково, что при заданной циклограмме движения солнечных панелей затенение полей обзора происходит лишь на нисходящих витках и L = 1500 км, тогда как на восходящих витках она достигает 2500 км. Пример суточной съёмки Земли на нисходящих и восходящих витках при *L*, равной 1500 и 2500 км соответственно, приведён на *рис. 2*.



Рис. 2. Яркостная температура Земли на частоте 31,5 ГГц на горизонтальной поляризации по измерениям радиометра МТВЗА-ГЯ 30 сентября 2019 г. на нисходящих (*a*) и восходящих (*б*) витках. Ширина полосы обзора: 1500 км (*a*) и 2500 км (*б*)

Программа лётных испытаний КА «Метеор-М» № 2-2 была успешно завершена, и в ноябре 2019 г. он был принят в эксплуатацию. В декабре из-за столкновения с микрометеоритом ориентация спутника была потеряна. В январе 2020 г. он возобновил работу в штатном режиме.

Моделирование

Моделирование яркостных температур уходящего излучения Земли $T_{g}(v)$ над различными типами поверхности и при разном состоянии атмосферы необходимо для решения таких задач, как внешняя калибровка, разработка алгоритмов восстановления геофизических параметров, оценка характеристик прибора в полёте и др. (Митник, Митник, 2011, 2016; Чернявский и др., 2018; Mitnik, Mitnik, 2003; Mitnik et al., 2017). Входной информацией при моделировании служат профили давления P(h), температуры T(h) и относительной влажности u(h) атмосферы, а также профили водности облаков $\omega(h)$.

Радиозондовые (р/з) данные находятся в свободном доступе на сайте Вайомингского университета, США (*анел*. University of Wyoming, http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.

html). Профили $\omega(h)$ конструируются на основе профилей u(h) и T(h) и экспериментальных данных о водности различных типов облаков. При моделировании $T_{g}^{B,\Gamma}(v)$ над океаном коэффициенты излучения $\varkappa^{B,\Gamma}(v)$ находятся по диэлектрической проницаемости солёной воды (Meissner, Wentz, 2004), значениям температуры T_0 и солёности S_0 , скорости ветра W и эмпирическим зависимостям приращений коэффициентов излучения $\Delta \varkappa^{B,\Gamma}(v, W)$, вызванных действием ветра (Meissner, Wentz, 2012). Зависимости яркостной температуры гладкой (при W = 0 м/с) поверхности океана $T_{gok}^{B,\Gamma}(v)$ от температуры поверхности воды T_0 на частотах имаджера МТВЗА-ГЯ (*puc. 3*) хорошо аппроксимируются полиномами второго порядка, используемыми в алгоритмах восстановления геофизических параметров над океаном.



Рис. 3. Зависимость яркостной температуры гладкой поверхности океана от температуры воды на частотах МТВЗА-ГЯ на горизонтальной (*a*) и вертикальной (*б*) поляризациях. Цифры у кривых соответствуют следующим частотам: 1 — 6,9 ГГц; 2 — 10,65; 3 — 18,7; 4 — 23,8; 5 — 31,5; 6 — 36,5; 7 — 42,0; 8 — 48,0 и 9 — 91,65 ГГц

Пример расчётных спектров яркостных температур $T_{g}^{B,\Gamma}(v)$ уходящего излучения Земли при ясном небе над холодным океаном ($T_{0} = 0$ °C) приведён на *рис.* 4. В качестве входных данных взяты вертикальные профили давления, температуры и относительной влажности, измеренные радиозондом, выпущенным в 12:00 GMT 20 сентября 2019 г. с научно-исследовательской станции 89062 Rothera (*англ.* Rothera Research Station, 67,57° ю.ш., 68,13° з.д., высота над уровнем моря — 16,0 м).



Рис. 4. Спектры яркостных температур системы «атмосфера – океан» (1, 2), океана (3, 4, пунктир) и излучения океана на верхней границе атмосферы (5, 6) на вертикальной (1, 3, 5, красные линии) и горизонтальной (2, 4, 6, синие линии) поляризациях. Температура поверхности воды: –1,8 °С, паросодержание атмосферы: 5,7 кг/м², скорость ветра: 2 м/с. Чёрные стрелки отмечают положение границ частот каналов имаджера, а фиолетовые — каналов зондировщика

При моделировании наблюдений над земными покровами задаются значения $\varkappa^{B,\Gamma}(\nu)$ для леса, пустынь, материковых и морских льдов и других типов покровов (Митник, Митник, 2016; Mitnik, 2003; Prakash et al., 2016).

Внешняя калибровка

В качестве холодной калибровочной области $T_{g}^{B,\Gamma}(v)$ выбирались безоблачные районы Южного океана при слабом ветре (W < 3 м/с) и минимальном паросодержании атмосферы. Горячей калибровочной областью служили влажные широколиственные леса Амазонии (Митник и др., 2019; Mitnik et al., 2017, 2018а). Облака с малым водозапасом определялись над океаном по положительным относительно фона приращениям сигналов на частотах 36,5; 42,0 и 91,65 ГГц на Г-поляризации. Над лесами Амазонки приращения сигналов, вызванные большинством типов облаков, малы. Зоны мощной облачности и осадков, особенно интенсивных, выделялись по отрицательным относительно фона приращениям на частотах v > 40 ГГц, включая 183,31±7 ГГц. Витки с отмеченными особенностями при внешней калибровке не использовались.

