

Микроволновое зондирование океана, атмосферы и земных покровов по данным спутника «Метеор-М» № 2

Г. М. Чернявский¹, Л. М. Митник², В. П. Кулешов²,
М. Л. Митник², И. В. Чёрный¹

¹ АО «Российские космические системы», Москва, 117997, Россия
E-mail: icherny@spi.space.ru

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

Рассмотрены особенности конструкции СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ на метеорологическом спутнике «Метеор-М» № 2, приведены сведения о функционировании его в космосе и результаты анализа измерений над различными физико-географическими областями Земли. Спутник был запущен 8 июля 2014 г. на солнечно-синхронную круговую орбиту высотой 830 км. Восходящее излучение Земли измеряют 29 каналов радиометра на частотах ν в диапазоне от 10 до 190 ГГц при сканировании по конусу под углом 65° к местной нормали. Внутренняя калибровка каналов МТВЗА-ГЯ проводится на каждом скане и обеспечивает коррекцию вариаций коэффициента усиления и представление данных в шкале антенной температуры $T_a^{B,\Gamma}(\nu)$ на вертикальной (В) и горизонтальной (Г) поляризациях. Преобразование $T_a^{B,\Gamma}(\nu)$ в яркостную температуру $T_y^{B,\Gamma}(\nu)$ выполнялось по расчётным значениям $T_y^{B,\Gamma}(\nu)$ над однородными «горячими» (леса Амазонки) и «холодными» (океан у побережья Антарктиды при слабом ветре и отсутствии облаков) областями (внешняя калибровка). Из сравнения временных рядов $T_y^{B,\Gamma}(\nu)$ МТВЗА-ГЯ и AMSR2 (на спутнике Японии GCOM-W1) над тестовыми областями диаметром 200 км в лесах Амазонки, в Антарктиде и Гренландии следует высокая долговременная стабильность работы МТВЗА-ГЯ. Глобальные поля $T_y^{B,\Gamma}(\nu)$ дают представление: о температуре поверхности океана и скорости приводного ветра; распределении морских льдов; температуре земных и растительных покровов, Антарктиды и Гренландии; характеристиках циклонов над океаном. В связи с планируемыми запусками спутников «Метеор-М» № 2-2 (декабрь 2018 г.) и «Метеор-М» № 2-3 (2020) с МТВЗА-ГЯ на борту подчеркнута необходимость моделирования яркостных температур, 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, калибровка, валидация, моделирование, алгоритмы, МТВЗА-ГЯ, «Метеор-М» № 2, AMSR2, яркостная температура, временные ряды, долговременная стабильность

Одобрена к печати: 08.07.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-78-100

Введение

Главной задачей спутникового дистанционного зондирования является получение количественных сведений о явлениях и процессах в атмосфере, на поверхности и под ней и в окружающем космическом пространстве на разных пространственно-временных масштабах. Эти сведения необходимы для понимания взаимосвязей между различными сферами Земли и для принятия важных решений, влияющих на условия жизни населения и на функционирование системы Земля в последующие годы. Одним из важнейших спутниковых методов изучения окружающей среды является пассивное (радиометрическое) и активное (различные типы радиолокаторов) микроволновое (МВ) зондирование, обеспечивающее получение количественной информации о характеристиках и эволюции среды независимо от времени суток и облачности.

Первые в мире МВ-измерения Земли были осуществлены 50 лет назад с отечественного спутника «Космос-243», запущенного 23 сентября 1968 г. Измерения велись на частотах (ν) 3,4; 9,6; 22,2 и 37,0 ГГц в трассовом режиме (Башаринов и др., 1974).

Однако практическое применение микроволновых радиометров началось в 1979 г. со спутника NOAA (США), на котором был установлен зондировщик Microwave Sounding Unit (MSU) для измерения профиля температуры атмосферы на частотах 50–58 ГГц (Spencer, Christy, 1993). В 1987 г. на орбиту был запущен космический аппарат (КА) Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) F08 министерства обороны США. На спутнике был установлен сканер Special Sensor Microwave Imager (SSM/I), принимавший излучение Земли на частотах 19,3; 22,2; 37,0 и 85,5 ГГц для определения параметров поверхности и интегральных параметров атмосферы (Hollinger et al., 1990).

Приборный комплекс, установленный на КА DMSP F11, запущенном в 1991 г., наряду со сканером SSM/I, включал зондировщики Special Sensor Microwave/Temperature Sounder SSM/T-1 на частотах в диапазоне 50,5–59,4 ГГц и SSM/T-2 на частотах 91,5; 150; 183,31 \pm 1; \pm 3; \pm 7 ГГц для определения профилей температуры и влажности атмосферы соответственно (Falcone et al., 1993). С 1998 г. на спутниках серии NOAA также устанавливаются температурный AMSU-A и влажностный AMSU-B зондировщики (Rosenkranz, 2001). Данные приборы обеспечивают в определённом объёме стандартной гидрометеорологической информацией страны – члены ВМО.

Первый отечественный сканер «Икар-Дельта», предназначенный для экспериментов по определению интегральных метеопараметров атмосферы, был выведен на орбиту в 1996 г. в составе модуля «Природа» орбитальной станции «Мир» (Jackson et al., 1998).

В России спутниковая СВЧ-радиометрия является одной из немногих динамично развивающихся технологий ДЗЗ. Интенсивное развитие она получила благодаря исследованиям и разработкам ФГУП «Центр космических наблюдений» (впоследствии — Научно-технологический центр «Космонит», а сейчас — отделение 60 АО «Российские космические системы»).

За указанный период коллективом были созданы приборы для КА «Метеор-3М» (МТВЗА, запущен в 2001 г.), КА «Сич-1М» (МТВЗА-ОК, 2004 г.), КА «Метеор-М» (МТВЗА-ГЯ: КА № 1, 2009 г.; КА № 2, 2014 г.; КА № 2-1, аварийный запуск в 2017 г.), МКА «Канопус-СТ» (МИРАМ-К, аварийный запуск в 2015 г.) (Барсуков и др., 2011; Болдырев и др., 2008; Наконечный и др., 2004; Черный и др., 2003; Чернявский, 2007). Идёт разработка перспективного СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ-МП для КА «Метеор-МП», запуск которого запланирован на 2024 г. (Cherny et al., 2017).

Лётные испытания многофункционального СВЧ-радиометра МТВЗА начались в 2001 г. в составе КА «Метеор-3М». Рабочий диапазон частот МТВЗА составлял 18–183 ГГц и содержал 21 канал (Черный и др., 2003). Это было началом прорыва монополии США в спутниковой гидрометеорологии. К моменту запуска на орбиту конструкция прибора МТВЗА не имела аналогов. В МТВЗА конструктивно объединены функции сканера типа SSM/I и зондировщиков типа SSM/T-1, -2 и AMSU-A, -B. Радиометр стал первым в мире спутниковым сканером/зондировщиком для определения стандартных метеорологических параметров атмосферы и подстилающей поверхности в квазиреальном масштабе времени. По данным МТВЗА-ГЯ могут быть определены паросодержание атмосферы, водозапас облаков, скорость приводного ветра, восстановлены вертикальные профили температуры и влажности атмосферы и др. (Болдырев и др., 2008; Cherny et al., 2010). Американский аналог — сканер/зондировщик SSMIS — был выведен на орбиту два года спустя в 2003 г. на КА DMSP F16 (Kunkee et al., 2008a, b).

В настоящее время микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ — один из основных видов целевой аппаратуры на метеорологических спутниках серии «Метеор-М». По информационным характеристикам и области применения МТВЗА-ГЯ соответствует зарубежным аналогам — зондировщикам AMSU-A и AMSU-B (спутники NOAA, США и MetOp, ESA), ATMS (спутник SNPP, США) (Weng et al., 2013), сканерам AMSR-E (спутник Aqua, США), AMSR2 (спутник GCOM-W1, Япония) (Imaoka et al., 2010; Maeda et al., 2016) и сканеру/зондировщику SSMIS (спутники DMSP F16–F19, США).

Микроволновые данные КА «Метеор-М» № 1 были использованы при изучении морских погодных систем и морского льда (Митник и др., 2012, 2015). К сожалению, из-за выхода из строя запоминающего устройства (ЗУ) глобальная информация с прибора МТВЗА-ГЯ отсутствовала, приём данных осуществлялся только станциями на территории России в режиме непосредственной передачи информации. Для оперативной метеорологии они не использовались.

Метеорологический КА «Метеор-М» № 2 был запущен 8 июля 2014 г. с космодрома Байконур (Асмус и др., 2014). Спутник заменил на орбите КА «Метеор-М» № 1 (2009–2014). В состав аппаратного комплекса спутников серии «Метеор-М» входит модуль температурного и влажностного зондирования атмосферы МТВЗА-ГЯ — многочастотный сканирующий микроволновый радиометр (ГЯ — в память о Геннадии Яковлевиче Гуськове (1918–2002), конструкторе бортовых космических приборов).

Ниже представлен анализ результатов функционирования прибора МТВЗА-ГЯ на КА «Метеор-М» № 2 за период 2014–2017 гг. Работа инструмента в космосе на протяжении трёх лет позволила обосновать методику и выполнить внешнюю калибровку каналов сканера, проанализировать временные ряды яркостных температур на вертикальной (В) и горизонтальной (Г) поляризациях $T_{\text{я}}^{\text{В,Г}}(\nu)$ над тестовыми участками и глобальные поля $T_{\text{я}}$ за отдельные сроки. Собранный материал используется при разработке методик обработки и анализа МВ-данных с последующих спутников серии «Метеор-М». Результаты этого анализа были представлены на конференции в ИКИ РАН в ноябре 2017 г. (Чернявский и др., 2017). Они относятся к внешней калибровке МТВЗА-ГЯ и к оценке стабильности функционирования прибора в космосе. В докладе также были рассмотрены физические обоснования выбора участков для внешней калибровки, результаты моделирования яркостных температур над океаном, тропическими лесами Амазонки и ледяным щитом Гренландии в различные сезоны.

Запуски спутников серии «Метеор-М» будут продолжены. Сведения о последующих запусках размещены на сайте Всемирной метеорологической организации (ВМО) в разделе Observing Systems Capability Analysis and Review Tool (<http://www.wmo-sat.info/oscar/satellites/view/284>). Очередной спутник «Метеор-М» № 2-2 планируется вывести в космос в конце 2018 г.

Радиометр МТВЗА-ГЯ

Основные технические характеристики прибора МТВЗА-ГЯ суммированы ниже. Фотография прибора приведена на *рис. 1* (см. с. 81).

Технические характеристики МТВЗА-ГЯ

Диапазон	10,6; 18,7; 23,8; 31,5; 36,5; 42; 48; 52–57; 91; 183,31 ГГц
Пространственное разрешение	16–198 км
Полоса обзора	1500 км
Сканирование	коническое, круговое
Режим работы	непрерывный
Период сканирования	2,5 с
Нестабильность вращения	10^{-4}
Поток данных	35 Кбит/с
Объём ЗУ	1 Гбайт
Масса, не более	94 кг
Потребление, не более	80 Вт

Рабочие частоты каналов сканера МТВЗА-ГЯ расположены в окнах прозрачности атмосферы 10,6; 18,7; 23,8; 31,5; 36,5; 42,0; 48,0 и 91,6 ГГц, а зондировщика — в полосе поглощения кислорода 52–58 ГГц и в области линии водяного пара 183,31 ГГц.

Все каналы представляют собой радиометры полной мощности. Приёмники СВЧ-излучения в диапазоне частот 10–48 ГГц являются радиометрами компенсационного типа, построенными по схеме прямого усиления на базе малошумящего усилителя (МШУ). Приёмники в диапазоне частот 52–58; 91,6 и 183,31 ГГц являются радиометрами компенсационного типа, построенными по супергетеродинной схеме. Информационные характеристики радиометрических каналов МТВЗА-ГЯ для орбиты КА «Метеор-М» высотой 830 км приведены в *таблице*.

Антенная система МТВЗА-ГЯ представляет собой однозеркальную параболическую антенну апертурой 0,65 м с боковым облучением зеркала. Групповой многочастотный антенный облучатель находится в фокальной плоскости и включает четыре рупора, каждый из которых оптимизирован в одном из диапазонов 10,6–23,8; 31,5–48; 52–91 и 176–190 ГГц (Gorobets et al., 1998). Расхождение антенных лучей, которое обусловлено применением группового облучателя, находится в пределах углов $\pm 6,5^\circ$. В сканерных каналах измерения проводятся на двух ортогональных поляризациях. Кросс-поляризационная развязка не меньше –23 дБ.



