

Калибровка и валидация – необходимые составляющие микроволновых радиометрических измерений со спутников серии Метеор-М № 2

Л.М. Митник, М.Л. Митник

*Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН
Владивосток, 690041, Россия
E-mail: lm_mitnik@poi.dvo.ru, maia_mitnik@mail.ru*

Рассмотрены особенности и организация работ по внутренней и внешней калибровке многоканальных микроволновых сканирующих радиометров SSM/I и SSMIS (США) и AMSR-E и AMSR2 (Япония). Приведены характеристики радиометра МТВЗА-ГЯ и отмечена необходимость использования зарубежного опыта при его калибровке. Обсуждаются вопросы внешней калибровки по данным зондирования, полученным над холодными и горячими областями Земли, для которых на частотах радиометра ν должны быть рассчитаны яркостные температуры $T_a(\nu)$ с использованием современной программы переноса МВ излучения в системе «подстилающая поверхность – атмосфера». В качестве холодных областей могут быть выбраны участки океана при слабом ветре и отсутствии облаков, а в качестве горячих – дождевые широколиственные леса Амазонки. Стабильность функционирования радиометра на орбите может быть проконтролирована путем анализа временных рядов $T_a(\nu)$, полученных над протяженными однородными пространствами Антарктического плато в районе купола Dome C. Приведены сведения о метеорологическом режиме района, о температуре и характеристиках снежного покрова и результаты МВ измерений. Для получения ценной оперативной и научной информации из данных МТВЗА-ГЯ со спутника Метеор-М №2 и последующих, планируемых к запуску в 2016–2021 гг., должен быть выполнен цикл работ по калибровке радиометра, разработаны алгоритмы и осуществлена валидация продуктов, в том числе и на подспутниковых полигонах в различных физико-географических условиях.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, микроволновая радиометрия, калибровка, валидация, моделирование, алгоритмы, МТВЗА-ГЯ, Метеор-М №2, Dome-C, полигоны

*Одобрена к печати: 04.01.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-95-104*

Введение

Первые в мире эксперименты по микроволновому зондированию Земли были выполнены со спутников «Космос-243» в 1968 г. и «Космос-384» в 1970 г. (Башаринов и др., 1974). Многочисленные научные и оперативные приложения данных микроволновой радиометрии в науках о Земле базируются на прогрессе в изучении взаимодействия микроволнового излучения с различными средами, в совершенствовании технических характеристик радиометров и антенн, а также алгоритмов восстановления геофизических параметров. Важнейшими и необходимыми составляющими этого прогресса являются тщательная калибровка данных зондирования и валидация геофизических продуктов, восстанавливаемых из измерений, что входит в круг задач, решаемых космическими агентствами и организациями, отвечающими за изготовление спутниковой аппаратуры, подготовку ее к полету, эксплуатацию и использование результатов.

Рабочая группа по калибровке и валидации микроволновых (МВ) измерений, организованная при Международном Комитете по спутникам наблюдения Земли CEOS, определяет калибровку как процесс количественного определения отклика спутникового инструмента на известные контролируемые входные сигналы. Информация о калибровке содержится в формуле калибровки или в калибровочных коэффициентах, которые затем используются для преобразования выходных сигналов инструментов (отсчетов) в физические единицы

(например, в яркостные температуры). В совещаниях группы участвуют представители Росгидромета и Роскосмоса.

Калибровка радиометров SSM/I, SMISS (США) и AMSR-E, AMSR-E (Япония)

Современная история калибровки микроволновых сканеров началась после запуска первого радиометра SSM/I (The Special Sensor Microwave Imager) на спутнике F-8 DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) в июне 1987. До этого сканеры, разработанные в Центре космических полетов им. Годдарда (НАСА), были экспериментальными инструментами, которые запускались по программе Нимбус без специальной радиометрической калибровки на орбите. В 1987–1997 гг. по программе DMSP были выведены на орбиту оперативные спутники F-8 – F-14 с радиометрами SSM/I. Подразделение Космических исследований Морской исследовательской лаборатории NRL (Вашингтон, округ Колумбия) инициировало исследования, цель которых заключалась в проведении после запуска абсолютной калибровки инструмента, определении его чувствительности и оценке точности геолокации. Результаты отражены в технических отчетах NRL и в статьях (Colton, Poe, 1999; Hollinger et al., 1990).