В результате внешней калибровки для всех каналов имаджера были получены коэффициенты в уравнениях линейной регрессии для расчёта яркостных температур $T_{s}^{B,\Gamma}(v_{i})$ по антенным температурам T_{a} (отсчётам $n(v_{i})$). Предполагалось, что зависимости $T_{s}(v_{i})$ от сигналов на входе $n(v_{i})$ могут быть аппроксимированы линейными функциями, а погрешности расчётных значений яркостных температур по р/з-профилям над выбранными тестовыми областями могут быть снижены при регулярном проведении калибровок и наличии дополнительной информации (Митник, Митник, 2016).

Обозначение канала	Центральная частота $v_0 = 57,2903 \ (\Gamma \Gamma \mu)$	Ширина полосы (МГц)	Поляризация	Чувствительность (К/пиксель)	Высота максимума весовой функции (км)
01	52,8	400	V	0,4	2
02	53,3	400	V	0,4	4
O3	53,8	400	V	0,4	6
O4	54,64	400	V	0,4	10
05	55,63	400	V	0,4	14
06	$v_0 \pm 0,3222 \pm 0,10$	50	Н	0,4	20
07	$\nu_0 \pm 0,3222 \pm 0,05$	20	Н	0,7	25
08	$v_0 \pm 0,3222 \pm 0,025$	10	Н	0,9	29
09	$v_0 \pm 0,3222 \pm 0,010$	5	Н	1,3	35
O10	$v_0 \pm 0,3222 \pm 0,005$	3	Н	1,7	42
HO1	183,31±7,0	1500	V	0,5	1,5
HO2	183,31±3,0	1000	V	0,6	2,9
HO3	183,31±1,4	500	V	0,8	4,7

Характеристики каналов зондировщика МТВЗА-ГЯ

Для внешней калибровки каналов зондировщика (частоты и другие характеристики каналов приведены в *таблице*) могут быть взяты расчётные яркостные температуры обширных зон (размером примерно 15×15 градусов широты) с максимальными и минимальными значениями T_a . Такие зоны наблюдались, в частности, во время внезапных стратосферных потеплений (Sudden Stratospheric Warming — SSW), зарегистрированных МТВЗА-ГЯ как над Северным полушарием (Mitnik et al., 2018с), так и над Южным вскоре после запуска спутника. Потепление стратосферы в Южном полушарии является крайне редким явлением, воздействующим на цир-

куляцию атмосферы, распределение электронов в ионосфере, концентрацию озона и других примесных газов. Потепление началось в конце августа над Антарктидой (Lewis, 2019; Yamazaki et al., 2020) и было обнаружено на каналах зондировщика МТВЗА-ГЯ (Митник и др., 2019).

Высота подъёма радиозондов $h_{\text{макс}}$, как правило, не превышает 25 км, что вполне приемлемо для расчёта T_{g} на частотах имаджера, так как вклад в T_{g} слоёв атмосферы выше 20–25 км пренебрежимо мал по сравнению с шумами радиометра. На частотах зондировщика (см. *maблицу*) заметная часть излучения формируется на высотах $h > h_{\text{макс}}$. Оценки показывают, что использование средних стандартных профилей P(h) и T(h) для достройки р/з-профилей от $h_{\text{макс}}$ до h = 50-60 км может привести к существенным ошибкам в значениях и T_{g} , и калибровочных коэффициентов на каналах O1–O10. Поэтому для расчёта $T_{\text{g}}(v)$ на каналах O1–O10 вертикальные профили P(h) и T(h) в стратосфере могут быть взяты или из данных реанализа, или из р/з-части и данных реанализа. Ориентация на реанализ вполне оправданна, поскольку плотность р/з-станций в полярных, горных и пустынных районах мала, а точность данных реанализа постоянно растёт.

Глобальные поля яркостных температур

Глобальные поля яркостных температур $T_{g}(v)$ дают наглядное представление о разномасштабной пространственной изменчивости метеорологических и гидрологических полей и о структуре различных явлений в атмосфере и на поверхности. Поля $T_{g}(v_{i})$ служат основой для оценки скорости и направления перемещения воздушных и водных масс, для исследования возникновения и эволюции тропических, внетропических и полярных циклонов, холодных вторжений и атмосферных рек, формирования и развития облачности, осадков и зон штормовых ветров, становления и развития ледяного покрова и др., динамики температуры и влажности подстилающей поверхности и наводнений, а также других природных явлений.

Ниже приведены примеры глобальных полей яркостных температур на нескольких частотах имаджера. Измерения МТВЗА-ГЯ были выполнены в 2019–2020 гг. Переход от антенных температур к яркостным осуществлён по предварительным значениям калибровочных коэффициентов. При интерпретации изменчивости $T_{g}(v_{i})$ использованы результаты моделирования и материалы анализа полей AMSR-E и AMSR2 на близких и совпадающих с МТВЗА-ГЯ частотах (Чернявский и др., 2018; Mitnik et al., 2009, 2017).

Вариации полей $T_{\rm g}$ на частотах 6,9 и 10,65 ГГц на В- и Г-поляризациях отображают пространственную изменчивость температуры поверхности океана и скорости приводного ветра, выявляют структуру атмосферных фронтов в циклонах Северного и Южного полушарий, мощной облачности и осадков во внутритропической зоне конвергенции (ВЗК) и в других погодных системах (*puc. 5*).