Рис. 1. Микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ

Информационные характеристики радиометрических каналов МТВЗА-ГЯ, приведённые к орбите КА «Метеор-М» (высота 830 км)

Центральная частота, ГГц	Поляризация	Кол-во полос	Ширина полосы, МГц	Пространственное разрешение (антенное пятно), км	Приведённый пиксель изображения, км	Чувствительность не хуже, К/пиксель	Высота максимума весовой функции, км
10,6	В, Г	1	100	89×198	32×32	0,5	—
18,7	В, Г	1	200	52×116	32×32	0,4	—
23,8	В, Г	1	400	42×94	32×32	0,3	—
31,5	В, Г	1	1000	35×76	32×32	0,3	—
36,5	В, Г	1	1000	30×67	32×32	0,3	—
42,0	В, Г	1	1000	26×60	32×32	0,4	—
48,0	В, Г	1	1000	24×43	32×32	0,4	—
91,65	В, Г	2	2500	14×30	16×16	0,6	—
52,80	В	1	400	21×48	48×48	0,4	2
53,30	В	1	400	21×48	48×48	0,4	4
53,80	В	1	400	21×48	48×48	0,4	6
54,64	В	1	400	21×48	48×48	0,4	10
55,63	В	1	400	21×48	48×48	0,4	14
$F_0 \pm 0,1$	Г	4	50	21×48	48×48	0,4	20
$F_0 \pm 0,05$	Г	4	20	21×48	48×48	0,7	25
$F_0 \pm 0,025$	Г	4	10	21×48	48×48	0,9	29
$F_0 \pm 0,01$	Г	4	5	21×48	48×48	1,3	35
$F_0 \pm 0,005$	Г	4	3	21×48	48×48	1,7	42
183,31±7,0	В	2	1500	9×21	32×32	0,5	1,5
183,31±3,0	В	2	1000	9×21	32×32	0,6	2,9
183,31±1,0	В	2	500	9×21	32×32	0,8	4,7

$$F_0 = 57,2903 \pm 0,3222 \text{ ГГц.}$$

К достоинствам МТВЗА-ГЯ следует отнести комбинацию в одном приборе каналов сканера и зондировщика, наличие новых частот 42,0 и 48,0 ГГц и зондирование под углом 65°, что открывает дополнительные возможности для оценки гидрометеорологических параметров и наблюдения внутриокеанических процессов (Cherny, Raizer, 1998).

Схема сканирования МТВЗА-ГЯ

Схема кругового конического сканирования МТВЗА-ГЯ построена таким образом, что визирование производится в направлении кормы КА (рис. 2). Направление скана — слева направо с рабочим сектором 105° (от -90° до 15° относительно трассы спутника), что обеспечивает полосу обзора шириной 1500 км. Угол визирования составляет 53,3°, а угол падения — 65°. Несимметричность сектора сканирования связана с максимальной реализацией поля незатенения элементами конструкции КА. Для данной высоты орбиты существует потенциальная возможность обеспечить ширину полосы обзора МТВЗА-ГЯ не менее 2200 км, что будет реализовано в новой модификации спутника «Метеор-МП» (Cherny et al., 2017).

За период сканирования 2,5 с перемещение нормали спутника составит 16 км, что сравнимо с размером элемента пространственного разрешения радиометра в каналах 91,6 и 183,31 ГГц. Поэтому в качестве пространственного элемента квантования сигнала (для всех радиометрических каналов) выбран масштаб 16×16 км.

На этапе предварительной обработки данных в пунктах приёма производится процедура пространственного усреднения (сглаживания) изображений в отдельных каналах до размеров пикселя 32×32 и 48×48 км (см. таблицу), что обеспечивает повышение чувствительности в два и три раза соответственно.

Система сканирования представляет собой прецизионную вращающуюся платформу, на которой размещены: параболическая антенна, облучатели, приёмники СВЧ-излучения, микропроцессорный блок предварительной обработки данных и вторичные источники питания. Данная конструкция необходима для того, чтобы обеспечить постоянство угла визирования и положения поляризационного базиса прибора на протяжении всего рабочего сектора, что имеет принципиальное значение для каналов в окнах прозрачности атмосферы (сканерные каналы), где доминирующий вклад вносит поляризованное излучение подстилающей поверхности. Организованная таким образом схема сканирования позволяет исключить влияние

третьего параметра Стокса на результаты измерений, что характерно для схемы линейного кругового сканирования, которая применяется в зондировщиках (Weng et al., 2013).

Подача питания и команд управления на сканирующую платформу, а также снятие информации осуществляются через вращающееся контактное устройство. В блоке предварительной обработки данных выполняется оцифровка сигналов по всем каналам в рабочем секторе и в секторе калибровки, накопление, масштабирование, сведение лучей группового антенного облучателя, формирование кадровой структуры потока данных и их передача по интерфейсу RS-485 через токосъёмник на неподвижную часть прибора.

Здесь информационный поток записывается в запоминающее устройство и синхронно поступает в дециметровую радиолинию для непосредственной передачи данных в международном формате HRPT.

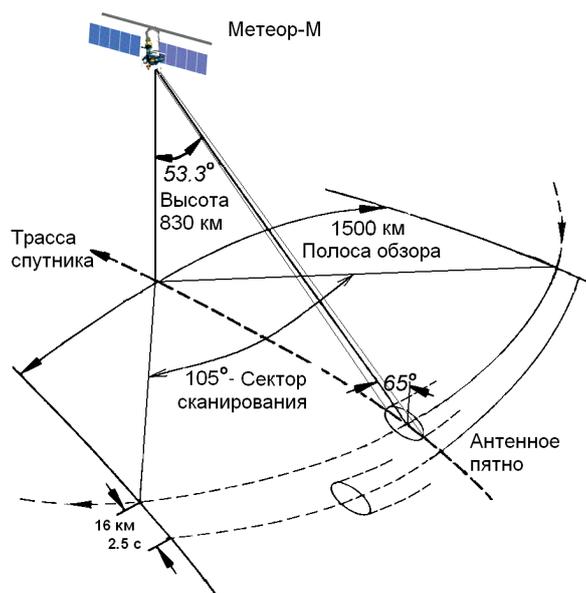


Рис. 2. Геометрия наблюдения МТВЗА-ГЯ с орбиты КА «Метеор-М»

Накопленные (глобальные) данные передаются из запоминающего устройства по сантиметровой радиолнии на пункты приёма информации Росгидромета в режиме полусуточного и повиткового сброса.

Калибровка МТВЗА-ГЯ

Калибровка шкалы антенных температур радиометрических каналов проводится по двухточечной схеме путём измерения излучения двух опорных сигналов вне зоны рабочего сектора, которые формируются согласованными нагрузками, размещёнными на неподвижной части прибора (см. *рис. 1*). Для калибровки МТВЗА-ГЯ используется «горячая» нагрузка, которая представляет собой бортовой имитатор абсолютно чёрного тела (АЧТ) с яркостной температурой на уровне 250–300 К, и «холодная» нагрузка — калибровочная антенна, которая всегда ориентирована в космическое пространство и принимает фоновое реликтовое излучение с яркостной температурой $\sim 2,73$ К. Излучательная способность АЧТ составляет 0,999 во всём диапазоне рабочих частот. Калибровка проводится на каждом скане. По перепаду уровня излучения между «горячей» и «холодной» нагрузками определяется шкала антенных температур, в которой представляются сигналы всех каналов рабочего сектора путём линейного преобразования.

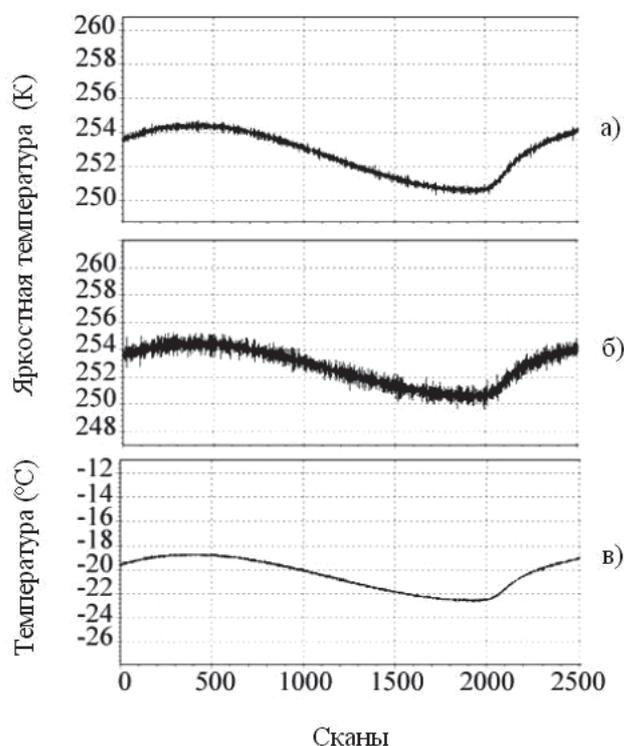
На *рис. 3* приведены примеры записи яркостной температуры АЧТ на частоте сканера 23,8 ГГц и частоте зондировщика 55,63 ГГц, а также его физической температуры на протяжении одного витка КА «Метеор-М» № 2. Температура АЧТ изменяется в пределах 3–4 °С на витке при переходе с солнечной части орбиты на тень. Аналогичным образом изменяется яркостная температура АЧТ.

Абсолютно чёрное тело является пассивным элементом, его физическая температура определяется условиями термодинамического равновесия с окружающей средой и измеряется четырьмя платиновыми термодатчиками с точностью не хуже 0,05 °С. Пространственные неоднородности физической температуры излучающей поверхности АЧТ на различных участках орбиты достигают величины 0,2–0,5 °С. Поэтому для обработки данных принимается среднее значение температуры АЧТ по четырём термодатчикам.

Пространственные вариации яркостной температуры реликтового излучения обусловлены радиоизлучением Млечного Пути и заключены в пределах 3–8 мК при среднем стабильном значении 2,725 К (Кардашев, Струков, 1987).

Погрешность калибровки шкалы антенных температур характеризуется уровнем инструментального шума в каналах (см. *рис. 3*). Величина указанной погрешности может быть уменьшена путём сглаживания (усреднения) измерений на согласованных нагрузках по количеству сканов m . При $m = 10–60$ погрешность калибровки шкалы антенных температур меньше 1 К для всех каналов.

Рис. 3. Вариации яркостной температуры калибратора (абсолютно чёрного тела) на частотах 23,8 ГГц (*а*) и 55,63 ГГц (*б*) и его физической температуры (*в*) по данным, полученным 7 января 2016 г. на протяжении одного витка КА «Метеор-М» № 2



Усреднение, однако, следует ограничивать: $m \leq 120$, что соответствует времени ≤ 5 мин, поскольку скорость изменения температуры АЧТ на отдельных участках орбиты достигает $0,25$ °С/мин (см. рис. 3) и дальнейшее увеличение параметра m может исказить результаты калибровки.

Следует также отметить, что всегда присутствует систематическая погрешность шкалы антенных температур, которая обусловлена нелинейностью передаточного тракта радиометрических каналов МТВЗА-ГЯ. По данным наземных тепло-вакуумных испытаний, указанная погрешность для всех каналов МТВЗА-ГЯ не превышает $0,4$ К.

Учитывая, что систематическая погрешность абсолютной калибровки бортовых СВЧ-радиометров составляет величину порядка $2-3$ К (Hollinger et al., 1990; Rosenkranz, 2001), погрешностью, обусловленной нелинейностью передаточного тракта, как правило, можно пренебречь. Нелинейность калибровочной кривой впервые была учтена в процедуре внутренней калибровки данных микроволнового радиометра ATMS на спутнике SNPP (Weng et al., 2013).

Переход от шкалы антенных температур к яркостным осуществляется линейным образом и связан с учётом параметров диаграммы направленности антенны (ДНА). Оценка параметров ДНА для каналов сканера и зондировщика МТВЗА-ГЯ проводилась в период летних испытаний с учётом влияния элементов конструкции платформы КА «Метеор-М» № 2. Для этого временно (на отдельных витках) изменялась орбитальная ориентация КА для проведения лимбовых измерений. В этом режиме при сканировании регистрируются изменения излучения на границах таких контрастных областей, как диск планеты, радиогоризонт и космический реликтовый фон, что позволяет оценить ширину главного лепестка ДНА, её потоковую эффективность и уровень боковых лепестков (Веселов и др., 1981). Установлено, в частности, что в условиях орбитального полёта КА «Метеор-М» № 2 потоковая эффективность антенной системы МТВЗА-ГЯ для каналов сканера и зондировщика составляет не менее 94 %.

Связь между искомой яркостной температурой $T_{\text{я}}$ и измеренной антенной температурой $T_{\text{а}}$ определяется выражением: $T_{\text{я}}^i = C_1^i T_{\text{а}}^i + C_2^i$, где i — индекс канала (Цейтлин, 1976). Коэффициенты C_1^i и C_2^i характеризуют соответственно потоковую эффективность антенны и уровень излучения, который принимается антенной через боковые лепестки. При этом кросс-поляризационным вкладом в яркостную температуру в случае сканерных каналов можно пренебречь, поскольку при развязке между ортогональными поляризациями ниже -23 дБ величина кросс-поляризационного просачивания для рабочих углов визирования МТВЗА-ГЯ имеет значение менее 1 К.