Конструкция радиометров SSM/I была одинакова на всех спутниках DMSP, поэтому яркостные температуры $T_{я}$ на соответствующих частотах и поляризациях можно было сравнивать непосредственно. В результате для радиометров на разных спутниках для близких по времени измерений были получены статистические распределения сезонного хода $T_{я}$ над океаном при ясном небе на протяжении нескольких лет. Анализ этих данных позволил определить, как различия в показаниях (смещения) связаны с параметрами радиометров (температурой, положением сканов и др.) и оценить временную стабильность калибровки и передаточной функции приборов. Взаимная (кросс) калибровка шести радиометров SSM/I, радиометров SMISS, TRMM, WindSat, AMSR-E была выполнена сотрудниками Remote Sensing Systems (RSS) (<http://www.remss.com>) в рамках проектов, финансируемых Отделом наук о Земле NASA (Meissner, Wentz, 2010; Wentz et al., 2001). Особенности, которые надо учитывать при кросс-калибровке МВ сканеров, используемые алгоритмы и фильтры рассмотрены в статье (Wilheit, 2013).

Наилучшим пространственным разрешением среди спутниковых сканеров обладают разработанные в Японии усовершенствованные микроволновые сканирующие радиометры AMSR на спутнике ADEOS II (2003), AMSR-E на спутнике США Aqua (2002–2011) и AMSR2 на спутнике Японии GCOM-W1, запущенном в мае 2012 г. (Imaoka et al., 2010). Высокое качество измерений и продуктов AMSR2 обеспечено, в частности, тем, что калибровкой и валидацией, разработкой алгоритмов и научными приложениями данных зондирования занимались не только японские, но и зарубежные специалисты при выполнении отобранных по конкурсу проектов. Конкурсы объявлялись Японским аэрокосмическим исследовательским агентством JAXA за 3–5 лет до запуска спутника,

а продолжались и после запуска. 20-летний опыт работы JAXA с проектами, которые выполнялись в США, Германии, Италии, России (ТОИ ДВО РАН с 1998 г.) и в других странах, подтвердил высокую эффективность конкурсного отбора. Первый конкурс проектов по радиометру AMSR2 был объявлен JAXA за 5 лет до запуска спутника GCOM-W1. В настоящее время ведутся работы по проектам, сгруппированным по темам: калибровка и валидация, совершенствование алгоритмов восстановления геофизических параметров и продуктов и разработка приложений спутниковых данных. Проекты продолжительностью 3 года начались 1 апреля 2014 г. Среди них – проект с ТОИ ДВО РАН: «Улучшение алгоритмов восстановления скорости ветра и интегральных атмосферных параметров». На сайте JAXA <http://kuroshio.eorc.jaxa.jp/JASMES/WC.html> размещены массивы яркостных температур AMSR2 на частотах AMSR2 6,9; 7,3; 18,7; 23,8; 36,5 и 91,0 на в- и г-поляризациях, а также восстановленные по ним продукты.

Сложность получения надежных абсолютных значений яркостных температур подчеркивает, например, тот факт, что значения $T_{\text{я}}(\nu)$ радиометра AMSR2, полученные по методикам калибровки JAXA и RSS, отличаются на 3–4 К и зависят от $T_{\text{я}}$. Если в JAXA при калибровке использовались характеристики радиометра, измеренные до запуска, то калибровка RSS базировалась на значениях $T_{\text{я}}$, рассчитанных по модели переноса излучения в системе «подстилающая поверхность – атмосфера» (Hilburn, Gentemann, 2015). Согласно оценкам RSS, погрешность расчетных значений $T_{\text{я}}$ не превышает 0,2 К. Рассмотрим, в связи со сказанным, калибровку МВ радиометра МТВЗА-ГЯ на космическом аппарате (КА) «Метеор-М» № 2.

Радиометр МТВЗА-ГЯ

Метеорологический КА «Метеор-М» № 2 был запущен 8 июля 2014 г. с космодрома Байконур (Асмус и др., 2015) и заменил на орбите КА «Метеор-М» №1 (2009–2014). Сведения о спутниках «Метеор-М» № 2 и «Метеор-М» № 2-1 - 2-5, планируемых к запуску в 2016–2021 гг., можно найти на сайте Всемирной метеорологической организации в разделе Observing Systems Capability Analysis and Review Tool <http://www.wmo-sat.info/oscar/satellites/view/284>, а характеристики приборов КА – на сайте ФГБУ «НИЦ «Планета» <http://planet.iitp.ru/index1.html>.

