Калибровка ИК-каналов радиометра МСУ-МР спутника «Метеор-М» № 2-2

А.И. Алексанин, С.Е. Дьяков

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН Владивосток, 690041, Россия E-mail: aleks@iacp.dvo.ru

Радиометр MCV-MP является штатным прибором спутников «Метеор-М» и аналогом радиометра AVHRR. Столкновение спутника «Метеор-М» № 2-2 с метеоритом почти сразу после окончания полётных испытаний не вывело прибор из строя, но потребовало проверки калибровок принимаемых данных. На спутнике также осталась проблема с криоосадками, оседающими тонкой плёнкой на входных окнах инфракрасных (ИК) датчиков и искажающих принятый сигнал. Создан алгоритм расчёта ослабления сигнала при прохождении его через плёнки. Построены функций коррекции принятого сигнала. Созданные алгоритмы позволили провести кросс-калибровку ИК-каналов радиометра MCУ-MP с соответствующими каналами радиометра MODIS/Aqua. Она показала высокое качество данных прибора и позволила вычислить поправку к температуре холодной мишени, обусловленной, по-видимому, оседанием на ней криоосадков. Разработан алгоритм построения температуры поверхности океана по двухканальной методике. В отличие от существующей методики MCSST для расчёта температуры использовалась квадратичная поправка. Проведено сравнение спутниковых оценок температуры с измерениями дрейфующих буев. Погрешность расчёта температуры поверхности океана составила 0,6 °C. Систематическая ошибка не превышала 1/8 °C.

Ключевые слова: МСУ-МР, «Метеор-М» № 2-2, калибровка, криоосадки, температура поверхности океана

Одобрена к печати: 12.01.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-70-77

Введение

5 июля 2019 г. был успешно запущен российский метеорологический спутник «Метеор-М» № 2-2. В состав его аппаратуры входит многозональное сканирующее устройство малого разрешения (МСУ-МР), предназначенное для широкозахватной трассовой съёмки изображений облачности и земной поверхности в видимом и инфракрасном (ИК) спектральных диапазонах с пространственным разрешением не хуже 1 км в надире (Акимов и др., 2015). Спутник входит в Глобальную систему наблюдения Всемирной метеорологической организации (Гектин и др., 2020). 18 декабря, почти сразу после завершения лётных испытаний, в спутник попал метеорит. Радиометр МСУ-МР не пострадал и продолжает функционировать. После катастрофы его работа была восстановлена в течение месяца. С начала февраля 2020 г. радиометр работает в штатном режиме.

Радиометр MCУ-MP является аналогом радиометра AVHRR (*анел.* Advanced Very-High-Resolution Radiometer). По своим техническим характеристикам он не уступает и даже несколько превосходит AVHRR. Одна из проблем радиометра заключается в наличии криоосадков, оседающих тонкой плёнкой на входных окнах ИК-датчиков и искажающих принятый сигнал. Для борьбы с данным явлением применяется процедура «чистки радиационного холодильника» (PX), позволяющая испарять эти плёнки. Для радиометра MCУ-MP спутника «Метеор-М» № 2 была построена модель и решена задача учёта таких искажений (Алексанин и др., 2018). Это позволило найти необходимые поправки и провести калибровку ИК-датчиков по технологии NOAA/NESDIS (NOAA — National Oceanic and Atmospheric Administration, Национальное управление океанических и атмосферных исследований, США; NESDIS — National Environmental Satellite, Data, and Information Service, Национальная информационная служба по космическим данным об окружающей среде, США) (Goodrum, 1999), удовлетворяющую современным требованиям к точности при построении температурных карт (Donlon et al., 2007). Целью проделанной работы была оценка состояния радиометра, решение проблемы учёта криоосадков, проведение калибровки датчиков и построение алгоритма расчёта температуры поверхности океана.