Вопросы абсолютной калибровки каналов зондировщика МТВЗА-ГЯ рассмотрены в работах (Успенский и др., 2016, 2017). Внешняя калибровка сканерных каналов МТВЗА-ГЯ по расчётным значениям яркостных температур обсуждается в следующем разделе.

Внешняя калибровка

Для каналов сканера МТВЗА-ГЯ, помимо внутренней калибровки, выполнена внешняя, основанная на сопоставлении измеренной антенной температуры (отсчётов) и расчётной яркостной температуры над протяжёнными однородными «холодными» и «горячими» участками океана и земной поверхности (Митник, Митник, 2016; Biswas et al., 2007; Brown, Ruf, 2005; Cherny et al., 2010; Das et al., 2014; Kroodsma et al., 2013; Mitnik et al., 2015, 2017d, 2018a; Mo, 2007, 2010, 2011; Prigent et al., 2008; Tian et al., 2014). В качестве обширной «горячей» области, где значения $T_{\text{я}}(v)$ максимальны, взяты дождевые широколиственные леса бассейна Амазонки. Выбирались измерения на витках, когда над участком со сплошным лесным покровом отсутствовала мощная облачность и осадки, индикатором которых служили пятна и полосы со значениями $T_{\text{я}}^{\text{В,Г}}(v)$ ниже фона (рис. 4).

«Холодные» области, где значения $T_{\text{я}}(v)$ минимальны, отмечаются над районами океана с температурой поверхности воды $t_0 \leq 12$ °С, слабым ветром, отсутствием облаков и низкими значениями паросодержания атмосферы V (Mitnik et al., 2017a, c).

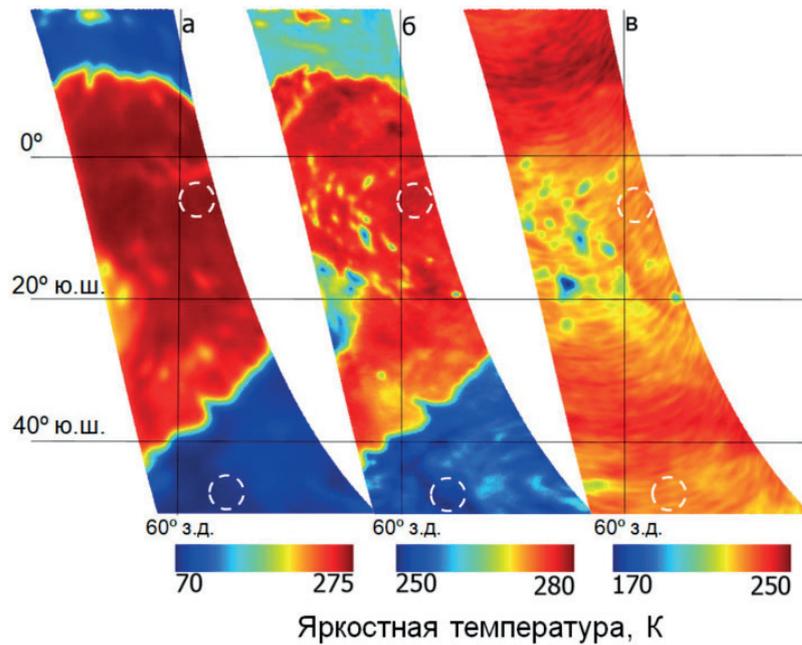


Рис. 4. Внешняя калибровка радиометра МТВЗА-ГЯ. Измерения над дождевыми широколиственными лесами Амазонки, тропическими, умеренными и высокими широтами Атлантического океана на частотах 10,6 ГГц (а) и 48,0 ГГц (б) на горизонтальной поляризации и на 183,31±7 ГГц (в) на вертикальной поляризации. Области, использованные для калибровки, очерчены пунктирными линиями

Температуру поверхности океана (ТПО) можно считать известной: поля ТПО за каждые сутки выставляются на нескольких сайтах. К тому же температура воды является инерционным параметром. Поэтому при выборе калибровочной области можно использовать значения ТПО, усреднённые за предшествующую неделю. Области со слабым ветром характеризуются минимальными значениями $T_{\text{я}}^{\Gamma}(10)$ и также отмечаются по данным спутниковых скаттерометров (Ventamy et al., 2017; Knapp et al., 2011). Облачные массивы выделяются по положительным приращениям яркостных температур относительно фона.

Паросодержание атмосферы над участками океана со слабым ветром определялось по измерениям спутниковых МВ-радиометров. Глобальные поля V с различным пространственно-временным разрешением, восстановленные по спутниковым измерениям и/или предоставляемые рядом реанализов, размещены на нескольких сайтах (например, <https://climatedataguide.ucar.edu/variables/atmosphere/precipitable-water> или <http://kuroshio.eorc.jaxa.jp/JASMES/WC.html>), а также в виде анимации (Ермаков и др., 2016; Wimmers, Velden, 2011). Использование значений $T_{\text{я}}^{\Gamma}(23)$ при выборе области с малым паросодержанием возможно не всегда, так как $T_{\text{я}}^{\Gamma}(23)$ зависит и от ТПО (из-за уменьшения коэффициента излучения с ростом ТПО). Влияние на калибровку дрейфа характеристик радиометра минимально при выборе холодной области в южных частях Тихого или Атлантического океана на том же витке, что и горячая область в Амазонии. Пунктирный эллипс на рис. 4 отмечает холодную область в южной части Атлантики, где $t_{\text{я}} = 5-7$ °С.

Яркостные температуры $T_{\text{я}}^{\text{B},\Gamma}(v)$ на частотах радиометра МТВЗА-ГЯ были рассчитаны путём численного интегрирования уравнения переноса излучения в системе «подстилающая поверхность – атмосфера» (Митник, Митник, 2006; Mitnik, Mitnik, 2003; Mitnik et al., 2009, 2017с, d). Используются уточнённые спектры поглощения в кислороде и в водяном паре (Zabolotskikh et al., 2014). Спектры диэлектрической проницаемости пресной и солёной воды были взяты из работы (Liu et al., 2011). Влияние ветра на коэффициенты излучения океана оценивалось по эмпирическим зависимостям (Meissner, Wentz, 2012). При моделировании $T_{\text{я}}$ над Амазонкой, другими типами земных покровов, морскими и материковыми льдами использовались эмпирические данные о коэффициентах излучения (Mo, 2010, 2011; Prigent et al., 2008; Tian et al., 2014).

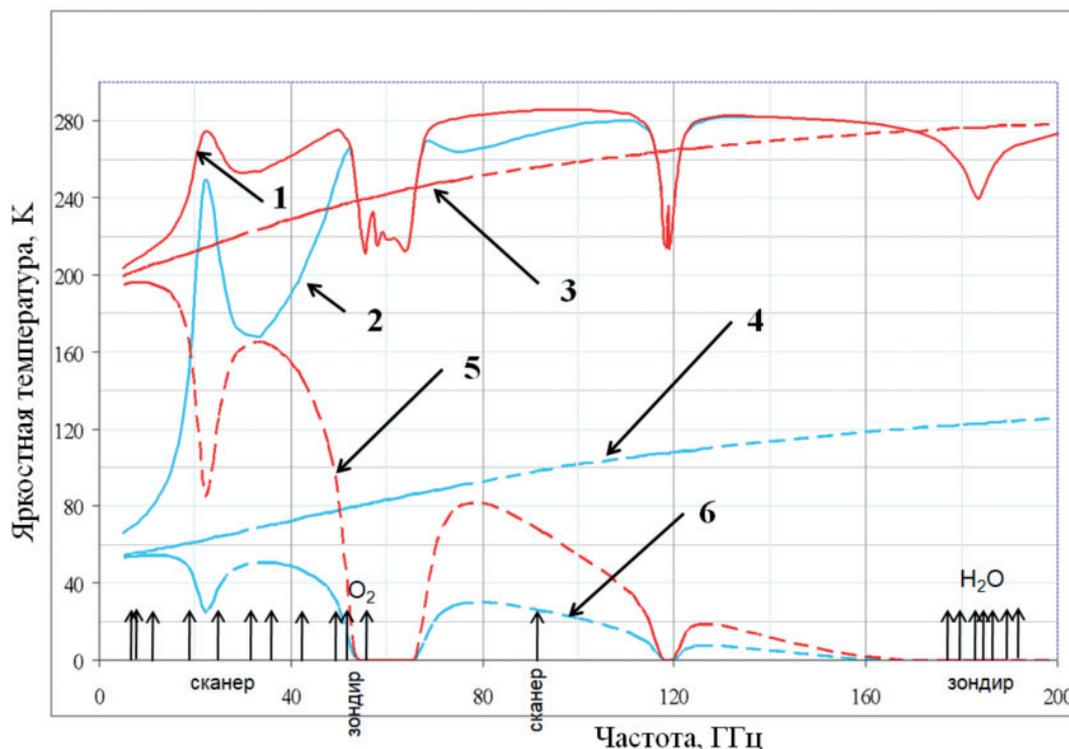


Рис. 5. Спектры яркостной температуры системы «безоблачная тропическая атмосфера – океан» (1 и 2, сплошные линии), океана $T_{\text{я океан}} = \chi T_0$ (3 и 4) и океана на верхней границе атмосферы $T_{\text{я океан}} = \chi T_0 [\exp(-\tau \cdot \sec \theta)]$ (5 и 6) на вертикальной (1, 3 и 5, красные линии) и горизонтальной (2, 4 и 6, синие линии) поляризациях, рассчитанные при ТПО = 28 °С, скорости ветра $W = 5$ м/с и паросодержании атмосферы $V = 55$ кг/м³. Стрелки показывают частоты сканера и зондировщика МТВЗА-ГЯ

Яркостная температура системы «океан – атмосфера» была найдены по формуле:

$$T_{\text{я}}^{\text{B},\Gamma}(\nu, \theta, t_0, W) = \chi^{\text{B},\Gamma}(\nu, \theta, t_0, W) T_0 \cdot e^{-\tau(\nu) \cdot \sec \theta} + T_{\text{я}}^{\uparrow}(\nu, \theta) + T_{\text{я}}^{\downarrow}(\nu, \theta) [1 - \chi^{\text{B},\Gamma}(\nu, \theta, t_0, W)] \cdot e^{-\tau(\nu) \cdot \sec \theta} + T_{\text{к}} [1 - \chi^{\text{B},\Gamma}(\nu, \theta, t_0, W)] \cdot e^{-2\tau(\nu) \cdot \sec \theta}, \quad (1)$$

где $\chi^{\text{B},\Gamma}(\nu, \theta, t_0, W)$ — коэффициент излучения морской поверхности на В- и Г-поляризациях; $T_0 = t_0 + 273,16$; $\tau(\nu)$ — полное поглощение в атмосфере; $T_{\text{я}}^{\uparrow}(\nu, \theta)$ и $T_{\text{я}}^{\downarrow}(\nu, \theta)$ — яркостные температуры восходящего и нисходящего излучения атмосферы соответственно; $T_{\text{к}} = 2,73$ К — яркостная температура реликтового космического излучения.

Разработка глобальных и региональных алгоритмов восстановления ТПО, скорости приводного ветра и интегральных параметров атмосферы выполнялась с использованием массивов значений $T_{\text{я}}^{\text{B},\Gamma}(\nu)$, найденных по радиозондовым данным, и соответствующих им массивам t_0 , W , V и Q (Митник, Митник, 2006; Gentemann et al., 2010; Mitnik, Mitnik, 2003; Mitnik et al., 2009). Входной информацией служили данные радиозондирования атмосферы с судов погоды, островных и материковых станций (сайт университета Вайоминг <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>) и профили влажности облаков (Облака..., 1989). Пример расчётных спектров приведён на рис. 5.

Временные ряды

Переменные факторы космического полёта (прежде всего — освещённость спутника Солнцем), изменение характеристик антенны, «горячей» нагрузки и радиометра в процессе его эксплуатации, неопределённости в задании геофизических параметров, используемых при моделировании яркостных температур над тестовыми областями, влияют на погрешности

определения $T_{\text{я}}^{\text{В,Г}}(\nu)$ по данным внутренней и внешней калибровки, а следовательно, и на погрешности восстанавливаемых геофизических параметров. Поэтому внешняя калибровка в 2014–2017 гг. была выполнена несколько раз.