В состав аппаратного комплекса спутников серии Метеор-М № 2 входит модуль температурного и влажностного зондирования атмосферы МТВЗА-ГЯ – многочастотный сканирующий микроволновый радиометр. ГЯ – в память о Геннадии Яковлевиче Гуськове (1918–2002), конструкторе различных космических инструментов. МТВЗА-ГЯ принимает излучение Земли на частотах ν сканера в окнах прозрачности атмосферы (10–50, 92 ГГц) и зондировщика в полосе поглощения молекулярного кислорода 52–58 ГГц и в области сильной линии поглощения водяного пара, центрированной на $\nu = 183,31$ ГГц. Сканирование осуществляется по конусу под углом $\theta = 65^\circ$ относительно местной нормали. Ширина поло-

сы обзора МТВЗА 1500 км, пространственное разрешение каналов меняется от 89×189 км на $\nu = 10,6$ ГГц до 9×21 км на $\nu = 183,31$ 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. По данным МТВЗА-ГЯ могут быть определены паросодержание атмосферы V , водозапас облаков Q , скорость приводного ветра W , восстановлены вертикальные профили температуры $T(h)$ и влажности $a(h)$ атмосферы и др. (Болдырев и др., 2008).

Для получения по данным МТВЗА-ГЯ гидрометеорологической информации, используемой в оперативных целях и в научных исследованиях, необходимо иметь: калиброванные яркостные температуры $T_{\text{я}}^{\text{б.г}}(\nu_i)$, разработанные алгоритмы восстановления по $T_{\text{я}}^{\text{б.г}}(\nu_i)$ геофизических параметров и программу валидации продуктов. Калибровка сигналов на борту спутника – внутренняя калибровка – выполняется на каждом скане по холодному реликтовому космическому излучению с $T_{\text{як}} = 2,73$ К и по излучению горячей согласованной нагрузки, температура которой $T_{\text{яг}} \approx 245$ К измеряется термопарами. Такая схема является типичной для спутниковых радиометров, однако технические реализации могут заметно отличаться от спутника к спутнику.

Помимо внутренней калибровки, для МТВЗА-ГЯ на частотах сканера может быть использована внешняя, выполняемая по измерениям над «горячими» и «холодными» протяженными однородными участками земной поверхности (Biswas et al., 2007; Brown, Ruf, 2005; Cherny et al., 2010; Das et al., 2014; Kroodsma et al., 2013; Mo, 2007, 2010, 2011; Prigent et al., 2008; Tian et al., 2014). В качестве «горячей» области могут быть взяты дождевые широколиственные леса бассейнов рек Амазонки и Конго, а в качестве холодной – районы океана со слабым ветром, отсутствием облачности и низкими значениями паросодержания атмосферы. Яркостные температуры $T_{\text{я}}^{\text{б.г}}(\nu_i)$ над калибровочными областями на частотах ν_i и поляризациях каналов сканера МТВЗА-ГЯ при $\theta = 65^\circ$ должны быть рассчитаны по современной модели переноса излучения в системе «подстилающая поверхность – атмосфера». При этом предполагается, что паросодержание атмосферы, скорость ветра и температура поверхности океана, температура и коэффициенты излучения крон леса известны. Программа корректируется при появлении уточненных сведений о спектрах поглощения атмосферных газов и коэффициентов излучения подстилающей поверхности (Zabolotskikh et al., 2014). Рассчитанные по этой программе модельные значения $T_{\text{я}}^{\text{б.г}}(\nu_i)$ служат основой и для разработки алгоритмов восстановления параметров (Митник, Митник, 2006; Mitnik, Mitnik, 2003; Mitnik et al., 2009; Gentemann et al., 2010).

Переменные факторы космического полета (прежде всего – освещенность спутника солнцем), изменение характеристик антенны, горячей нагрузки и радиометра в процессе его эксплуатации, неопределенности в задании геофизических параметров, используемых при моделировании яркостных температур над тестовыми областями, влияют на погрешности определения $T_{\text{я}}^{\text{б.г}}(\nu_i)$ по данным внутренней и внешней калибровки, а следовательно, и на погрешности восстанавливаемых геофизических параметров. Поэтому калибровку

МТВЗА-ГЯ и оценку стабильности его характеристик следует осуществлять на протяжении всего периода его активной работы. Для решения этих задач наиболее пригодны лесные массивы Амазонки и Антарктическое плато в районе купола Dome C.