Рис. 5. Изменчивость яркостной температуры на частоте 10,65 ГГц на горизонтальной (*a*) и вертикальной (*б*) поляризациях, обусловленная вариациями температуры поверхности воды, скорости приводного ветра, водозапаса облаков и интенсивности осадков по измерениям МТВЗА-ГЯ над океаном на восходящих витках 7 октября 2019 г.

Чтобы выделить приращения яркостной температуры на v = 10,65 ГГц на Г-поляризации $T_{\rm q}(10\Gamma)$, вызванные воздействием ветра, влияющим на коэффициент излучения поверхности воды (Meissner, Wentz, 2012), верхний предел $T_{\rm q}$ был взят равным 100 К. В результате в областях циклонической деятельности хорошо видна изменчивость поля приводного ветра. Полосы осадков и облаков с водозапасом Q > 0,5 кг/м² также вызывают рост $T_{\rm q}$. На *рис. 5a* они прорисовывают атмосферные фронты в циклонах и атмосферные реки (область 1 на *рис. 5a*, δ) в Южном и Северном полушариях (Ralph et al., 2017), тайфун Хагибис (*англ.* Наgibis, 2 на *рис. 5a*, δ), ВЗК (3 на *рис. 5a*, δ) в Тихом и Индийском океанах. В то же время материковые покровы, морской лёд, ледяные щиты Гренландии и Антарктиды, яркостная температура которых намного превышает 100 К, отображаются на рисунке однородным коричневым тоном.

Вклад ветра в вариации $T_{\rm g}$ на В-поляризации значительно меньше, чем на горизонтальной, но отчётливо выражено влияние температуры поверхности океана (ТПО) (см. *рис. 56*), о чём свидетельствует зеленовато-желтоватый тон тропических и субтропических районов океана, где $T_0 \ge 20$ °C. Верхний предел $T_{\rm g}(10B)$ взят равным 180 K, и поэтому вариации яркостной температуры суши не видны. Яркостная температура морских льдов вокруг Антарктиды выше этого порога, а материковых льдов Восточной Антарктиды не превышает 150 К. $T_{\rm g}(10B)$ части ледяного щита Гренландии (лето) выше, чем ледяного покрова Восточной Антарктиды.





Рис. 6. Яркостная температура на частотах 23,8 ГГц (*a*, б) и 42,0 ГГц (*b*, *c*) на горизонтальной (*a*, *b*) и вертикальной (*б*, *c*) поляризациях по измерениям радиометра МТВЗА-ГЯ 7 октября 2019 г. со спутника «Метеор-М» № 2-2

Чувствительность яркостной температуры к вариациям паросодержания атмосферы V и водозапаса облаков Q растёт с частотой. В полях яркостной температуры на частотах 23,8 и 42,0 ГГц отчётливо видны области повышенного паросодержания атмосферы в тропической зоне, высокие меридиональные градиенты $V(puc. \, ba, \, b)$, облачность и осадки в B3K, в цикло-

нах умеренных и высоких широт обоих полушарий (*рис. бв, г*). Значения V в тропической зоне океана достигают 55–60 кг/м², а минимальные показатели (3–10 кг/м²) отмечаются в Южном полушарии вокруг окружающего Антарктиду пояса морских льдов. Значения V заметно выше фоновых и в области атмосферных рек (1 на *рис. 6*), которые являются характерной особенностью циркуляции атмосферы в обоих полушариях (Ralph et al., 2017). Влияние изменчивости паросодержания атмосферы на яркостную температуру на Г- и В-поляризациях наиболее заметно на частоте v = 23,8 ГГц, расположенной в области резонансного поглощения водяного пара (см. *рис. 6a, б*). В поле V на фоне низких значений отчётливо визуализируются атмосферные фронты циклонов синоптического масштаба, где значения водозапаса облаков возрастают до 0,5–1,0 кг/м² и выпадают осадки. Обусловленные вариациями капельной воды приращения T_{g} ярко выражены на v = 42,0 ГГц (см. *рис. 6в, г*). Пространственное разрешение микроволновых данных возрастает с увеличением частоты зондирования.

На частоте 42,0 ГГц эффекты роста поглощения в облаках и осадках, а также улучшения разрешения проявляются в полях T_{g} заметнее, чем на более низких частотах, что следует как из результатов численных экспериментов, так и из сравнения *puc. 6в, г и puc. 5.* В структуре циклонов, тайфуна Хагибис (2 на *puc. 5, 6*) и облачности B3K (3 на *puc. 5, 6*) стали видны детали, которые не просматриваются в полях T_{g} на более низких частотах. Лучшей индикации облачности и осадков способствует и выбор $T_{g \text{ макс}}(42\Gamma) = 240$ K, при котором лучше видны вариации яркостной температуры над океаном, а вариации T_{g} материковых покровов срезаны. При изменении $T_{g \text{ мин}}$ и $T_{g \text{ макс}}$ вариации T_{g} над сушей, обусловленные изменением температуры поверхности и коэффициентов излучения покровов, различаются лучше.