Используемые данные и методика калибровки радиометра МСУ-МР

Калибровки радиометра спутника «Метеор-М» № 2-2 проводилась по той же схеме, что и калибровка радиометра спутника «Метеор-М» № 2. В работе использовались ИК-данные радиометров МСУ-МР и MODIS/Aqua (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), принятые в Спутниковом центре Дальневосточного отделения Российской академии наук. Изображения радиометра МСУ-МР были географически привязаны с пиксельной точностью (Катаманов, Качур, 2018). Данные радиометра MODIS применялись для оценки качества измерений ИК-каналов МСУ-МР на основе кросс-калибровки. Проверка проходила на изображениях воды и снега. Поскольку временное рассогласование сканирования одной и той же поверхности разными радиометрами укладывалось в полтора часа, то считалось, что температура за этот интервал времени не менялась. Использовались изображения, которые генерировались на близких трассах. За период наблюдений работал основной радиометр № 2, резервный не включался.

Процедура калибровки проводилась по технологии NOAA/NESDIS (Robel, Graumann, 2014) с учётом специфики радиометра. Нестандартность ситуации состоит в наличии криоосадков, покрывающих входные окна ИК-датчиков. Требуется восстановить исходные величины регистрируемого излучения, убрав влияние плёнки криоосадков. Влияние криоосадков значительно меньше, чем на спутнике «Метеор-М» № 2, но ещё существенно. Для решения этой проблемы использовались отсчёты холодного и тёплого тела спутника, присутствующие в каждой строчке сканирования радиометром. Согласно показаниям термометров, температура тел была –13,8 и 40 °C соответственно. Применялись медианные оценки отсчётов, полученные в течение одного сеанса приёма данных. Измерения до начала февраля 2020 г. относятся к периоду экспериментов по настройке радиометра и восстановления его функционирования после столкновения с метеоритом. Поэтому оценки параметров радиометра будем проводить с начала февраля. Построенные графики показывали, что колебания отсчётов холодного тела для каналов 4, 5 и 6 невелики, за исключением моментов очистки РХ, которые характеризуются резкой изменчивостью величин. Стабильность отсчётов холодного тела объясняется особенностью функционирования радиометра — добавлением к сигналу радиометра величины, обеспечивающей постоянство отсчётов на холодном теле. Для произвольного канала формирование отсчёта описывается линейной закономерностью:

$$I = a_0 + a_1 R + C, \tag{1}$$

где I — отсчёт радиометра; R — излучение зондируемой поверхности; C — добавляемая к сигналу величина; a_0 , a_1 — коэффициенты калибровки выбранного канала, не меняющиеся со временем.

На основе функций спектральной чувствительности (ФСЧ), измеренных при предполётной подготовке прибора, были оценены центральные волновые числа для ИК-каналов. Функции спектральной чувствитель-

чувствительной чувствительности радиометра приведены на *рис. 1*, и они отличаются по спектральному диапазону от заявленных значений (*таблица*). Функции близки к ФСЧ радиометра «Метеор-М» № 2.

Рис. 1. Графики функций спектральной чувствительности каналов 4–6 МСУ-МР и аналогичных у MODIS/Aqua



Номер канала	Спектральный диапазон, мкм	Центральная длина волны	Ã	$ ilde{B}$
4	3,5-4,1	3,84	0,9860	4,20
5	10,5-11,5	10,77	0,9980	0,55
6	11,5–12,5	11,69	0,9980	0,48

Рассчитанные спектральные характеристики ИК-каналов радиометра МСУ-МР

Согласно работе (Goodrum, 1999), расчёт лучеиспускательной способности для центрального волнового числа производится по формуле:

$$R(T) = R_{Plank} (T \times A + B, \tilde{v}), \tag{2}$$

где R(T) — облучённость в мВт·м⁻²·ср⁻¹·см⁻¹; T — температура в градусах Кельвина; $\tilde{\nu}$ — центральное волновое число; $R_{Plank}(T)$ — функция Планка; \tilde{A} , \tilde{B} — регрессионные коэффициенты. Для каждого ИК-канала с помощью модели MODTRAN (*анел.* MODerate resolution atmospheric TRANsmission) были рассчитаны величины R(T) для всех типов атмосферы, концентрации влажности воздуха и температуры поверхности Земли. Были рассчитаны также коэффициенты линейной регрессии (2) для аппроксимации лучеиспускательной способности абсолютно чёрного тела (см. *таблицу*) посредством оптимальной подгонки параметров $\tilde{\nu}$, \tilde{A} и \tilde{B} .