Перепады высот в пределах купола Dome C малы при средней высоте $h > 3$ км. Поверхность снега однородна на масштабах порядка 100 км. В точке с координатами 75,125° с.ш., 123,25° в.д. на высоте 3233 м расположена франко-итальянская научная база Concordia. От станции Восток ее отделяет 560 км. В окрестности базы температура воздуха летом не поднимается выше -25°C , а зимой падает до -60 – -70°C и ниже. Атмосфера исключительно стабильная и сухая: ее паросодержание летом доходит до 0,65–0,8 кг/м², а зимой падает до 0,2 кг/м² и меньше. Погода преимущественно ясная. Скорость аккумуляции снега ≈ 8 –10 см/год (Urbini et al., 2008). Толщина слоя снега, характеристики которого влияют на яркостную температуру поверхности, определяется глубиной проникновения электромагнитных волн L . При распространении в сухом снеге потери МВ излучения крайне малы, и значения $L = 300$ –1000 м на $\nu = 1,4$ ГГц, > 20 м на $\nu = 7$ ГГц, 10–15 м на 10 ГГц, ≈ 3 –5 м на 19 ГГц, < 1 м на 37 ГГц и $< 0,2$ на 89 ГГц (Surdyk, 2002). На глубинах $d < 15$ м температура снега меняется с температурой воздуха у поверхности, а на $d > 15$ м – постоянна и равна $218,42 \pm 0,07$ К (Brucker et al., 2011). Амплитуда вариаций $T_{\text{я}}^{\text{в,г}}(\nu)$ на протяжении года не превышает 0,5 К на $\nu = 1,4$ ГГц и увеличивается с ростом частоты (Macelloni et al., 2007, 2013; Leduc-Leballeur et al., 2015). По данным РСА со спутника Канады Radarsat-1 выпущена радиолокационная карта Антарктиды, отображающая рельеф поверхности и неоднородности приповерхностных слоев.

На станции Concordia выполняются обширные экспериментальные исследования, включая измерения вертикальных профилей температуры и плотности снега и размеров зерен фирна, слоистости снега, свойств инея и пр., температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра, яркостных температур $T_{\text{я}}^{\text{в,г}}(\nu)$ на частотах 1,4–90 ГГц.

Упомянутое сочетание природных факторов, наличие хорошо оснащенной базы, где продолжают исследования характеристик снега и МВ радиометрические измерения, а в летнее время выпускаются радиозонды и пр., делает Восточную Антарктиду лучшим тестовым полигоном для калибровки и мониторинга стабильности МТВЗА-ГЯ, что было показано для других спутниковых МВ радиометров, оптических сенсоров и др. (Mo, 2010; Das et al., 2010, 2014; Leduc-Leballeur et al., 2015; Macelloni et al., 2007; Narvekar et al., 2010; Ruf, 2000; Surdyk, 2002). Важным преимуществом является и то, что центральные области Антарктики, как и Арктики, несколько раз в сутки находятся в пределах полосы обзора МВ радиометров МТВЗА-ГЯ, AMSR-E, AMSR2, ATMS и др., что повышает надежность измерений, позволяет провести кросс-калибровку и выявить изменчивость $T_{\text{я}}(\nu)$ на различных пространственных и временных масштабах (Митник и др., 2015а).

Качество калибровки МТВЗА-ГЯ может быть проверено и оценено по результатам валидации: параметры, найденные по калиброванным $T_{\text{я}}^{\text{в,г}}(\nu_i)$ с использованием алгоритмов, разработанных по модельным $T_{\text{я}}$, должны соответствовать аналогичным параметрам, полученным другими методами, включая МВ измерения с других спутников.

Обсуждение и выводы

На сайтах организаций Росгидромета и через полтора года после запуска спутника «Метеор-М» №2 нет ни яркостных температур, измеренных радиометром МТВЗА-ГЯ, ни восстановленных по ним параметров (продуктов). Причина такой ненормальной ситуации – отсутствие работ по калибровке и валидации. Их не было и для МТВЗА-ГЯ на спутнике «Метеор-М» №1. Эти работы или не были предусмотрены, или отсутствовало понимание необходимости их проведения для обеспечения гидрометеорологической службы России глобальной количественной информацией об атмосфере, океане, морских и материковых льдах по данным МТВЗА-ГЯ и выполнения обязательств страны перед ВМО.

Важнейшими составляющими теоретических и экспериментальных работ по калибровке и валидации являются моделирование яркостных температур $T_{\text{я}}^{\text{в,г}}(\nu)$ на частотах МТВЗА-ГЯ с использованием современной программы переноса МВ излучения в системе «подстилающая поверхность – атмосфера», разработка алгоритмов восстановления параметров и проведение измерений до и после запуска спутника на полигонах в различных физико-географических зонах. Эти измерения могут включать наземные и самолетные эксперименты, в том числе и с использованием наземных аналогов спутниковых радиометров. Полигоны могут быть организованы, например, в Баренцевом море (Митник и др., 2015б), в заливе Петра Великого в Японском море и др. В качестве тестовых, в том числе и в рамках международного сотрудничества, могут быть использованы области Восточной Антарктики (купол Dome C, станция Восток и др.), дождевые леса Амазонки и др. Большие возможности заключены и в кросс-калибровке МТВЗА-ГЯ с МВ радиометрами на других спутниках (Wilheit, 2013). Кросс-калибровка также требует проведения тщательного моделирования $T_{\text{я}}^{\text{в,г}}(\nu)$ даже при совпадении частот, учитывая различия в углах зондирования, в пространственном разрешении и др.