С ростом частоты яркостная температура атмосферы и поверхности во всё большей степени зависит от эффектов рассеяния излучения на частицах: каплях дождя, града и обводнённого града, снега (фирна), которые вызывают уменьшение $T_{\rm s}$, особенно на вертикальной поляризации. Из совместного анализа полей $T_{\rm s}$ на *puc*. 5–7 и синоптических карт следует, что осадки над океаном и сушей (в экваториальной Африке, на островах Индонезии, в Центральной и Южной Америке) выпадают в атмосферных фронтах внетропических и тропических циклонов, в B3K и атмосферных реках. На *puc*. 7 осадки проявляются в виде пятен и протяжённых образований, яркостная температура которых на v = 91,65 ГГц и особенно на $v = 183,31\pm7$ ГГц существенно ниже, чем у фона.



Рис. 7. Яркостная температура на вертикальной поляризации на частоте 91,65 ГГц (*a*) и 183,31±7 ГГц (*б*) по измерениям МТВЗА-ГЯ на восходящих витках 11 октября 2019 г.

На частотах имаджера хорошо отображается распределение морских льдов вокруг Антарктиды. Коэффициенты излучения льда $\varkappa_n(v)$ намного больше, чем у морской воды $\varkappa_B(v)$. Поэтому, хотя температура поверхности льда $T_n < T_0$, измеряемая со спутника яркостная температура льда заметно выше T_g океана, особенно на Г-поляризации, что иллюстрирует изображение Южной полярной области Земли зимой (*puc. 8*, см. с. 60). Яркостная температура шельфовых ледников в море Росса (1 на *puc. 8*) и в море Уэдделла (2 на *puc. 8*) меньше, чем солёных морских льдов. Минимальные значения $T_{g}(v)$ отмечаются на высотах H > 2-3 км в Восточной Антарктиде, где на протяжении года температура воздуха у поверхности и температура 10-метрового верхнего слоя фирна, определяющие интенсивность уходящего излучения (Surdyk, 2002), намного ниже, чем в Западной Антарктиде.



Рис. 8. Южная полярная область Земли зимой по измерениям радиометра МТВЗА-ГЯ на горизонтальной поляризации 8 августа 2019 г. на частоте 36,5 ГГц (*a*) и 12 августа 2019 г. на частоте 23,8 ГГц (*б*). 1 — море Уэдделла; 2 — море Росса; 3 — Южная Америка



Рис. 9. Микроволновые изображения Северного Ледовитого океана и Гренландии, полученные на горизонтальной поляризации на частотах 10,6 ГГц (*a*, *e*) и 42,0 ГГц (*б*, *d*) 7 августа (*a*, *б*) и 23 августа (*b*, *d*) 2019 г.

Характерной особенностью Южного океана является интенсивное взаимодействие с атмосферой, что связано с высокими скоростями ветра в циклонах, круглый год опоясывающих Антарктиду (Meteorology..., 1998). Фронты в циклонах и атмосферные реки визуализируются в полях яркостных температур, регистрируемых на частотах имаджера МТВЗА-ГЯ (Mitnik et al., 2018b). Чувствительность T_a к вариациям скорости ветра, содержания в атмосфере водяного пара и капельной воды в облаках меняется с частотой (см. *рис*. 5-8), что используется в алгоритмах восстановления параметров атмосферы и океана (Митник, Митник, 2011; Чернявский и др., 2018; Mitnik, Mitnik, 2003; Mitnik et al., 2009, 2018b). Особую актуальность имеют оценки потоков тепла, влаги и массы снега, выносимого на Антарктиду (Gorodetskaya атмосферными реками et al., 2014).

Контрасты $T_{\rm g}(v)$ между внутренними очень холодными и прибрежными областями отмечаются и в Гренландии (*puc. 9*). Амплитуда и пространственное распределение яркостных контрастов являются индикатором таяния снега: яркостная температура влажного снега заметно выше, чем сухого. Таяние наблюдается на больших площадях, что видно из сравнения MB-изображений Гренландии и морского льда на частотах 10,65 и 42,0 ГГц на Г-поляризации за 7 и 23 августа 2019 г. (см. *рис. 9*). 7 августа таяние наблюдалось в юго-западном секторе Гренландии и вдоль восточного побережья острова.

Обсуждение

Измерения микроволнового излучения Земли радиометром МТВЗА-ГЯ, начатые в августе 2019 г. с нового метеорологического о спутника «Метеор-М» № 2-2, выполнялись и в июне 2020 г. (на момент подготовки статьи) с перерывом с 18.12.2019 по 25.01.2020 из-за столкновения с микрометеоритом. Тестовые испытания завершены в ноябре 2019 г., и заказчик — Роскомгидромет — принял спутник в эксплуатацию. Сканирующий МВ-радиометр МТВЗА-ГЯ принимает восходящее излучение Земли на 31-м канале в диапазоне частот 6-190 ГГц, что позволяет получать в полосе шириной 1500–2500 км синхронную количественную информацию об океане, морских и материковых льдах, земных покровах, тропосфере и стратосфере при ежесуточном покрытии всей Земли. Два новых канала на v = 6,9 ГГц предназначены для восстановления изменчивости ТПО и скорости приводного ветра на масштабах >100 км и оценки влияния искусственных помех и факторов космического полёта на работу радиометра.