Для всего периода наблюдений МТВЗА-ГЯ были построены временные ряды $T_{\text{я}}(\nu)$ над тестовыми областями в лесах Амазонки, на Антарктическом плато в районе купола Dome C и в Гренландии в районе станции Summit (Barsukov et al., 2016; Mitnik et al., 2017a, b). Для этих же областей были построены ряды $T_{\text{я}}(\nu)$ по данным радиометра AMSR2 со спутника GCOM-W1 на частотах 10,6; 18,7; 23,8 и 36,5 ГГц, совпадающих с МТВЗА-ГЯ. AMSR2 ведёт приём уходящего излучения Земли с мая 2012 г. и может рассматриваться как эталонный (Maeda et al., 2016). На рис. 6 показаны временные ряды $T_{\text{я}}$ МТВЗА-ГЯ и AMSR2 на частотах 10,6 и 36,5 ГГц на В- и Г-поляризациях, полученные с 01.10.2014 ($N=1$) по 30.06.2017 ($N=1001$) над тестовой областью диаметром 100 км с центром на $4^{\circ}27'$ ю. ш., $56^{\circ}37'$ з. д. в лесах Амазонки.

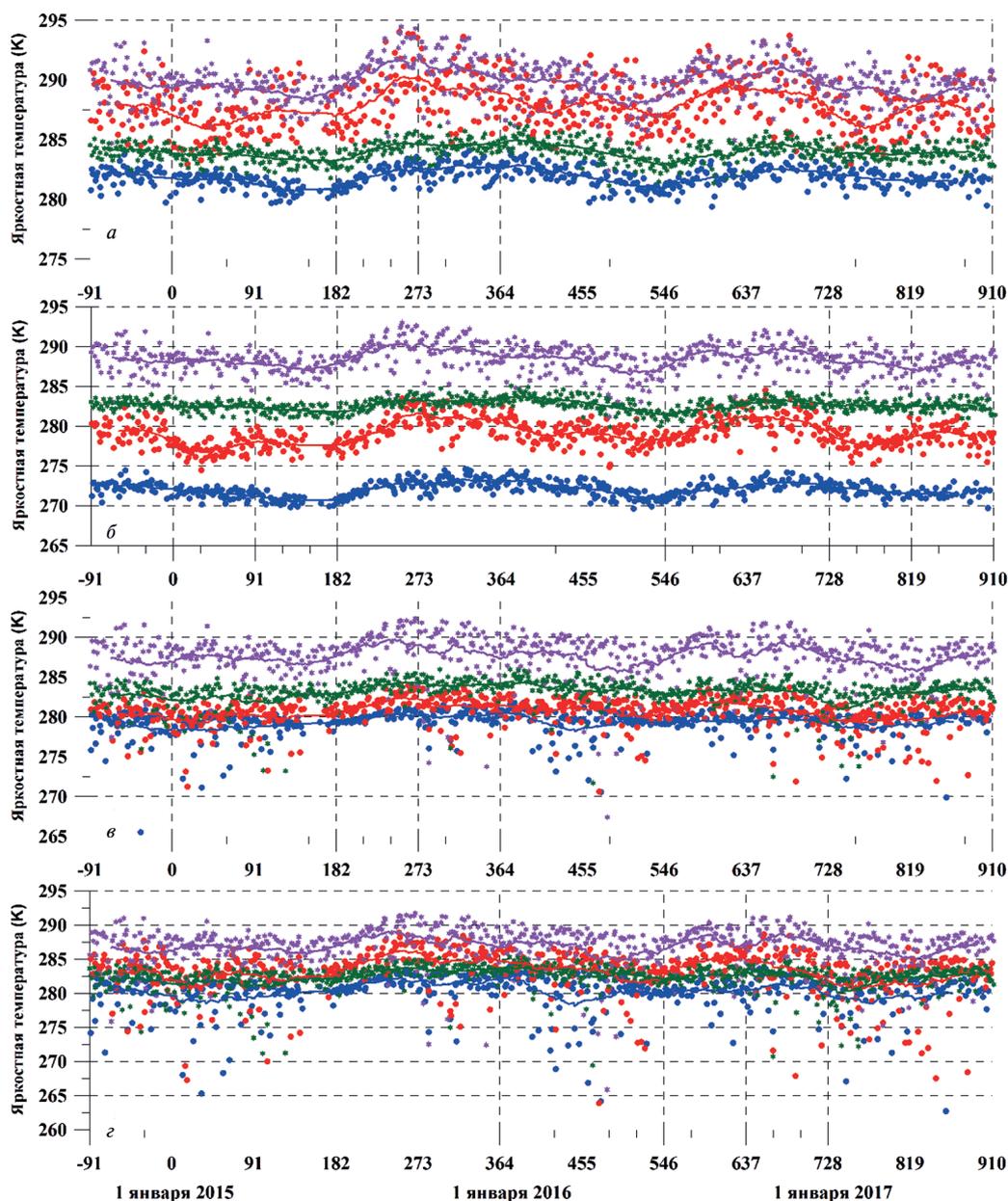


Рис. 6. Временные ряды яркостных температур на частотах 10,6 ГГц (а, в) и 36,5 ГГц (б, г) на вертикальной (а, в) и горизонтальной (б, г) поляризациях над тестовой областью в дождевых широколиственных лесах Амазонки. Синие точки — данные МТВЗА-ГЯ, красные точки — данные AMSR2

Для разностей $\Delta T_{\text{я}} = T_{\text{я МТВЗА-ГЯ}} - T_{\text{я AMSR2}}$ были рассчитаны линии трендов $\Delta T_{\text{я}}(N, \nu) = a_0 + a_1 N$. На большинстве каналов разность $\Delta T_{\text{я}}$ за 1001 день изменилась меньше, чем на 1 К, и только на 23,8 и 36,5 ГГц на Г-поляризации составила 1,7–2,0 К, что свидетельствует о высокой долговременной стабильности функционирования радиометра МТВЗА-ГЯ в космосе.

Глобальные поля яркостных температур

Измерения на каналах МТВЗА-ГЯ дают наглядное количественное представление о пространственно-временной изменчивости геофизических полей, влияющих на уходящее микроволновое излучение Земли. Вариации параметров подповерхностных слоёв и поверхности отображаются в полях $T_{\text{я}}$ на частотах 10,6–91,6 ГГц, характеристики поверхности и интегральные параметры атмосферы могут быть восстановлены по данным зондирования на частотах 10–48, 91 и 176–190 ГГц, а об изменчивости характеристик атмосферы и стратосферы можно судить по измерениям в диапазонах частот 52–58 и 176–190 ГГц (Успенский и др., 2016, 2017; Mitnik et al., 2015, 2017a–d).

На *рис. 7а, б и 8а, б* (см. с. 89) показаны глобальные поля $T_{\text{я}}$ на частоте $\nu = 10,6$ ГГц на В- и Г-поляризациях за 15 февраля и 9 августа 2017 г. соответственно. Измерения на этой частоте со спутников TRMM, Aqua, Windsat, GCOM-W1 и GMI применялись и применяются для восстановления полей ТПО и приводного ветра (Donlon et al., 2012; Ebuchi, 2017; Gentemann, Hilburn, 2015; Nielsen-Englyst et al., 2018; Pearson et al., 2018). Пространственное разрешение МВ-данных составляет 20–30 км, что уступает разрешению в ИК-диапазоне (сотни метров – один километр). Облака препятствуют оценке ТПО по данным ИК-сенсоров, и поэтому безусловным приоритетом МВ-радиометрии является определение ТПО при облачности. Поля $T_{\text{я}}^{\text{B}}(10)$ отражают крупномасштабные особенности и сезонные различия распределения температуры поверхности воды, что следует из сравнения с картами ТПО за 15 февраля и 9 августа 2017 г. (см., например, <http://icdc.cen.uni-hamburg.de/1/daten/ocean/sst-reynolds.html>). Максимальное значение $T_{\text{я}}^{\text{B}}(10)$ взято равным 240 К. При изменении t_0 от 0 до 30 °С значения увеличиваются от 195–198 до 208–211 К, что вызвано в основном ростом ТПО и лишь частично (на 1–3 К) увеличением паросодержания атмосферы с 5–10 до 40–50 кг/м². При $t_0 > 10$ °С производная $\partial T_{\text{я}}^{\text{B}} / \partial t_0 \approx 0,55$ К/°С, а при $-2 < t_0 < 10$ °С производная снижается до $\sim 0,3$ К/°С. Зоны облачности и осадков характеризуются значениями $T_{\text{я}}^{\text{B}} > 210$ –215 К и выделяются на *рис. 7 и 8* в виде пятен и полос.

Значения $T_{\text{я}}^{\text{B}}$ растут и со скоростью ветра, что следует из сравнения *рис. 7б и 8б* с полями $T_{\text{я}}^{\text{Г}}$ на *рис. 7а и 8а*. Влияние ветра на $T_{\text{я}}$ океана на Г-поляризации значительно больше, чем на В-поляризации. Из экспериментальных данных и модельных представлений следует, что производная $\partial T_{\text{я}}^{\text{Г}} / \partial W$ незначительно меняется с углом падения в диапазоне $\theta = 30$ –70° и составляет $\sim 0,9$ –1,0 К/(м/с) (Liu et al., 2011; Meissner, Wentz, 2012; Shibata, 2006). При ветрах $W \approx 10$ –2 м/с приращения $T_{\text{я}}^{\text{Г}}(10)$ относительно областей океана со слабым ветром составят ~ 8 –15 К и больше.

Максимальные значения $T_{\text{я}}^{\text{Г}}(10)$ при построении были ограничены 110–120 К (см. *рис. 7а и 8а*), что визуализирует структуру как полей приводного ветра, так и облачности и осадков (второе и третье слагаемые в формуле (1)) в атмосферных фронтах, циклонах, во внутритропической зоне конвергенции. Значения $T_{\text{я}}^{\text{Г}}(10)$ увеличиваются с ростом водозапаса облаков и интенсивности осадков и достигают 100–120 К и больше.

Ширина зон осадков и мощной облачности обычно заметно меньше ширины зон с высокими скоростями ветра, что следует из сравнения полей яркостных температур на частотах $\nu = 42,0$ ГГц и $\nu = 10,6$ ГГц (см. *рис. 7 и 8*). Поглощение в облаках на $\nu = 42,0$ ГГц в 12–15 раз больше, чем на $\nu = 10,6$ ГГц (Башаринов и др., 1974). В результате возрастают яркостные контрасты облачности на окружающем фоне, что особенно важно при изучении атмосферных процессов в высоких широтах, где водозапас большинства форм облачности не превышает 0,3 кг/м² (Облака..., 1989). Индикации облачности способствует и лучшее пространственное разрешение яркостных температур на частотах > 36 ГГц.

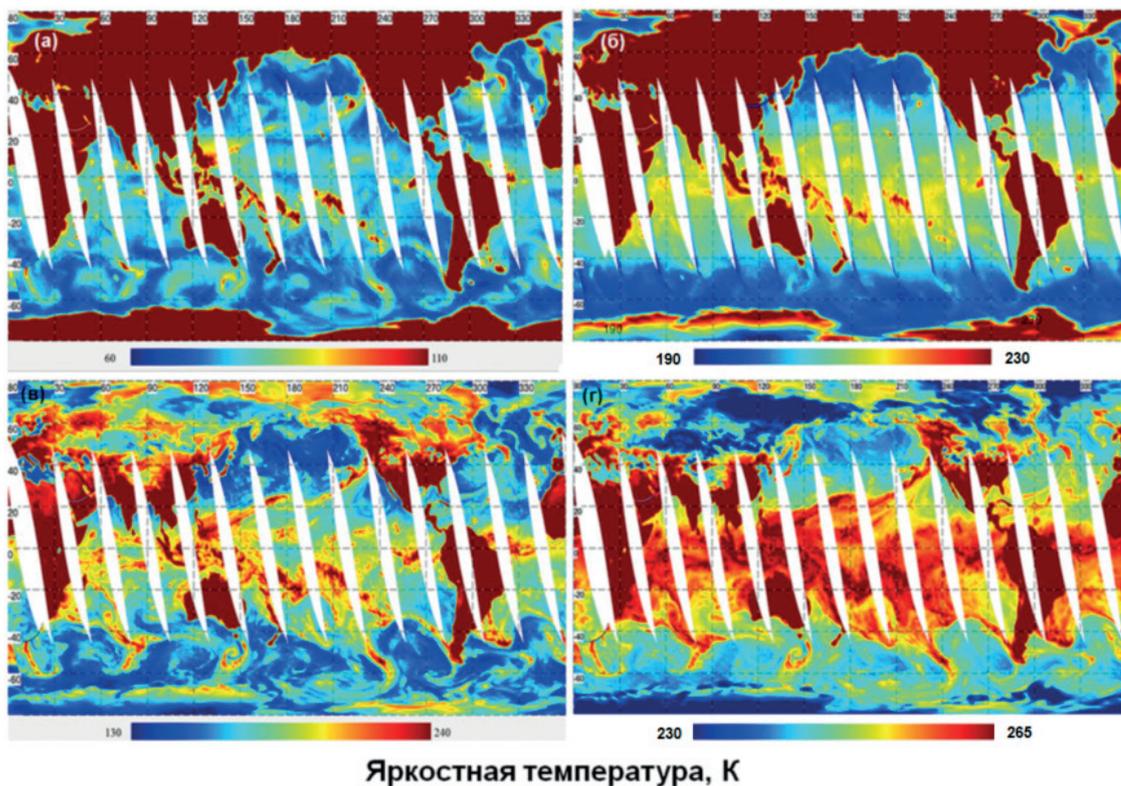


Рис. 7. Глобальные поля яркостных температур на частотах 10,6 ГГц (а, б) и 42,0 ГГц (в, г) на горизонтальной (а, в) и вертикальной (б, г) поляризациях в меркаторской проекции по измерениям МТВЗА-ГЯ 15 февраля 2017 г.