Необходимость проведения работ по калибровке и валидации данных МТВЗА-ГЯ на серии спутников Метеор-М №2-1 - Метеор-М №2-5, планируемых к запуску в 2016–2021 гг., очевидна. Содержание работ может уточняться при анализе временных рядов измерений на каналах МТВЗА-ГЯ на спутнике Метеор-М №2, начиная с августа 2014 г. Результаты анализа могут быть также использованы для коррекции конструкции радиометра и установки его на спутнике.

Требуют внимательного изучения и обобщения материалы по приложениям данных МВ зондирования с зарубежных спутников, отличительной чертой которых является наличие калиброванных яркостных температур. О ценности геофизической информации, получаемой со спутниковых МВ радиометров и актуальности проблемы калибровки свидетельствуют многочисленные статьи в ведущих журналах по дистанционному зондированию, проведение специальных сессий по МВ зондированию, алгоритмам, калибровке и валидации на ведущих международных симпозиумах The International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), The International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISRSE), Living Planet, Pan Ocean Remote Sensing Conference (PORSEC) и др.

Калибровка данных МТВЗА-ГЯ с КА Метеор-М №2 и с последующих спутников с таким же радиометром на борту может быть выполнена на современном уровне, если Роскосмос проведет открытый международный конкурс и отберет лучшие проекты. Учитывая опыт космических агентств США, Европейских стран, Японии, а также планы запуска и средние сроки работы на орбите спутников Метеор-М, финансирование проектов (или некоторых из них, что определится по результатам первых трех лет) следует предусмотреть на протяжении 6–12 лет.

Без надежной калибровки, отлаженных алгоритмов и валидации продуктов данные МТВЗА-ГЯ могут быть представлены только 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.

Целесообразно рассмотреть запуск трех радиометров МТВЗА-ГЯ, а не четырех, чтобы на высвободившиеся средства провести теоретические и экспериментальные работы по калибровке измерений и валидации продуктов их обработки, в том числе и на полигонах. Стоимость этих работ мала по сравнению с затратами на радиометр и запуск.

Предварительный анализ измерений МТВЗА-ГЯ над Амазонкой и Антарктическим плато с 1 сентября 2014 г. по 30 мая 2015 г., выполненный в инициативном порядке ТОИ ДВО РАН в сотрудничестве с НТЦ «Космонит» ОАО «Российские космические системы», показывает, что радиометр работает стабильно (Mitnik et al., 2015).

Литература

1. Асмус В.В., Кропотынец В.А., Макриденко Л.А., Милехин О.Е., Соловьев В.И., Успенский А.Б., Фролов А.В., Хайлов М.Н. Новый оперативный метеорологический спутник «Метеор-М» № 2 // Междунар. симпозиум по атмосферной радиации и динамике (МСАРД–2015): Сб. тезисов конференции, 23–26 июня 2015 г. Санкт-Петербург-Петродворец, 2015. С. 7–8.
2. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974. 187 с.
3. Болдырев В.В., Горобец Н.Н., Ильгасов П.А., Никитин О.В., Панцов В.Ю., Прохоров Ю.Н., Стрельников Н.И., Стрельцов А.М., Черный И.В., Чернявский Г.М., Яковлев В.В. Спутниковый микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 1. С. 243–248.
4. Митник Л.М., Кулешов В.П., Митник М.Л. Микроволновые характеристики Антарктического плато по измерениям со спутников Метеор-М № 2 и GCOM-W1 // Тезисы. Тринадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Сб. тезисов конференции. Москва: ИКИ РАН. 2015а. С. 289.
5. 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.
6. 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.
7. Митник Л.М., Митник М.Л., Чернявский Г.М., Черный И.В., Выкочко А.В., Пичугин М.К. 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. 2015б. № 6. С. 36–46.
8. 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 Sens. 2007. Vol. 51. No. 3. P. 1465–1477.