В полях яркостных температур $T_{g}(v)$ на частотах имаджера отображается структура атмосферных образований, температура и состояние подстилающей поверхности, распределение морских льдов. Индикация интенсивных погодных систем над океаном (внетропических и тропических циклонов, атмосферных рек и др.) обусловлена ростом T_{g} с увеличением скорости приводного ветра, паросодержания атмосферы, водозапаса облаков и интенсивности осадков. Приращение яркостных температур зависит от частоты и поляризации, что следует из совместного анализа глобальных полей $T_{g}(v)$ (см. *рис.* 5–9) и сопутствующей информации. Поля $T_{g}(v)$ были построены по данным предварительной внешней калибровки, основанной на численном интегрировании уравнения переноса MB-излучения над тестовыми областями. По данным MTB3A-ГЯ в первые месяцы после запуска была изучена эволюция нескольких циклонов, определена тепловая аномалия в ядре тайфунов, обнаружено крайне редкое явление — внезапное стратосферное потепление над Антарктидой, что демонстрирует высокий потенциал прибора (Митник и др., 2019).

Получение количественной информации о геофизических параметрах и контроль функционирования радиометра в полёте зависят от точности внутренней и внешней калибровки и результатов численного моделирования яркостных температур. Параметры подстилающей поверхности и атмосферы подвержены суточным, синоптическим и сезонным изменениям, что влияет на расчётные значения яркостных температур и на коэффициенты уравнений линейной регрессии, используемых для перехода от отсчётов к $T_{\rm s}$ (даже в предположении стабильной работы радиометра в космосе). Поэтому внешнюю калибровку следует выполнять на протяжении всего периода измерений радиометра и значительно чаще — на этапе лётных испытаний.

Важнейшими задачами на ближайшее время оказываются: оценка изменчивости калибровочных коэффициентов и стабильности функционирования МТВЗА-ГЯ в космосе, а также разработка и усовершенствование алгоритмов восстановления геофизических параметров с учётом опыта, накопленного при обработке данных МВ-радиометра на спутнике «Метеор-М» № 2.

Данные МТВЗА-ГЯ служат источником важной количественной двухмерной и трёхмерной информации о полях параметров атмосферы и земной поверхности и могут быть использованы как в оперативном режиме в организациях МЧС и Роскомгидромета, так и при изучении изменчивости регионального и глобального климата.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы № 11, регистрационный номер АААА-А17-117030110037-8.

Литература

- 1. Барсуков И.А., Болдырев В.В., 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. СВЧ-радиометр МТВЗА-ГЯ спутника «Метеор-М» № 1 // Всероссийская научно-техн. конф. «Актуальные проблемы ракетнокосмич. приборостроения и информац. технологий»: сб. тр. М.: Физматлит, 2009. С. 99–107.
- 2. *Барсуков И.А., Никитин О.В., Стрельцов А.М., Черный И.В.* Калибровка СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ // Космонавтика и ракетостроение. 2010. Вып. 1(58). С. 131–137.
- 3. Веселов В. М., Милицкий Ю. А., Мировский В. Г., Шарков Е. А., Эткин В. С. Экспериментальная методика определения параметров антенн радиотепловых бортовых комплексов // Исслед. Земли из космоса. 1981. № 2. С. 63–75.
- 4. *Кардашев Н.С., Струков И.А.* Спутниковый радиоастрономический эксперимент «Реликт» // Наука и человечество. М.: Знание, 1987. С. 173–185.
- 5. *Митник Л. М., Митник М. Л.* Алгоритм восстановления скорости приводного ветра по измерениям микроволнового радиометра AMSR-E со спутника Aqua // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 6. С. 34–44.
- 6. *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.
- 7. Митник Л. М., Кулешов В. П., Митник М. Л. Стрельцов А. М., Чернявский Г. М., Черный И. В. Моделирование яркостных температур и первые результаты, полученные микроволновым радиометром МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 2-2 // Материалы Семнадцатой Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 11–15 нояб. 2019. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 157.
- 8. Успенский А.Б., Асмус В.В., Козлов А.А., Крамчанинова Е.К., Стрельцов А.М., Чернявский Г.М., Черный И.В. Абсолютная калибровка каналов атмосферного зондирования спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 5. С. 57–70.
- 9. Чернявский Г. М., Митник Л. М., Кулешов В. П., Митник М. Л., Черный И. В. 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.
- Gorodetskaya I. V., Tsukernik M., Claes K., Ralph M. F., Neff W. D., Van Lipzig N. P. M. The role of atmospheric rivers in anomalous snow accumulation in East Antarctica // Geophysical Research Letters. 2014. V. 41. DOI: 10.1002/2014GL060881.
- 11. *Hollinger J. P., Pierce J. L., Poe G.A.* SSM/I instrument and evaluation // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1990. V. 28. No. 5. P. 781–790.
- 12. *Imaoka K., Fujimoto Y., Kachi M., Takishima T., Shiomi K., Mikai H., Mutoh T., Yoshikawa M., Shibata A.* Post-launch calibration and data evaluation of AMSR-E // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). Toulouse, France. 21–25 July 2003. V. I. P. 666–668.
- 13. Jones W.L., Park J.D., Soisuvarn S., Hong L., Gaiser P.W., Germain K.M. St. Deep-space calibration of the WindSat Radiometer // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2006. V. 44. No. 3. P. 476-495.
- 14. *Lewis D*. Rare warming over Antarctica reveals power of stratospheric models // Nature. 2019. V. 574. P. 160–161. DOI: 10.1038/d41586-019-02985-8.
- 15. *Meissner T., Wentz F.J.* The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2004. V. 42. No. 9. P. 1836–1849.
- Meissner T., Wentz F.J. The emissivity of the ocean surface between 6 and 90 GHz over a large range of wind speeds and earth incidence angles // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2012. V. 50. No. 8. P. 3004–3026.
- 17. Meteorology of the Southern Hemisphere: Meteorological Monographs / eds. Karoly D. J., Vincent D. G. No. 49. V. 27. 410 p. Boston: American Meteorological Society, 1998. DOI: 10.1007/978-1-935704-10-2.
- Mitnik L. M., Mitnik M. L. Retrieval of atmospheric and ocean surface parameters from ADEOS-II AMSR data: comparison of errors of global and regional algorithms // Radio Science. 2003. V. 38. No. 4. 8065. DOI: 10.1029/2002RS002659.
- 19. *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 Society of Japan. 2009. V. 29. No. 1. P. 156–165.
- Mitnik L., Kuleshov V., Mitnik M., Streltsov A. M., Cherniavsky G., Cherny I. Microwave scanner sounder MTVZA-GY on new Russian meteorological satellite Meteor-M N 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.