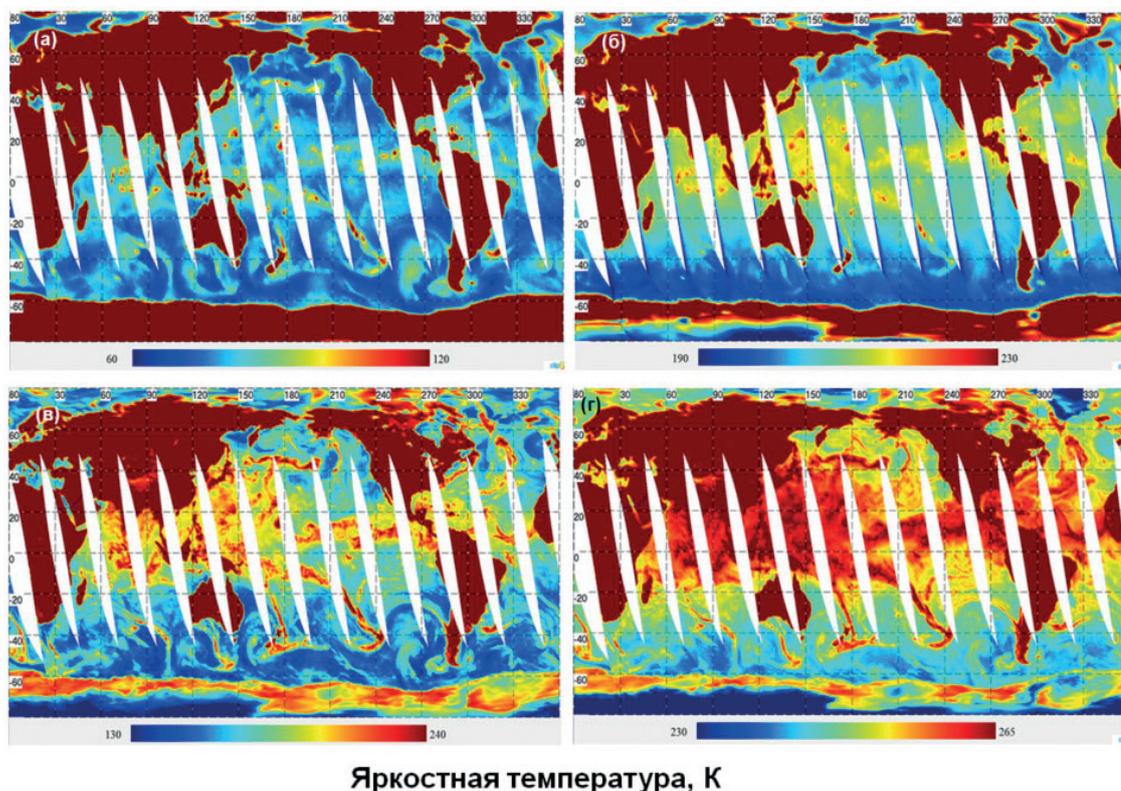


Рис. 8. Глобальные поля яркостных температур на частотах 10,6 ГГц (а, б) и 42,0 ГГц (в, г) на горизонтальной (а, в) и вертикальной (б, г) поляризациях в меркаторской проекции по измерениям МТВЗА-ГЯ 9 августа 2017 г.

Пространственное разрешение определяет возможности получения количественной информации и мониторинга морских и материковых льдов и земных покровов. Яркостная температура $T_{\text{я}}^{\Gamma}(42)$ морских льдов зимой может быть и выше, и ниже температуры материковых покровов, что иллюстрируют изображения северной и южной областей Земли в полярной проекции (рис. 9). Вариации $T_{\text{я}}^{\Gamma}(42)$ морских льдов в Арктике значительны: от приблизительно 160 до приблизительно 240 К, что обусловлено вариациями коэффициентов излучения и температуры поверхности, заснеженности и сплочённости различных видов льда (Comiso, 2010). Лёд отмечается в северной части Берингова моря, на севере Охотского моря и на шельфе Сахалина, на северо-востоке Баренцева моря, в море Баффина, к востоку от Гренландии. Яркостная температура материковых покровов также характеризуется большим разнообразием: от приблизительно 150 К в Восточной Сибири до 245 К и выше на юго-западе Европы. Полоса пониженных температур протянулась на восток от 40 до 135° в.д. между 45 и 55° с. ш. С севера и с юга её обрамляют полосы с более высокой температурой. Над открытой водной поверхностью прорисовываются фронтальные системы циклонов. Облачность и осадки вызывают рост $T_{\text{я}}^{\Gamma}(42)$ до 200–220 К; $T_{\text{я}}^{\Gamma}$ циклонов севернее 60° с. ш. заметно ниже. Так, например, в циклоне к северо-востоку от Исландии $T_{\text{я}}^{\Gamma}(42) \approx 160\text{--}180$ К. Минимальные температуры (<140 К) зарегистрированы над открытой поверхностью спокойного океана, а также над Гренландией севернее 68° с. ш.

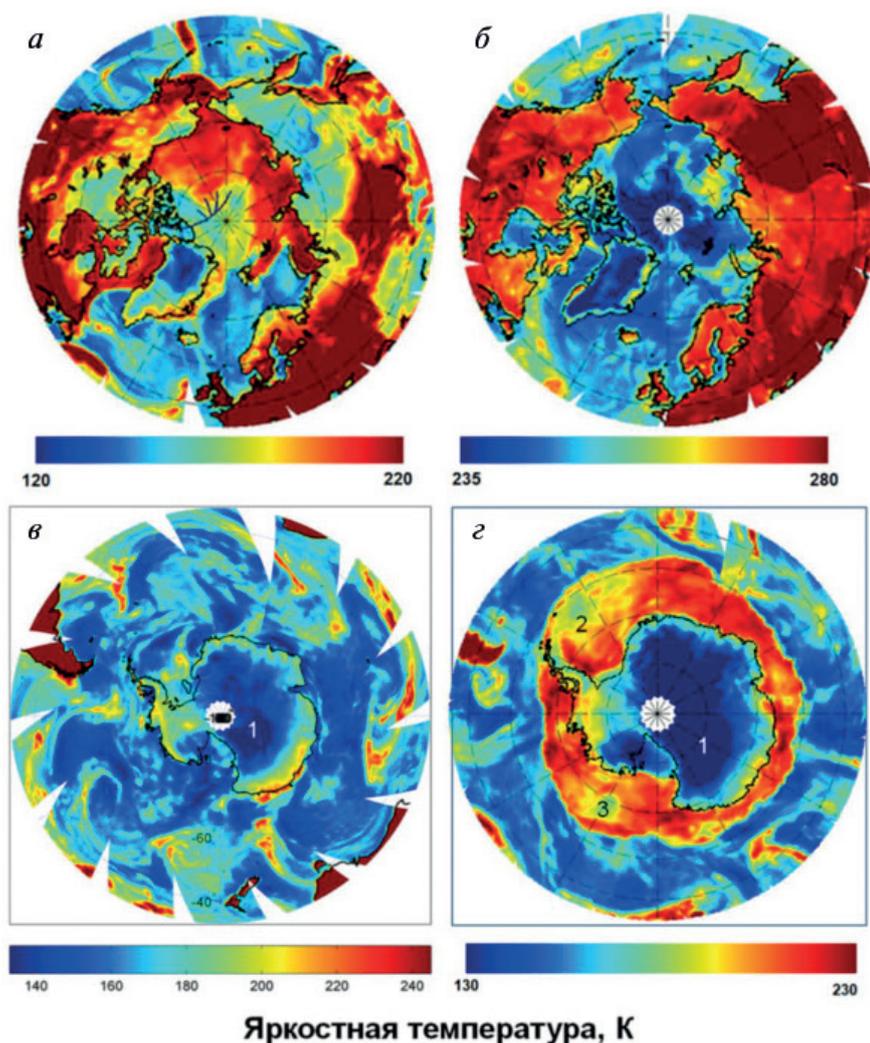


Рис. 9. Яркостные температуры северной (а, б) и южной (в, г) областей Земли на частоте 42,0 ГГц на горизонтальной (а, в, г) и вертикальной (б) поляризациях по измерениям МТВЗА-ГЯ 23 февраля (а, в) и 9 августа (б, г) 2017 г.

Очень низкие значения $T_{\text{я}}^{\Gamma}$ (42) наблюдаются и над Восточной Антарктидой (1), что обусловлено низкой температурой воздуха у поверхности (зимой на высоте 3–4 км она составляет $-(65...75)^\circ\text{C}$) и низким коэффициентом излучения снежно-фирнового покрова на горизонтальной поляризации (по данным (Brucker et al., 2011; Macelloni et al., 2007), он равен примерно 0,6) (см. *рис. 9б*). Яркостная температура морского льда вокруг Антарктиды $T_{\text{я}}^{\Gamma}$ (48) $\approx 200\text{--}230\text{ K}$. Над шельфовыми льдами в морях Уэдделла (2) и Росса (3) она ниже. Ледяной покров опоясывает цепочка циклонов, яркостный контраст которых на окружающем фоне обусловлен совместным влиянием излучения облачности, осадков и взволнованной водной поверхности (Mitnik et al., 2018b).

Обсуждение и выводы

Микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ, разработанный и исследованный в отделе 60 АО «Российские космические системы», является одним из основных видов целевой аппаратуры на борту метеорологических спутников серии «Метеор-М». По информационным характеристикам (см. *таблицу*) и стабильности работы в космосе данные МТВЗА-ГЯ соответствуют зарубежным спутниковым радиометрам, что подтверждает анализ временных рядов $T_{\text{я}}^{\text{B},\Gamma}(v)$ над различными областями Земли (см. *рис. 6*) и глобальных полей яркостных температур в различные сезоны (см. *рис. 7–9*). Этот вывод подкрепляется широким спектром приложений данных МТВЗА-ГЯ, включающим: восстановление скорости приводного ветра, водозапаса облаков и паросодержания атмосферы над океаном и состояния земных покровов; оценку характеристик морских и материковых льдов; обнаружение мощной облачности и осадков над сушей и внезапных стратосферных потеплений; анализ тропических, внетропических и полярных циклонов и др. (Митник и др., 2012, 2015; Чернявский и др., 2017; Barsukov et al., 2016; Mitnik et al., 2010, 2015, 2017a–d, 2018a–c).

Использование измерений МТВЗА-ГЯ зависит от надёжности калибровки и алгоритмов восстановления параметров. Важнейшими составляющими теоретических и экспериментальных работ по калибровке радиометра и валидации продуктов, полученных на основе измерений, являются: моделирование яркостных температур $T_{\text{я}}^{\text{B},\Gamma}(v)$ на частотах МТВЗА-ГЯ с использованием современной программы переноса МВ-излучения в системе «подстилающая поверхность – атмосфера»; разработка усовершенствованных алгоритмов оценки геофизических параметров и проведение измерений до и после запуска спутника на полигонах в различных физико-географических зонах. Дистанционные и контактные измерения могут выполняться с земной поверхности, судов и самолётов, в том числе и с использованием аналогов спутниковых радиометров, и включать данные океанических буев, станций радиозондирования и GPS (Mears et al., 2015). Тестовые области могут быть выбраны в лесных массивах Амазонки и вблизи высотной метеорологической станции Zotto в Сибири, в Восточной Антарктиде (купол Dome C, станция Восток и др.), в Гренландии (район станции Summit), в Баренцевом, Охотском и Японском морях. Большие возможности заключены и в кросс-калибровке МТВЗА-ГЯ с МВ-радиометрами на других спутниках (Du et al., 2014; Meissner, Wentz, 2010; Moradi et al., 2015; Wilheit, 2013). Для кросс-калибровки даже при совпадении частот моделирование $T_{\text{я}}^{\text{B},\Gamma}(v)$ также необходимо для учёта различий в углах зондирования, пространственном разрешении и др.

Очевидна необходимость проведения работ по калибровке и валидации данных МТВЗА-ГЯ на спутниках «Метеор-М» № 2-2 и № 2-3 и «Метеор-МП» (Cherny et al., 2017), планируемых к запуску в 2018–2024 гг. Содержание работ может уточняться при анализе временных рядов измерений на каналах МТВЗА-ГЯ на спутниках «Метеор-М» № 2-2 и последующих. Результаты анализа могут быть также использованы для коррекции конструкции радиометра и установки его на спутнике. Данные измерений и продукты должны быть доступны для пользователей в нашей стране и за рубежом.