9. *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 Atmos. Tech.* 2005. Vol. 22. No. 9. P. 1340–1352.
10. *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. P. 171–182.
11. *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. IGARSS 2010. Hawaii*. 2010. P. 558–561.
12. *Colton M., Poe G.* Intersensor calibration of DMSP SSM/I’s: F-8 to F-14, 1987–1997 // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1999. Vol. 37. No. 1. P. 418–439.
13. *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. P. 452–464.
14. *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*. Eds. V. Barale, J. Gower and L. Alberotanza, Springer, Heidelberg. 2010. P. 19–44.
15. *Hilburn K.A., Gentemann S.L.* AMSR2 calibration: Intercomparison of RSS and JAXA brightness temperatures // *J. Geophys. Res. Ocean.* 2015 (in press).
16. *Hollinger J., Peirce J., Poe G.* SSM/I instrument evaluation // *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*. 1990. Vol. 28. No. 5. P. 781–790.
17. *Imaoka K., Kachi M., Fujii H., Murakami H., Hori M., Ono A., Igarashi T., Nakagawa K., Oki T., Honda Y., Shimoda H.* Global Change Observation Mission (GCOM) for monitoring carbon, water cycles, and climate change // *Proc. of the IEEE*. 2010. Vol. 98. No. 5. P. 717–734.
18. *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. Vol. 52. No. 9. P. 4743–4751.
19. *Leduc-Leballeur M., Picard G., Mialon A., Arnaud L., Lefebvre E., Possenti P., Kerr Y.* Modeling L-band brightness temperature at Dome C in Antarctica and comparison with SMOS observations // *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*. 2015. Vol. 53. No. 7. P. 4022–4032, doi: 10.1109/TGRS.2015.2388790
20. *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. P. 2029–2039.
21. *Macelloni G., Brogioni M., Pettinato S., Zasso R., Crepaz A., Zaccaria J., Padovan B., Drinkwater M.* Ground-based L-band emission measurements at Dome-C Antarctica: The DOMEX-2 experiment // *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*. 2013. Vol. 51. No. 9. P. 4718–4730.
22. *Meissner T., Wentz F.* Intercalibration of AMSR-E and Windsat brightness temperature measurements over land scenes // *Proc. IGARSS*. 2010. P. 3218–3219.
23. *Mitnik L.M., Cherny I.V., Mitnik M.L., Chernyavskii G.M., Kuleshov V.P., Baranyuk A.V.* The MTVZA-GYa radiometer on the Meteor-M no. 2 satellite: the first 10 months in an orbit, calibration of data and retrieval of geophysical parameters // *Abstract Intern. Symposium “Atmospheric Radiation and Dynamics” (ISARD – 2015)*, Saint-Petersburg-Petrodvorets, June 2015. P. 23–25.
24. *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. № 4. P. 8065, doi: 10.1029/2002RS002659.
25. *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. P. 156–165.
26. *Mo T.* Postlaunch calibration of the NOAA-18 Advanced Microwave Sounding Unit-A // *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*. 2007. Vol. 45. No. 7. P. 1928–1937.
27. *Mo T.* A study of the NOAA near-nadir AMSU-A brightness temperatures over Antarctica // *J. Atmos. Oceanic Technology*. 2010. Vol. 27. No. 6. P. 995–1004.
28. *Mo T.* Calibration of the NOAA AMSU-A radiometers with natural test sites // *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*. 2011. Vol. 49. No. 9. P. 3334–3342.
29. *Narvekar P.S., Heygster G., Jackson T.J., Bindlish R., Macelloni G., Notholt J.* Passive polarimetric microwave signatures observed over Antarctica // *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*. 2010. Vol. 48. No. 3. P. 1059–1075.
30. *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. P. 344–352.
31. *Ruf C.S.* Detection of calibration drifts in space borne microwave radiometers using a vicarious cold reference // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2000. Vol. 38. No. 1. P. 44–52.
32. *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. P. 256–271.
33. *Tian Y., Peters-Lidard C.D., Harrison K.W., Prigent C., Norouzi H., Aires F., Boukabara S.A., Furuzawa F.A., Masunaga H.* Quantifying uncertainties in land-surface microwave emissivity retrievals // *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*. 2014. Vol. 52. No. 2. P. 829–840.
34. *Wentz F.J., Ashcroft P., Gentemann C.* Post-launch calibration of the TRMM microwave imager // *IEEE Trans. Geoscience Remote Sens.* 2001. Vol. 39. No. 2. P. 415–422.
35. *Urbini S., Frezzotti M., Gandolfi S., Vincent C., Scarchilli C., Vittuari L., Fily M.* Historical behaviour of Dome C and Talos Dome (East Antarctica) as investigated by snow accumulation and ice velocity measurements // *Global and Planetary Change*. 2008. Vol. 60. P. 576–588.
36. *Wilheit T.* Comparing calibrations of similar conically window-channel microwave radiometers // *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*. 2013. Vol. 51. No. 3. P. 1453–1464.
37. *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. P. 2317–2342.