- Mitnik L., Kuleshov V., Chernyavsky G., Cherny I. (2018a) External calibration of MTVZA-GY/Meteor-M No. 2 imager channels // GSICS Quarterly Newsletter. 2018. V. 12. No. 1. P. 9–10. DOI: 10.7289/V5/ QN-GSICS-12-1-2018.
- Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Baranyuk A. V. (2018b) Passive microwave observations of South America and surrounding oceans from Russian Meteor-M No. 2 and Japan GCOM-W1 satellites // Intern. J. Remote Sensing. 2018. V. 39. No. 13. P. 4513–4530. DOI: 10.1080/01431161.2018.1425569.
- Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Pichugin M. K., Mitnik M. L. (2018c) Sudden stratospheric warming in 2015–2016: Study with satellite passive microwave data and reanalysis // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). Valencia, Spain, 23–27 July 2018. P. 5560–5563. DOI: 10.1109/ IGARSS.2018.8517495.
- Prakash S., Norouzi H., Azarderakhsh M., Blake R., Tesfagiorgis K. Global land surface emissivity estimation from AMSR2 observations // IEEE Geoscience Remote Sensing Letters. 2016. V. 13. No. 9. P. 1270–1274. DOI: 10.1109/LGRS.2016.2581140.
- Ralph F. M., Dettinger M. D., Lavers D., Gorodetskaya I. V., Martin A., Viale M., White A. B., Oakley N., Rutz J., Spackman J. R., Wernli H., Cordeira J. Atmospheric rivers emerge as a global science and application focus // Bull. American Meteorological Society. 2017. V. 98. No. 9. P. 1969–1973.
- 26. *Rosenkranz P. W.* Retrieval of temperature and moisture profiles from AMSU-A and AMSU-B measurements // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2001. V. 39. No. 11. P. 2429–2435.
- 27. *Surdyk S.* Using microwave brightness temperature to detect short-term surface air temperature changes in Antarctica: An analytical approach // Remote Sensing of Environment. 2002. V. 80. P. 256–271.
- Weng F., Zou X., Sun N., Yang H., Tian M., Blackwell W.J., Wang X., Lin L., Anderson K. Calibration of Suomi National Polar-Orbiting Partnership (NPP) Advanced Technology Microwave Sounder (ATMS) // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2013. V. 118. P. 1–14.
- 29. Wentz F.J., Ashcroft P., Gentemann C. Post-launch calibration of the TRMM Microwave Imager // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2001. V. 39. No. 2. P. 415–422.
- Yamazaki Y., Matthias V., Miyoshi Y., Stolle C., Siddiqui T., Kervalishvili G., Laštovička J., Kozubek M., Ward W., Themens D. R., Kristoffersen S., Alken P. September 2019 Antarctic sudden stratospheric warming: Quasi-6-day wave burst and ionospheric effects // Geophysical Research Letters. 2020. V. 47. e2019GL086577. URL: https://doi.org/10.1029/2019GL086577.

Brightness temperature modeling and first results derived from the MTVZA-GY radiometer of the Meteor-M No. 2-2 satellite

G. M. Chernyavsky¹, L. M. Mitnik², V. P. Kuleshov², M. L. Mitnik², A. M. Streltsov¹, G. E. Evseev¹, I. V. Cherny¹

 ¹ JSC Russian Space Systems, Moscow 117997, Russia E-mail: icherny@cpi.space.ru
² Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia E-mail: mitnik@poi.dvo.ru