Без надёжной калибровки, отлаженных алгоритмов и валидации продуктов, без прочного международного сотрудничества данные МТВЗА-ГЯ могут быть представлены в основном

в виде картинок, иллюстрирующих «успехи» Роскосмоса в области МВ-радиометрии, а деньги, затраченные на изготовление радиометров и запуск спутников, в значительной степени будут выброшены на ветер. При отсутствии калиброванных данных МТВЗА-ГЯ пользователи и в дальнейшем будут ориентироваться на бесплатно предоставляемые глобальные МВ-измерения и продукты зарубежных радиометров.

Работа выполнена при частичной поддержке Комплексной программы Дальневосточного отделения РАН (проект № 18-I-010).

Литература

1. Асмус В. В., Загребаев Л. А., Макриденко О. Е., Милехин О. Е., Соловьев В. И., Успенский А. Б., Фролов А. В., Хайлов М. Н. Система полярно-орбитальных метеорологических спутников серии «Метеор-М» // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 5–16.
2. 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. 257–264.
3. Башаринов А. Е., Гурвич А. С., Егоров С. Т. Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974. 187 с.
4. Болдырев В. В., Ильгасов П. А., Панцов В. Ю., Прохоров Ю. Н., Стрельников Н. И., Черный И. В., Чернявский Г. М., Яковлев В. В. Спутниковый микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 1. С. 243–248.
5. Веселов В. М., Милицкий Ю. А., Мировский В. Г., Шарков Е. А., Эткин В. С. Экспериментальная методика определения параметров антенн радиотепловых бортовых комплексов // Исследование Земли из космоса. 1981. № 2. С. 63–75.
6. Ермаков Д. М., Шарков Е. А., Чернушич А. П. Спутниковое радиотепловидение на синоптических и климатически значимых масштабах // Исследование Земли из космоса. 2016. № 5. С. 3–9.
7. Кардашев Н. С., Струков И. А. Спутниковый радиоастрономический эксперимент «Реликт» // Наука и человечество. М.: Знание, 1987. С. 173–185.
8. Митник М. Л., Митник Л. М. Восстановление паросодержания атмосферы и водозапаса облаков над океаном по данным микроволнового зондирования со спутников DMSP, TRMM, AQUA и ADEOS-II // Исследование Земли из космоса. 2006. № 4. С. 34–41.
9. 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.
10. Митник Л. М., Митник М. Л., Гурвич И. А., Выкочко А. В., Кузлякина Ю. А., Черный И. В., Чернявский Г. М. Исследование эволюции тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана по данным СВЧ-радиометров МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 1 и AMSR-E со спутника Aqua // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 121–128.
11. Митник Л. М., Кулешов В. П., Митник М. Л., Стрельцов А. М., Чернявский Г. М., Черный И. В. (2015a) СВЧ-сканер-зондировщик МТВЗА-ГЯ на новом российском метеорологическом спутнике «Метеор-М» № 2: моделирование и анализ измерений в различных физико-географических условиях // 13-я Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. Москва, ИКИ РАН. 2015. С. 166.
12. Митник Л. М., Митник М. Л., Чернявский Г. М., Чурный И. В., Выкочко А. В., Пичугин М. К. (2015b) Приводный ветер и морской лёд в Баренцевом море по данным микроволновых измерений со спутников «Метеор-М» № 1 и GCOM-W1 в январе – марте 2013 г. // Исследование Земли из космоса. 2015. № 6. С. 1–11.
13. Наконечный В. П., Панцов В. Ю., Прохоров Ю. Н., Стрельников Н. И., Черный И. В., Чернявский Г. М., Данилов С. Г., Казанцев О. Ю. Оптико-микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ОК // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Вып. 1. Т. 1. С. 197–203.
14. Облака и облачная атмосфера: Справочник / под ред. И. П. Мазина, А. Х. Хргиана. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 648 с.

15. 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 // Исследование Земли из космоса. 2016. № 5. С. 57–70.
16. Успенский А. Б., Крамчанинова Е. К., Косцов В. С., Успенский С. А., Черный И. В. Развитие системы внешней калибровки и валидации данных измерений микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ КА «Метеор-М» № 2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 27–35.
17. Цейтлин Н. М. Антенная техника и радиоастрономия. М.: Сов. радио, 1976. 352 с.
18. Черный И. В., Чернявский Г. М., Успенский А. Б., Пегасов В. М. СВЧ-радиометр МТВЗА спутника «Метеор-3М» № 1: предварительные результаты летных испытаний // Исследование Земли из космоса. 2003. № 6. С. 1–15.
19. Чернявский Г. М. Отечественные технологии спутниковой СВЧ-радиометрии // Аэрокосмический курьер. 2007. № 6. С. 22–24.
20. 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 // 15-я Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. Москва, ИКИ РАН. 2017. С. 8.
21. Barsukov I., Cherniavsky G., Cherny I., Mitnik L., Kuleshov V., Mitnik M. New Russian meteorological satellite Meteor-M N 2: Sensing of the subsurface, surface and atmospheric characteristics by MTVZA-GY microwave imager/sounder // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2016. P. 5528–5531.
22. Bentamy A., Grodsky S. A., Elyouncha A., Chapron B., Desbiolles F. Homogenization of scatterometer wind retrievals // Intern. J. Climatology. 2017. V. 37. Iss. 2. P. 870–889.
23. Biswas S. K., Farrar S., Gopalan K., Santos-Garcia A., Linwood Jones W., Bilanow S. Intercalibration of microwave radiometer brightness temperatures for the Global Precipitation Measurement Mission // IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing. 2007. V. 51. No. 3. P. 1465–1477.
24. Brown S., Ruf C. Determination of a hot black body reference target over the Amazon rainforest for the on-orbit calibration of microwave radiometers // J. Oceanic Atmospheric Technology. 2005. V. 22. No. 9. P. 1340–1352.
25. Brucker L., Picard G., Arnaud L., Barnola J.-M., Schneebeli M., Brunjail H., Lefebvre E., Fily M. Modeling time series of microwave brightness temperature at Dome C, Antarctica, using vertically resolved snow temperature and microstructure measurements // J. Glaciology. 2011. V. 57. No. 201. P. 171–182.
26. Cherny I. V., Raizer V. Yu. Passive Microwave Remote Sensing of Oceans. Wiley-Praxis. Chichester, N. Y.: Wiley, 1998. 195 p.
27. Cherny I. V., Mitnik L. M., Mitnik M. L., Uspensky A. B., Streltsov A. M. On-orbit calibration of the “Meteor-M” Microwave Imager/Sounder // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2010. P. 558–561.
28. Cherny I. V., Chernyavsky G. M., Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L. Advanced Microwave Imager/Sounder MTVZA-GY-MP for New Russian Meteorological Satellite // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2017. P. 1220–1223.
29. Comiso J. C. Polar Oceans from Space. N. Y.: Springer Publishing, 2010. 507 p.
30. Das N. N., Colliander A., Chan S. K. Intercomparisons of brightness temperature observations over land from AMSR-E and WindSat // IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing. 2014. V. 52. No. 2. P. 452–464.
31. Donlon C. J., Martin M., Stark J., Roberts-Jones J., Fiedler E., Wimmer W. The Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA) system // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 116. P. 140–158.
32. Du J., Kimball J. S., Shi J., Jones L. A., Wu S., Sun R., Hu Y. Inter-calibration of satellite passive microwave land observations from AMSR-E and AMSR2 using overlapping FY3B-MWRI sensor measurements // Remote Sensing. 2014. V. 6. P. 8594–8616.
33. Ebuchi N. Evaluation of marine surface wind speed observed by AMSR2 on GCOM-W // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2017. V. 10. No. 9. P. 3955–3962.
34. Falcone V. J., Griffin M. K., Isaacs R. G., Pickle J. D., Morrissey J. F., Bussey A., Kakar R., Wang J., Racette P. SSM/T-2 Calibration data analyses // Proc. IEEE Topical Symp. Combined Optical, Microwave, Earth and Atmosphere Sensing. 1993. P. 165–168.
35. Gentemann C. L., Hilburn K. A. In situ validation of sea surface temperatures from the GCOM-W1 AMSR2 RSS calibrated brightness temperatures // J. Geophysical Research. Oceans. 2015. V. 120. P. 3567–3585.
36. Gentemann C. L., Wentz F. J., Brewer M., Hilburn K. A., Smith D. K. Passive microwave remote sensing of the ocean: an overview // Oceanography from Space, revisited / eds. V. Barale, J. Gower, L. Alberotanza. Heidelberg: Springer, 2010. P. 19–44.

37. *Gorobets N. N., Dakhov V. M., Cherny I. V.* Millimeter-range multi-channel two polarization horn antenna // Proc. 3rd Intern. Symp. Physics and Engineering of Millimeter and Sub-Millimeter Waves. Kharkov, 1998. P. 618–619.
38. *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.
39. *Imaoka K., Kachi M., Rasahara M., Ito N., Nakagawa K., Oki T.* Instrument performance and calibration of AMSR-E and AMSR2 // Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science. Kyoto, Japan, 2010. V. 38. Pt. 8.
40. *Jackson P. T. J., Hsu A. Y., Armand N., Kutuza B., Shutko A., Tishchenko Y., Petrenko B., Evtushenko A., Smirnov M., Savorskij V., Sorokin I., Nikolaev A., Sidorenko A.* Priroda passive microwave observations in the Southern Great Plains 1997 hydrology experiment // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'98). 1998. P. 1568–1570.
41. *Knapp K. R., Ansari S., Bain C. L., Bourassa M. A., Dickinson M. J., Funk C.* Globally gridded satellite observations for climate studies // Bull. American Meteorological Society. 2011. V. 92. No. 7. P. 893–907.
42. *Kroodasma R. A., McKague D. S., Ruf C. S.* Extension of vicarious cold calibration to 85–92 GHz for spaceborne microwave radiometers // IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing. 2013. V. 52. No. 9. P. 4743–4751.
43. *Kunkee D. B., Hong Y., Thompson D. A., Werner M. F., Poe G. A.* (2008a) Analysis of the Special Sensor Microwave Imager Sounder (SSMIS) fields-of-view on DMSP F-16 // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2008. V. 46. No. 4. P. 934–945.
44. *Kunkee D. B., Poe G. A., Boucher D. J., Swadley S. D., Hong Y., Wessel J. E., Uliana E. A.* (2008b) Design and evaluation of the First Special Sensor Microwave Imager/Sounder // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2008. V. 46. No. 4. P. 863–883.
45. *Liu Q., Weng F., English S. J.* An improved fast microwave water emissivity model // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2011. V. 49. P. 1238–1250.
46. *Macelloni G., Brogioni M., Pampaloni P., Cagnati A.* Multifrequency microwave emission the Dome-C area on the East Antarctic Plateau: Temporal and spatial variability // IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing. 2007. V. 45. No. 7. P. 2029–2039.
47. *Maeda T., Taniguchi Y., Imaoka K.* GCOM-W1 AMSR2 level 1R product: dataset of brightness temperature modified using the antenna pattern matching technique // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2016. V. 54. No. 2. P. 770–782.
48. *Mears C. A., Wang J., Smith D., Wentz F. J.* Intercomparison of total precipitable water measurements made by satellite-borne microwave radiometers and ground-based GPS instruments // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2015. V. 120. P. 2492–2504.
49. *Meissner T., Wentz F.* Intercalibration of AMSR-E and Windsat brightness temperature measurements over land scenes // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2010. P. 3218–3219.
50. *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.
51. *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. CiteID 8065. DOI: 10.1029/2002RS002659.
52. *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.
53. *Mitnik L. M., Cherny I. V., Mitnik M. L., Chernyavskii G. M., Kuleshov V. P., Baranyuk A. V.* The MTVZA-GY radiometer on the Meteor-M No. 2 satellite: the first 10 months in an orbit, calibration of data and retrieval of geophysical parameters // Intern. Symp. “Atmospheric Radiation and Dynamics” (ISARD-2015): abstr. Saint Petersburg, Petrodvorets. 2015. P. 23–25.
54. *Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L.* (2017a) Water vapor in the atmosphere over Greenland and the surrounding seas from measurements of MTVZA-GY, AMSR2, and GMI microwave radiometers // Intern. Symp. “Atmospheric Radiation and Dynamics” (ISARD-2017): abstr. Saint Petersburg, Petrodvorets. 2017. P. 23.
55. *Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Cherny I. V.* (2017b) Statistics of surface and atmospheric microwave properties at Summit Station, Greenland from MTVZA-GY observations in the range 10–190 GHz // Progress in Electromagnetics Research Symp. (PIERS): Abstr. St. Petersburg, Russia. 2017. P. 327.
56. *Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Barsukov I. A., Cherny I. V., Chernyavsky G. M.* (2017c) Multichannel Scanning Imager-Sounder MTVZA-GY on Russian Weather Satellite Meteor-M No.2:

- The Simulated and Measured Brightness Temperatures in the Range of 10–190 GHz // Progress in Electromagnetics Research Symp. (PIERS): abstr. St. Petersburg, Russia. 2017. P. 326.
57. *Mitnik L., Kuleshov V., Mitnik M., Streltsov A. M., Cherniavsky G., Cherny I.* (2017d) 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.
 58. *Mitnik L., Kuleshov V., Mitnik M., Cherny I., Cherniavsky G.* (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.
 59. *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. P. 4513–4530. DOI: 10.1080/01431161.2018.1425569.
 60. *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, 2018. P. 5560–5563.
 61. *Mo T.* Postlaunch calibration of the NOAA-18 Advanced Microwave Sounding Unit-A // IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing. 2007. V. 45. No. 7. P. 1928–1937.
 62. *Mo T.* A study of the NOAA near-nadir AMSU-A brightness temperatures over Antarctica // J. Atmos. Oceanic Technology. 2010. V. 27. No. 6. P. 995–1004.
 63. *Mo T.* Calibration of the NOAA AMSU-A radiometers with natural test sites // IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing. 2011. V. 49. No. 9. P. 3334–3342.
 64. *Moradi I., Ferraro R., Eriksson P., Weng F.* Intercalibration and validation of observations from ATMS and SAPHIR microwave sounders // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2015. V. 53. No. 11. P. 5915–5925.
 65. *Nielsen-Englyst P., Høyer L. J., Pedersen T. L., Gentemann C., Alerskans E., Block T., Donlon C.* Optimal estimation of sea surface temperature from AMSR-E // Remote Sensing. 2018. V. 10. P. 229. DOI: 10.3390/rs10020229.
 66. *Nobre C. A., Obregon G. O., Marengo J. A., Fu R., Poveda G.* Characteristics of Amazonian climate: Main features // Amazonia and Global Change / eds. M. Keller, M. Bustamante, J. Gash, P. Dias. Geophysical Monograph Series. 2009. V. 186. P. 149–162.
 67. *Pearson K., Merchant C., Embury O., Donlon C.* The Role of Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 channels within an optimal estimation scheme for sea surface temperature // Remote Sensing. 2018. V. 10. P. 90. DOI: 10.3390/rs10010090.
 68. *Prigent C., Jaumouillé E., Chevallier F., Aires F.* A parameterization of the microwave land surface emissivity between 19 and 100 GHz, anchored to satellite-derived estimates // IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing. 2008. V. 46. No. 2. P. 344–352.
 69. *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.
 70. *Shibata A. A.* Wind speed retrieval algorithm by combining 6 and 10 GHz data from Advanced Microwave Scanning Radiometer: Wind speed inside hurricanes // J. Oceanography. 2006. V. 62. P. 351–359.
 71. *Spencer R. W., Christy J. R.* Precision lower stratospheric temperature monitoring with the MSU: Technique, validation, and results 1979–91 // J. Climate. 1993. No. 6. P. 1194–1204.
 72. *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.
 73. *Tian Y., Peters-Lidard C. D., Harrison K. W., Prigent C., Norouzi H., Aires F., Boukabara S. A., Furuza-wa F. A., Masunaga H.* Quantifying uncertainties in land-surface microwave emissivity retrievals // IEEE Trans. Geoscience Remote Sens. 2014. V. 52. No. 2. P. 829–840.
 74. *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. Geophys. Research. Atmosphere. 2013. V. 118. P. 1–14.
 75. *Wilheit T.* Comparing calibrations of similar conically scanning window-channel microwave radiometers // IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing. 2013. V. 51. No. 3. P. 1453–1464.
 76. *Wimmers A. J., Velden C. S.* Seamless advective blending of total precipitable water retrievals from polar orbiting satellites // J. Applied Meteorology and Climatology. 2011. V. 50. No. 5. P. 1024–1036.
 77. *Zabolotskikh E., Mitnik L., Chapron B.* An updated geophysical model for AMSR-E and SSMIS brightness temperature simulations over oceans // Remote Sensing. 2014. V. 6. No. 3. P. 2317–2342.

Microwave sensing of the ocean, atmosphere and land surface from Meteor-M No. 2 data

G. M. Cherniavsky¹, L. M. Mitnik², V. P. Kuleshov², M. L. Mitnik², I. V. Cherny¹

¹ Russian Space Systems JSC, Moscow 117997, Russia

E-mail: icherny@cpi.space.ru

² V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia

E-mail: mitnik@poi.dvo.ru

The design features of MTVZA-GY microwave radiometer on board Meteor-M No. 2 meteorological satellite are considered, information on operation of the instrument in space is presented and the results of measurements over various physical and geographical regions of the Earth are described. The satellite was launched on 8 July 2014 to a solar-synchronous circular orbit with a height of 830 km. The 29 channels of the radiometer measure the rising radiation of the Earth at frequencies ν in the range from 10 to 190 GHz when scanning along a cone at an angle of 65° to the local normal. Internal calibration of MTVZA-GY channels is carried out on each scan and provides correction of gain variations and data representation in the antenna temperature scale $T_a^{V,H}(\nu)$ on vertical (V) and horizontal (H) polarizations. The transformation of $T_a^{V,H}(\nu)$ into brightness temperatures $T_b^{V,H}(\nu)$ was carried out from the calculated values of $T_b^{V,H}(\nu)$ over homogeneous «hot» (Amazon forests) and «cold» (the ocean off the coast of Antarctica with weak wind and no clouds) areas (external calibration). Comparison of the time series $T_b^{V,H}(\nu)$ of MTVZA-GY and AMSR2 (on the Japan satellite GCOM-W1) over the test areas with a diameter of 200 km in the Amazon forests, Antarctica and Greenland demonstrates long-term stability of MTVZA-GYA operation. The global $T_b^{V,H}(\nu)$ fields give an idea of the temperature of the ocean surface and the wind speed, the distribution of sea ice, the temperature of terrestrial and vegetative covers, Antarctica and Greenland, and the characteristics of cyclones over the ocean. In connection with the planned launches of Meteor-M No. 2-2 (December 2018) and Meteor-M No. 2-3 (2020) satellites with MTVZA-GY, the need to simulate brightness temperature, develop algorithms for parameter retrieving, calibration of radiometers and product validation is emphasized. The measurement data and products should be available to users in Russia and worldwide.

Keywords: remote sensing, microwave radiometry, calibration, validation, modeling, algorithms, MTVZA-GY, Meteor-M No. 2, AMSR2, brightness temperature, time series, long-term stability

Accepted: 08.07.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-78-100

References

1. Asmus V.V., Zagrebaev L.A., Makridenko O.E., Milekhin O.E., Solov'ev V.I., Uspenskii A.B., Frolov A.V., Khailov M.N., Sistema polyarno-orbital'nykh meteorologicheskikh sputnikov serii "Meteor-M" (System of polar-orbital meteorological satellites Meteor-M series), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2014, No. 12, pp. 5–16.
2. Barsukov I.A., Nikitin O.V., Strel'tsov A.M., Cherny I.V., Chernyavskii G.M., Predvaritel'naya obrabotka dannykh SVCh-radiometra MTVZA-GYa KA "Meteor-M" N 1 (Preliminary data processing of MTVZA-GY radiometer from Meteor-M No. 1 Space Apparatus), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 2, pp. 257–264.
3. Basharinov A.E., Gurvich A.S., Egorov S.T., *Radioizluchenie Zemli kak planety* (Radioemission of the Earth as a planet), Moscow, Nauka, 1974, 187 p.
4. Boldyrev V.V., Il'gasov P.A., Pantsov V.Yu., Prokhorov Yu.N., Strel'nikov N.I., Cherny I.V., Chernyavskii G.M., Yakovlev V.V., Sputnikovyi mikrovolnovyi skaner/zondirovshchik MTVZA-GYa (Satellite microwave scanner/sounder MTVZA-GY), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 5, No. 1, pp. 243–248.
5. 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.

6. Ermakov D. M., Sharkov E. A., Chernushich A. P., Sputnikovoe radioteplovidenie na sinopticheskikh i klimaticheski znachimykh masshtabakh (Satellite radio thermal imaging on synoptic- and climatically significant scales), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2016, No. 5, pp. 3–9.
7. Kardashev N. S., Strukov I. A., Sputnikovyi radioastronomicheskii eksperiment “Relikt” (Satellite radio-astronomical experiment “Relict”), *Nauka i Chelovechestvo*, Moscow, Znanie, 1987, pp. 173–185.
8. Mitnik M. L., Mitnik L. M., Vosstanovlenie parosoderzhaniya atmosfery i vodozapasa oblakov nad okeanom po dannym mikrovolnovogo zondirovaniya so sputnikov DMSP, TRMM, AQUA i ADEOS-II (Retrieval of total water vapor content and total cloud liquid water content from microwave sensing data from DMSP, TRMM, AQUA и ADEOS-II satellites), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2006, No. 4, pp. 34–41.
9. Mitnik L. M., Mitnik M. L., Kalibrovka i validatsiya — neobkhodimye sostavlyayushchie mikrovolnovykh radiometricheskikh izmerenii so sputnikov serii “Meteor-M” N 2 (Calibration and validation are required components of microwave radiometric measurements from Meteor-M series satellites), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 1, pp. 95–104.
10. Mitnik L. M., Mitnik M. L., Gurvich I. A., Vykocho A. V., Kuzlyakina Yu. A., Cherny I. V., Chernyavskii G. M., Issledovanie evolyutsii tropicheskikh tsiklonov v severo-zapadnoi chasti Tikhogo okeana po dannym SVCh-radiometrov MTVZA-GYa so sputnika “Meteor-M” N 1 i AMSR-E so sputnika Aqua (Investigation of tropical cyclone evolution in the Northwestern Pacific Ocean using data of microwave radiometers Meteor-M No. 1 MTVZA-GY and Aqua AMSR-E), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 4, pp. 121–128.
11. Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Strel'tsov A. M., Chernyavskii G. M., Cherny I. V., SVCh skaner-zondirovshchik MTVZA-GYa na novom rossiiskom meteorologicheskome sputnike “Meteor-M” N 2: modelirovanie i analiz izmerenii v razlichnykh fiziko-geograficheskikh usloviyakh (Microwave scanner-sounder MTVZA-GY on new Russian meteorological satellite Meteor-M No. 2: Modeling and measurement analysis at various physical-geographical conditions), *XIII Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya “Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa”* (XIII All-Russia Open Conf. “Current Problems of Remote Sensing of the Earth from Space”), Book of Abstracts, Moscow, 2015, p. 166.
12. Mitnik L. M., Mitnik M. L., Chernyavskii G. M., Cherny I. V., Vykocho A. V., Pichugin M. K., Privodnyi veter i morskoi led v Barentsevom more po dannym mikrovolnovykh izmerenii so sputnikov Meteor-M N 1 i GCOM-W1 v yanvare-marte 2013 g. (Surface wind and sea ice in the Barents Sea from microwave measurements obtained by Meteor-M No. 1 and GCOM-W1 satellites in January–March 2013), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, No. 6, pp. 1–11.
13. Nakonechnyi V. P., Pantsov V. Yu., Prokhorov Yu. N., Strel'nikov N. I., Cherny I. V., Chernyavskii G. M., Danilov S. G., Kazantsev O. Yu., Optiko-mikrovolnovyi skaner/zondirovshchik MTVZA-OK (Optic-microwave scanner/sounder MTVZA-OK), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2004, Vol. 1, No. 1, pp. 197–203.
14. *Oblaka i oblachnaya atmosfera. Spravochnik* (Clouds and cloudy atmosphere. Directory), I. P. Mazina, A. Kh. Khrgiana (eds.), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989, 648 p.
15. Uspensky A. B., Asmus V. V., Kozlov A. A., Kramchaninova E. K., Strel'tsov A. M., Chernyavskii G. M., Cherny 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.
16. Uspensky A. B., Kramchaninova E. K., Koscov V. S., Uspensky S. A., Cherny I. V., Razvitie sistemy vneshnei kalibrovki i validatsii dannykh izmerenii mikrovolnovogo radiometra MTVZA-GYa KA “Meteor-M” N 2 (Development of the calibration/validation system for microwave radiometer MTVZA-GYa observations from Meteor-M No. 2 satellite), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 4, pp. 27–35.
17. Tseitlin N. M., *Antennaya tekhnika i radioastronomiya* (Antenna Technology and Radioastronomy), Moscow: Soviet Radio, 1976, 352 p.
18. Cherny I. V., Chernyavskii G. M., Uspensky A. B., Pegasov V. M., SVCh-radiometr MTVZA sputnika “Meteor-3M” N 1: predvaritel'nye rezul'taty letnykh ispytaniy (Microwave radiometer MTVZA-GY on board Meteor-3M satellite: preliminary results of flight tests), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2003, No. 6, pp. 1–15.
19. Chernyavskii G. M., Otechestvennye tekhnologii sputnikovoi SVCh-radiometrii (Domestic technology of satellite microwave radiometry) *Aerokosmicheskii kur'er*, 2007, No. 6, pp. 22–24.
20. Chernyavskii G. M., Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Cherny I. V., Mikrovolnovoe zondirovanie okeana, atmosfery i zemnykh pokrovov po dannym sputnika “Meteor-M” N 2 (Microwave Sensing of the