Calibration and validation as prerequisite components of satellite microwave radiometer measurements from Meteor-M No. 2 series satellites

L.M. Mitnik, M.L. Mitnik

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

E-mail: lm_mitnik@poi.dvo.ru, maia_mitnik@mail.ru

Features and organization of works are considered on internal and external calibration of multichannel microwave scanning radiometers SSM/I and SSMIS (USA) and AMSR-E and AMSR2 (Japan). Performances of MTVZA-GY radiometer are presented and the necessity to use foreign experience for its calibration is emphasized. The problems of external calibration from sensing data obtained over the cold and hot areas of the Earth are discussed. For these areas the brightness temperatures $T_b(\nu)$ at radiometer frequencies ν should be computed with the use of the current program of microwave radiative transfer in the underlying surface – atmosphere system. As cold areas, the cloudless ocean regions at weak wind can be chosen, and as hot ones the broadleaved Amazon rain-forests. Stability of radiometer operation on an orbit can be controlled by analysis of the $T_b(\nu)$ time series acquired over extensive homogeneous spaces of the Antarctic plateau in the Dome C area. Information about the meteorological regime of this area, temperature and snow parameters, and results of microwave measurements are given. To ensure reception of valuable operative and scientific information from Meteor-M No. 2 MTVZA-GY data and subsequent satellites planned for launch in 2016–2021, the cycle of works on radiometer calibration must be performed, algorithms developed and products validation carried out, including ground truth measurements in different physico-geographical conditions.

Keywords: remote sensing, microwave radiometry, calibration, validation, Meteor-M No. 2, MTVZA-GY, algorithms, Dome C, test areas

Accepted: 04.01.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-95-104

References

1. Asmus V.V., Krovotyntsev V.A., Makridenko L.A., Milekhin O.E., Solov'ev V.I., Uspenskii A.B., Frolov A.V., Khailov M.N. Novyi operativnyi meteorologicheskii sputnik "Meteor-M" No. 2 (New operation meteorological satellite "Meteor-M" No. 2), *Mezhdunar. simpozium po atmosferno radiatsii i dinamike (MSARD-2015)* (Abstracts of International Symposium Atmospheric Radiation Dynamics), Saint Petersburg – Petrodvorets, 23–26 June 2015, pp. 7–8.
2. Basharinov A.E., Gurvich A.S., Egorov S.T., *Radioizluchenie Zemli kak planety* (Microwave Emission of the Earth as a Planet), Moscow: Nauka, 1974, 187 p.
3. Boldyrev V.V., Gorobets N.N., Il'gasov P.A., Nikitin O.V., Pantsov V.Yu., Prokhorov Yu.N., Strel'nikov N.I., Strel'tsov A.M., Chernyi I.V., Chernyavskii G.M., Yakovlev V.V., *Sputnikovyi mikrovolnovyi skaner/zondirovshchik MTVZA-GYa* (Satellite microwave scanner/sounder), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 5, No. 1, pp. 243–248.
4. Mitnik L.M., Kuleshov V.P., Mitnik M.L., *Mikrovolnovye kharakteristiki Antarkticheskogo plato po izmereniyam so sputnikov Meteor-M № 2 i GCOM-W1* (Microwave characteristics of Antarctic plateau from Meteor-M № 2 and GCOM-W1 satellites measurements), *Tezisy, Trinadtsataya Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* (13-th All-Russia Open Conference "Current Problems of Remote Sensing Earth From Space, Abstracts), Moscow, IKI RAN, 2015a, p. 289.
5. 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 atmospheric water vapor content and total cloud liquid water content over the ocean from microwave sensing data taken by DMSP, TRMM, AQUA and ADEOS-II satellites), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2006, No. 4, pp. 34–41.
6. Mitnik L.M., Mitnik M.L., Gurvich I.A., Vykochko A.V., Kuzlyakina Yu.A., Chernyi 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 №1 i AMSR-E so sputnika Aqua* (Investigation of tropical cyclone evolution in the Northwest Pacific from Meteor-M No.1 MTVZA-GY and Aqua AMSR-E data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 4, pp. 121–128.
7. Mitnik L.M., Mitnik M.L., Chernyavskii G.M., Chernyi I.V., Vykochko A.V., Pichugin M.K., *Privodnyi veter i morskoi led v Barentsevom more po dannym mikrovolnovykh izmerenii so sputnikov Meteor-M № 1 i GCOM-W1 v yanvare-marte 2013 g.* (Surface wind and sea ice in the Barentz Sea from Meteor-M No. 1 and GCOM-W1 microwave measurements in January - March 2013), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015b, No. 6, pp. 36-46.
8. 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.