The technical characteristics of the MTVZA-GY microwave radiometer on board the Meteor-M No. 2-2 meteorological satellite, launched into a sun-synchronous circular orbit 830 km high on July 5, 2019, are considered. The radiometer measures the Earth's outgoing radiation at frequencies v in the range v = 5-200 GHz while scanning through a cone at an angle of 65° to the local normal. Experimental data on the temperature variations of the hot reference load are considered, which together with the relict radiation measurements are used for internal calibration of the radiometer. Internal calibration is performed on each scan, which provides correction of gain variations and data presentation in the antenna temperature $T_a^{V,H}(v)$ scale on vertical (V) and horizontal (H) polarizations. Calculations of the brightness temperature $T_B^{V,H}(v)$ spectra of the Earth's outgoing radiation on the MTVZA-GY channels are performed. As input data, the radiosonde vertical profiles of atmospheric pressure, temperature and humidity, profiles of cloud liquid water content, values of water temperature and salinity and emisivity of various earth cover types have been taken. With the use of $T_B^{V,H}(v)$ of the Earth on descending (width of a strip L = 1500 km) and ascending (L = 2500 km) orbits resulted. The $T_B^{V,H}(v)$

fields on vertical and horizontal polarizations give an idea of the ocean surface temperature and near surface wind speed, the total atmospheric water vapor content, total cloud liquid water content and precipitation and the characteristics of cyclones, fronts and atmospheric rivers over the ocean, the distribution of sea ice and the properties of Antarctica and Greenland ice shields, the temperature of the land and vegetation cover, etc. In connection with the planned launches of subsequent Meteor-M No. 2 satellites, the need to improve the brightness temperature modeling, the development of algorithms for parameter retrieval, radiometer calibration and product validation has been emphasized. The measurement data and products should be available for users in our country and abroad.

Keywords: remote sensing, microwave radiometry, modeling, calibration, MTVZA-GY, Meteor-M No. 2-2, global fields of brightness temperatures, water vapor, cloudiness, precipitation

Accepted: 28.04.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-51-65

References

- Barsukov I.A., Boldyrev V.V., Ilgasov P.A., Nikitin O.V., Pantsov V.Yu., Prokhorov Yu.N., Strelnikov N.I., Streltsov A.M., Chernyi I.V., Chernyavskii G.M., Yakovlev V.V., SVCh-radiometer MTVZA-GYa sputnika Meteor-M No. 1 (Microwave radiometer MTVZA-GY onboard Meteor-M No. 1 satellite), *Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Aktual'nye problemy raketno-kosmicheskogo priborostroeniya i informatsionnykh tekhnologii*" (All-Russia Scientific and Technological Conf. "Current problems of rocket and space instrument development and information technology"), Proc. conf., Moscow: Fizmatlit, 2009, pp. 99–107.
- Barsukov I.A., Nikitin O.V., Streltsov A.M., Chernyi I.V., Kalibrovka SVCh-radiometra MTVZA-GYa (Calibration of MTVZA-GY microwave radiometer), *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2010, Issue 1(58), pp. 131–137.
- 3. Veselov V. M., Militskii Yu. A., Mirovskii V. G., Sharkov E. A., Etkin V. S., Eksperimental'naya metodika opredeleniya parametrov antenn radioteplovykh bortovykh kompleksov (Experimental technique for antenna parameter determination onboard radiothermal complexes), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1981, No. 2, pp. 63–75.
- 4. Kardashev N. S., Strukov I. A., Sputnikovyi radioastronomicheskii eksperiment "Relikt", *Nauka i chelove-chestvo*, Moscow: Znanie, 1987, pp. 173–185.
- Mitnik L. M., Mitnik M. L., Algorithm vosstanovleniya skorosti privodnogo vetra po izmereniyam mikrovolnovogo radiometra AMSR-E so sputnika Aqua (Algorithm for near surface wind speed retrieval from measurements of Aqua AMSR-E microwave radiometer), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2011, No. 6, pp. 34–44.
- 6. Mitnik L. M., Mitnik M. L., Kalibrovka i validatsiya neobkhodimye sostavlyayushchie mikrovolnovykh radiometricheskikh izmerenii so sputnikov serii "Meteor-M" No. 2 (Calibratrion and validation are required components of microwave radiometric measurements from Meteor-M No. 2 series satellites), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 1, pp. 95–104.
- Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Streltsov A. M., Chernyavskii G. M., Chernyi I. V., Modelirovanie yarkostnykh temperatur i pervye rezul'tati, poluchennye mikrovolnovym radiometrom MTVZA-GYa co sputnika "Meteor-M" No. 2-2 (Modeling of brightness temperatures and the first results obtained by MTVZA-GY microwave radiometer from Meteor-M No. 2-2 satellite), *Materialy Semnadtsatoi Vserossiiskoi* otkrytoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa" (Proc. 17th Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), 11–15 Nov. 2019, Moscow: IKI RAN, 2019, p. 157.
- Uspenskii A. B., Asmus V. V., Kozlov A. A., Kramchaninova E. K., Streltsov A. M., Chernyavskii G. M., Chernyi I. V., Absolyutnaya kalibrovka kanalov atmosfernogo zondirovaniya sputnikovogo mikrovolnovogo radiometra MTVZA-GYa (Absolute calibration of atmospheric sounding channels of MTVZA-GY microwave radiometer), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2016, No. 5, pp. 57–70.
- 9. Chernyavskii G. M., Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Chernyi I. V., Mikrovolnovoe zondirovanie okeana, atmosphery i zemnykh pokrovov po dannym sputnika "Meteor-M" No. 2. (Microwave sensing of the Ocean, atmosphere and land surface from Meteor-M No. 2 satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 78–100, DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-78-100.
- 10. Gorodetskaya I.V., Tsukernik M., Claes K., Ralph M.F., Neff W.D., Van Lipzig N.P.M., The role of atmospheric rivers in anomalous snow accumulation in East Antarctica, *Geophysical Research Letters*, 2014, Vol. 41, DOI: 10.1002/2014GL060881.