- Ocean, Atmosphere and Land Surface from Meteor-M No. 2 Satellite Data), *XV Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (XV All-Russia Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Book of Abstracts, Moscow, 2017, p. 8.
21. Barsukov I., Cherniavsky G., Cherny I., Mitnik L., Kuleshov V., Mitnik M., New Russian meteorological satellite Meteor-M N 2: Sensing of the subsurface, surface and atmospheric characteristics by MTVZA-GY microwave imager/sounder, *Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, 2016, pp. 5528–5531.
 22. Bentamy A., Grodsky S.A., Elyouncha A., Chapron B., Desbiolles F., Homogenization of scatterometer wind retrievals, *Intern. J. Climatology*, 2017, Vol. 37, Issue 2, pp. 870–889.
 23. Biswas S.K., Farrar S., Gopalan K., Santos-Garcia A., Linwood Jones W., Bilanow S., Intercalibration of microwave radiometer brightness temperatures for the Global Precipitation Measurement Mission, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 2007, Vol. 51, No. 3, pp. 1465–1477.
 24. Brown S., Ruf C., Determination of a hot black body reference target over the Amazon rainforest for the on-orbit calibration of microwave radiometers, *J. Oceanic Atmospheric Technology*, 2005, Vol. 22, No. 9, pp. 1340–1352.
 25. Brucker L., Picard G., Arnaud L., Barnola J.-M., Schneebeli M., Brunjail H., Lefebvre E., Fily M., Modeling time series of microwave brightness temperature at Dome C, Antarctica, using vertically resolved snow temperature and microstructure measurements, *J. Glaciology*, 2011, Vol. 57, No. 201, pp. 171–182.
 26. Cherny I.V., Raizer V.Yu., *Passive Microwave Remote Sensing of Oceans*, Wiley-Praxis, Chichester, New York: Wiley, 1998, 195 p.
 27. Cherny I.V., Mitnik L.M., Mitnik M.L., Uspensky A.B., Streltsov A.M., On-orbit calibration of the "Meteor-M" Microwave Imager/Sounder, *Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, 2010, pp. 558–561.
 28. Cherny I.V., Chernyavsky G.M., Mitnik L.M., Kuleshov V.P., Mitnik M.L., Advanced Microwave Imager/Sounder MTVZA-GY-MP for New Russian Meteorological Satellite, *Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, 2017, pp. 1220–1223.
 29. Comiso J.C., *Polar Oceans from Space*, New York: Springer Publishing, 2010, 507 p.
 30. Das N.N., Colliander A., Chan S.K., Intercomparisons of brightness temperature observations over land from AMSR-E and WindSat, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 2014, Vol. 52, No. 2, pp. 452–464.
 31. Donlon C.J., Martin M., Stark J., Roberts-Jones J., Fiedler E., Wimmer W., The Operational sea surface temperature and sea ice analysis (OSTIA) system, *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 116, pp. 140–158.
 32. Du J., Kimball J.S., Shi J., Jones L.A., Wu S., Sun R., Hu Y., Inter-calibration of satellite passive microwave land observations from AMSR-E and AMSR2 using overlapping FY3B-MWRI sensor measurements, *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, pp. 8594–8616.
 33. Ebuchi N., Evaluation of marine surface wind speed observed by AMSR2 on GCOM-W, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, Vol. 10, No. 9, pp. 3955–3962.
 34. Falcone V.J., Griffin M.K., Isaacs R.G., Pickle J.D., Morrissey J.F., Bussey A., Kakar R., Wang J., Racette P., SSM/T-2 Calibration data analyses, *Proc. IEEE Topical Symp. Combined Optical, Microwave, Earth and Atmosphere Sensing*, 1993, pp. 165–168.
 35. Gentemann C.L., Hilburn K.A., In situ validation of sea surface temperatures from the GCOM-W1 AMSR2 RSS calibrated brightness temperatures, *J. Geophys. Research. Oceans*, 2015, Vol. 120, pp. 3567–3585.
 36. Gentemann C.L., Wentz F.J., Brewer M., Hilburn K.A., Smith D.K., Passive microwave remote sensing of the ocean: an overview, In: *Oceanography from Space, revisited*, V. Barale, J. Gower, L. Alberotanza (eds.), Heidelberg: Springer, 2010, pp. 19–44.
 37. Gorobets N.N., Dakhov V.M., Cherny I.V., Millimeter-range multi-channel two polarization horn antenna, *Proc. Third Intern. Symp. Physics and Engineering of Millimeter and Sub-Millimeter Waves*, Kharkov, 1998, pp. 618–619.
 38. 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.
 39. Imaoka K., Kachi M., Rasahara M., Ito N., Nakagawa K., Oki T., Instrument performance and calibration of AMSR-E and AMSR2, *Intern. Arch. Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Kyoto, Japan, 2010, Vol. XXXVIII, Part 8.
 40. Jackson P.T.J., Hsu A.Y., Armand N., Kutuza B., Shutko A., Tishchenko Y., Petrenko B., Evtushenko A., Smirnov M., Savorskiy V., Sorokin I., Nikolaev A., Sidorenko A., Priroda passive microwave observations in

- the Southern Great Plains 1997 hydrology experiment, *Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, 1998, pp. 1568–1570.
41. Knapp K. R., Ansari S., Bain C. L., Bourassa M. A., Dickinson M. J., Funk C., Globally gridded satellite observations for climate studies, *Bull. American Meteorol. Soc.*, 2011, Vol. 92, No. 7, pp. 893–907.
 42. Kroodsmas R. A., McKague D. S., Ruf C. S., Extension of vicarious cold calibration to 85–92 GHz for spaceborne microwave radiometers, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 2013, Vol. 52, No. 9, pp. 4743–4751.
 43. Kunkel D. B., Hong Y., Thompson D. A., Werner M. F., Poe G. A., Analysis of the Special Sensor Microwave Imager Sounder (SSMIS) fields-of-view on DMSP F-16, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2008, Vol. 46, No. 4, pp. 934–945.
 44. Kunkel D. B., Poe G. A., Boucher D. J., Swadley S. D., Hong Y., Wessel J. E., Uliana E. A., Design and evaluation of the First Special Sensor Microwave Imager/Sounder, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2008, Vol. 46, No. 4, pp. 863–883.
 45. Liu Q., Weng F., English S. J., An improved fast microwave water emissivity model, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2011, Vol. 49, pp. 1238–1250.
 46. Macelloni G., Brogioni M., Pampaloni P., Cagnati A., Multifrequency microwave emission the Dome C area on the East Antarctic Plateau: Temporal and spatial variability, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 2007, Vol. 45, No. 7, pp. 2029–2039.
 47. Maeda T., Taniguchi Y., Imaoka K., GCOM-W1 AMSR2 level 1R product: dataset of brightness temperature modified using the antenna pattern matching technique, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2016, Vol. 54, No. 2, pp. 770–782.
 48. Mears C. A., Wang J., Smith D., Wentz F. J., Intercomparison of total precipitable water measurements made by satellite-borne microwave radiometers and ground-based GPS instruments, *J. Geophys. Res. Atmosphere*, 2015, Vol. 120, pp. 2492–2504.
 49. Meissner T., Wentz F., Intercalibration of AMSR-E and Windsat brightness temperature measurements over land scenes, *Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, 2010, pp. 3218–3219.
 50. 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.
 51. 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, p. 8065, DOI: 10.1029/2002RS002659.
 52. 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.
 53. Mitnik L. M., Cherny I. V., Mitnik M. L., Chernyavskii G. M., Kuleshov V. P., Baranyuk A. V., The MTVZA-GY radiometer on the Meteor-M No. 2 satellite: the first 10 months in an orbit, calibration of data and retrieval of geophysical parameters, *Intern. Symp. "Atmospheric Radiation and Dynamics" (ISARD-2015)*, Abstracts, Saint Petersburg – Petrodvorets, 2015, pp. 23–25.
 54. Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Water vapor in the atmosphere over Greenland and the surrounding seas from measurements of MTVZA-GY, AMSR2, and GMI microwave radiometers, *Intern. Symp. Atmospheric Radiation and Dynamics (ISARD-2017)*, Abstracts, St. Petersburg, Petrodvorets, 2017, p. 23.
 55. Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Cherny I. V., Statistics of surface and atmospheric microwave properties at Summit Station, Greenland from MTVZA-GY observations in the range 10–190 GHz, *Progress in Electromagnetics Research Symp.*, Abstracts, St. Petersburg, Russia, 2017, p. 327.
 56. Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Barsukov I. A., Cherny I. V., Chernyavsky G. M., Multichannel Scanning Imager-Sounder MTVZA-GY on Russian Weather Satellite Meteor-M No. 2: The Simulated and Measured Brightness Temperatures in the Range of 10–190 GHz, *Progress in Electromagnetics Research Symp.*, Abstracts, St. Petersburg, Russia, 2017, p. 326.
 57. 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.
 58. Mitnik L., Kuleshov V., Mitnik M., Cherny I., Cherniavsky G., 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.

59. Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Baranyuk A. V., 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.
60. Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Pichugin M. K., Mitnik M. L., Sudden stratospheric warming in 2015-2016: Study with satellite passive microwave data and reanalysis, *Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, 2018, Valencia, Spain, 2018, pp. 5560–5563.
61. Mo T., Postlaunch calibration of the NOAA-18 Advanced Microwave Sounding Unit-A, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 2007, Vol. 45, No. 7, pp. 1928–1937.
62. Mo T., A study of the NOAA near-nadir AMSU-A brightness temperatures over Antarctica, *J. Atmos. Oceanic Technology*, 2010, Vol. 27, No. 6, pp. 995–1004.
63. Mo T., Calibration of the NOAA AMSU-A radiometers with natural test sites, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 2011, Vol. 49, No. 9, pp. 3334–3342.
64. Moradi I., Ferraro R., Eriksson P., Weng F., Intercalibration and validation of observations from ATMS and SAPHIR microwave sounders, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2015, Vol. 53, No. 11, pp. 5915–5925.
65. Nielsen-Englyst P., Høyer L.J., Pedersen T.L., Gentemann C., Alerskans E., Block T., Donlon C., Optimal estimation of sea surface temperature from AMSR-E, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, p. 229, DOI: 10.3390/rs10020229.
66. Nobre C.A., Obregon G.O., Marengo J.A., Fu R., Poveda G., Characteristics of Amazonian climate: Main features. In: *Amazonia and Global Change*, M. Keller, M. Bustamante, J. Gash, P. Dias (eds.), Geophysical Monograph Series, 2009, Vol. 186, pp. 149–162.
67. Pearson K., Merchant C., Embury O., Donlon C., The Role of Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 channels within an optimal estimation scheme for sea surface temperature, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, p. 90, DOI: 10.3390/rs10010090.
68. Prigent C., Jaumouillé E., Chevallier F., Aires F., A parameterization of the microwave land surface emissivity between 19 and 100 GHz, anchored to satellite-derived estimates, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 2008, Vol. 46, No. 2, pp. 344–352.
69. 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.
70. Shibata A.A., Wind speed retrieval algorithm by combining 6 and 10 GHz data from Advanced Microwave Scanning Radiometer: Wind speed inside hurricanes, *J. Oceanography*, 2006, Vol. 62, pp. 351–359.
71. Spencer R.W., Christy J.R., Precision lower stratospheric temperature monitoring with the MSU: Technique, validation, and results 1979–91, *J. Climate*, 1993, No. 6, pp. 1194–1204.
72. Surdyk S., Using microwave brightness temperature to detect short-term surface air temperature changes in Antarctica: an analytical approach, *Remote Sensing of Environment*, 2002, Vol. 80, pp. 256–271.
73. Tian Y., Peters-Lidard C. D., Harrison K.W., Prigent C., Norouzi H., Aires F., Boukabara S.A., Furuza-wa F.A., Masunaga H., Quantifying uncertainties in land-surface microwave emissivity retrievals, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2014, Vol. 52, No. 2, pp. 829–840.
74. 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. Geophys. Research. Atmosphere*, 2013, Vol. 118, pp. 1–14.
75. Wilheit T., Comparing calibrations of similar conically scanning window-channel microwave radiometers, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 2013, Vol. 51, No. 3, pp. 1453–1464.
76. Wimmers A.J., Velden C.S., Seamless advective blending of total precipitable water retrievals from polar orbiting satellites, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 2011, Vol. 50, No. 5, pp. 1024–1036.
77. Zabolotskikh E., Mitnik L., Chapron B., An updated geophysical model for AMSR-E and SSMIS brightness temperature simulations over oceans, *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, No. 3, pp. 2317–2342.