9. 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 Atmos. Tech.*, 2005, Vol. 22, No. 9, pp. 1340–1352.
10. 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.
11. 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. IGARSS 2010, Hawaii*, pp. 558–561.
12. Colton M., Poe G. Intersensor calibration of DMSP SSM/I’s: F-8 to F-14, 1987–1997, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1999, Vol. 37, No. 1, pp. 418–439.
13. 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.
14. 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*. Eds. V. Barale, J. Gower and L. Alberotanza, Springer, Heidelberg, 2010, pp. 19–44.
15. Hilburn K.A., Gentemann S.L., AMSR2 calibration: Intercomparison of RSS and JAXA brightness temperatures, *J. Geophys. Res. Ocean*, 2015, in press.
16. Hollinger J., Peirce J., Poe G., SSM/I instrument evaluation, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 1990, Vol. 28, No. 5, pp. 781–790.
17. Imaoka K., Kachi M., Fujii H., Murakami H., Hori M., Ono A., Igarashi T., Nakagawa K., Oki T., Honda Y., Shimoda H., Global Change Observation Mission (GCOM) for monitoring carbon, water cycles, and climate change, *Proceedings of the IEEE*, 2010, Vol. 98, No. 5, pp. 717–734.
18. 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, Vol. 52, No. 9, pp. 4743–4751.
19. Leduc-Leballeur M., Picard G., Mialon A., Arnaud L., Lefebvre E., Possenti P., Kerr Y., Modeling L-band brightness temperature at Dome C in Antarctica and comparison with SMOS observations, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 2015, Vol. 53, No. 7, pp. 4022–4032, doi: 10.1109/TGRS.2015.2388790.
20. 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.
21. Macelloni G., Brogioni M., Pettinato S., Zasso R., Crepaz A., Zaccaria J., Padovan B., Drinkwater M. Ground-based L-band emission measurements at Dome-C Antarctica: The DOMEX-2 experiment, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 2013, Vol. 51, No. 9, pp. 4718–4730.
22. Meissner T., Wentz F., Intercalibration of AMSR-E and Windsat brightness temperature measurements over land scenes, *Proc. IGARSS*, 2010, pp. 3218–3219.
23. Mitnik L.M., Cherny I.V., Mitnik M.L., Chernyavskii G.M., Kuleshov V.P., Baranyuk A.V., The MTVZA-GYa radiometer on the Meteor-M no. 2 satellite: the first 10 months in an orbit, calibration of data and retrieval of geophysical parameters, *Abstract of Intern. Symposium “Atmospheric Radiation and Dynamics” (ISARD – 2015)*, Saint-Petersburg-Petrodvorets, June 2015, pp. 23–25.
24. 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 algorithm, *Radio Science*, 2003, Vol. 38, No. 4, 8065, doi: 10.1029/2002RS002659.
25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. Mo T., Calibration of the NOAA AMSU-A radiometers with natural test site, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 2011, Vol. 49, No. 9, pp. 3334–3342.
29. Narvekar P.S., Heygster G., Jackson T.J., Bindlish R., Macelloni G., Notholt J., Passive polarimetric microwave signatures observed over Antarctica, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 2010, Vol. 48, No. 3, pp. 1059–1075.
30. 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.
31. Ruf C.S., Detection of calibration drifts in space borne microwave radiometers using a vicarious cold reference, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2000, Vol. 38, No. 1, pp. 44–52.
32. 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.
33. Tian Y., Peters-Lidard C.D., Harrison K.W., Prigent C., Norouzi H., Aires F., Boukabara S.A., Furuzawa F.A., Masunaga H., Quantifying uncertainties in land-surface microwave emissivity retrievals, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sens.*, 2014, Vol. 52, No. 2, pp. 829–840.
34. Wentz F.J., Ashcroft P., Gentemann C., Post-launch calibration of the TRMM microwave imager, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sens.*, 2001, Vol. 39, No. 2, pp. 415–422.
35. Urbini S., Frezzotti M., Gandolfi S., Vincent C., Scarchilli C., Vittuari L., Fily M., Historical behaviour of Dome C and Talos Dome (East Antarctica) as investigated by snow accumulation and ice velocity measurements, *Global and Planetary Change*, 2008, Vol. 60, pp. 576–588.
36. Wilheit T., Comparing calibrations of similar conically window-channel microwave radiometers, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 2013, Vol. 51, No. 3, pp. 1453–1464.
37. 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.