- 11. Hollinger J. P., Pierce J. L., Poe G. A., SSM/I instrument and evaluation, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1990, Vol. 28, No. 5, pp. 781–790, available at: http://aether.lbl.gov/www/projects/cobe/COBE_home/cobe_home.html.
- Imaoka K., Fujimoto Y., Kachi M., Takishima T., Shiomi K., Mikai H., Mutoh T., Yoshikawa M., Shibata A., Post-launch calibration and data evaluation of AMSR-E, *Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, Toulouse, France, 21–25 July 2003, Vol. 1, pp. 666–668.
- 13. Jones W. L., Park J. D., Soisuvarn S., Hong L., Gaiser P. W., Germain K. M. St., Deep-space calibration of the WindSat Radiometer, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2006, Vol. 44, No. 3, pp. 476–495.
- 14. Lewis D., Rare warming over Antarctica reveals power of stratospheric models, *Nature*, 2019, Vol. 574, pp. 160–161, DOI: 10.1038/d41586-019-02985-8.
- 15. Meissner T., Wentz F.J., The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2004, Vol. 42, No. 9, pp. 1836–1849.
- Meissner T., Wentz F.J., The emissivity of the ocean surface between 6 and 90 GHz over a large range of wind speeds and Earth incidence angles, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2012, Vol. 50, No. 8, pp. 3004–3026.
- 17. *Meteorology of the Southern Hemisphere: Meteorological Monographs*, Karoly D.J., Vincent D.G. (eds.), No. 49, Vol. 27, Boston: American Meteorological Society, 1998, 410 p., DOI: 10.1007/978-1-935704-10-2.
- Mitnik L. M., Mitnik M. L., Retrieval of atmospheric and ocean surface parameters from ADEOS-II AMSR data: comparison of errors of global and regional algorithms, *Radio Science*, 2003, Vol. 38, No. 4, 8065, DOI: 10.1029/2002RS002659.
- 19. 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 Society of Japan*, 2009, Vol. 29, No. 1, pp. 156–165.
- Mitnik L., Kuleshov V., Mitnik M., Streltsov A. M., Cherniavsky G., Cherny I., Microwave scanner sounder MTVZA-GY on new Russian meteorological satellite Meteor-M N 2: modeling, calibration and measurements, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, Vol. 10, No. 7, pp. 3036–3045, DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2695224.
- Mitnik L., Kuleshov V., Chernyavsky G., Cherny I. (2018a), External calibration of MTVZA-GY/Meteor-M No. 2 imager channels, *GSICS Quarterly Newsletter*, 2018, Vol. 12, No. 1, pp. 9–10, DOI: 10.7289/V5/ QN-GSICS-12-1-2018.
- 22. Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Baranyuk A. V. (2018b), Passive microwave observations of South America and surrounding oceans from Russian Meteor-M No. 2 and Japan GCOM-W1 satellites, *Intern. J. Remote Sensing*, 2018, Vol. 39, No. 13, pp. 4513–4530, DOI: 10.1080/01431161.2018.1425569.
- Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Pichugin M. K., Mitnik M. L. (2018c), Sudden stratospheric warming in 2015–2016: Study with satellite passive microwave data and reanalysis, *Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, Valencia, Spain, 23–27 July 2018, pp. 5560–5563, DOI: 10.1109/ IGARSS.2018.8517495.
- 24. Prakash S., Norouzi H., Azarderakhsh M., Blake R., Tesfagiorgis K., Global land surface emissivity estimation from AMSR2 observations, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, Vol. 13, No. 9, pp. 1270–1274, DOI: 10.1109/LGRS.2016.2581140.
- Ralph F. M., Dettinger M. D., Lavers D., Gorodetskaya I. V., Martin A., Viale M., White A. B., Oakley N., Rutz J., Spackman J. R., Wernli H., Cordeira J., Atmospheric rivers emerge as a global science and application focus, *Bull. American Meteorological Society*, 2017, Vol. 98, No. 9, pp. 1969–1973.
- 26. Rosenkranz P.W., Retrieval of temperature and moisture profiles from AMSU-A and AMSU-B measurements, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2001, Vol. 39, No. 11, pp. 2429–2435.
- 27. Surdyk S., Using microwave brightness temperature to detect short-term surface air temperature changes in Antarctica: An analytical approach, *Remote Sensing Environment*, 2002, Vol. 80, pp. 256–271.
- Weng F., Zou X., Sun N., Yang H., Tian M., Blackwell W.J., Wang X., Lin L., Anderson K., Calibration of Suomi National Polar-Orbiting Partnership (NPP) Advanced Technology Microwave Sounder (ATMS), J. Geophysical Research: Atmospheres, 2013, Vol. 118, pp. 1–14.
- 29. Wentz F.J., Ashcroft P., Gentemann C., Post-launch calibration of the TRMM Microwave Imager, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2001, Vol. 39, No. 2, pp. 415–422.
- Yamazaki Y., Matthias V., Miyoshi Y., Stolle C., Siddiqui T., Kervalishvili G., Laštovička J., Kozubek M., Ward W., Themens D. R., Kristoffersen S., Alken P., September 2019 Antarctic sudden stratospheric warming: Quasi-6-day wave burst and ionospheric effects, *Geophysical Research Letters*, 2020, Vol. 47, e2019GL086577, available at: https://doi.org/10.1029/2019GL086577.