Отсчёты радиометра на тёплой и холодной мишенях обычно предназначаются для контроля и коррекции показаний прибора в полёте. Так же как и для радиометра MCУ-MP спутника «Метеор-М» № 2, будем предполагать, что радиометр работает стабильно: жёстко выдерживается коэффициент усиления сигналов от датчиков и усиление линейно; нет зависимости отсчётов от угла сканирования; оптические свойства плёнки криоосадков однородны, изотропны и постоянны при постоянной толщине. Тогда уравнение (1) для отсчётов от холодного и тёплого тел можно записать в виде:

$$I_{cold} = a_0 + a_1 R_{cold} e^{-h} + C, \quad I_{hot} = a_0 + a_1 R_{hot} e^{-h} + C, \tag{3}$$

где индексы *cold* и *hot* соответствуют холодному и тёплому телу; h — показатель ослабления сигнала при прохождении излучения через плёнку криоосадков; R_{cold} и R_{hot} — рассчитанное согласно формуле (2) излучение для абсолютно чёрного тела с заданной температурой. В силу линейности усилителя детектируемых сигналов данная зависимость выполняется и для про-извольного отсчёта радиометра.

При полной очистке РХ можно полагать, что h = 0 и C = 0. Таким образом, для каждого момента времени, следующего за очисткой РХ, можно восстановить коэффициенты a_0 и a_1 , решая систему уравнений (3). Зная коэффициенты a_0 и a_1 , для произвольного спутникового изображения для ИК-каналов можно рассчитать по отсчётам тёплого и холодного тела как величины C и h согласно уравнениям (3), так и радиационную температуру, решая уравнение (2). В частности, параметры a_0 и a_1 имеют следующие значения: для канала 4 — 47,5



и 412,5; для канала 5 — 7,8 и 5,55; для канала 6 — 124,6 и 3,55. Изменчивость h со временем приведена на *рис.* 2. Разрыв в графиках соответствует времени восстановления функционирования прибора после столкновения спутника с метеоритом. Колебание графика для канала 4 показывает, что толщина слоя криоосадков на окнах соответствующего датчика превышает длину волны.

Рис. 2. Изменение со временем оптической толщины слоя криоосадков для различных каналов

Рассчитывая величины h и C для произвольного измерения радиометра, можно вычислить радиационные характеристики детектируемого излучения R, решая уравнение (1). Это позволяет сравнить радиационную температуру спектральных каналов 5 и 6, имеющих близкие центральные волновые числа, с температурой радиометра MODIS. Теоретическое моделирование различий каналов двух спутников при разных параметрах атмосферы с помощью модели MODTRAN 4-й версии показало, что рассогласование радиационной температуры на воде для обоих каналов лежит в пределах 0,5 °C. Эта величина — лучшая точность, которую можно достичь, проводя кросс-калибровку с радиометром MODIS. Поскольку рассогласование калибровок носит систематический характер и превышает требуемую точность к систематической ошибке (0,125 °C — характерное спектральное разрешение каналов), то результаты не могут использоваться в качестве конечного результата. Кросс-калибровка это вспомогательная процедура и требуется только для поиска непредвиденных отклонений измерений МСУ-МР от эталонного радиометра. Поскольку спектральный диапазон канала 4 выходит за окно прозрачности атмосферы (на показания значительное влияние будет оказывать концентрация водяного пара), то проведение кросс-калибровки расчётов для канала 4 не имеет смысла.



Рис. 3. Сопоставление радиационной температуры каналов 5 (*слева*) и 6 (*справа*) МСУ-МР с соответствующей приведённой температурой MODIS/Aqua. Цветом обозначено время измерений в днях

Было проведено сравнение радиационной температуры двух спутников на воде и на снеге. Функции спектральной чувствительности сравниваемых каналов различаются значительно. Использовалась процедура приведения радиационной температуры радиометра MODIS к радиационной температуре МСУ-МР. Поскольку излучение подстилающей поверхности близко к излучению чёрного тела, то делалась поправка к радиационной температуре радиометра MODIS, обусловленная разницей центральных волновых чисел сравниваемых спектральных каналов. Первоначальное сравнение показало, что рассогласование радиационной температуры двух спутников большое. Нужное соответствие наступало, когда вводилась поправка на температуру холодного тела. Поправка на температуру тёплого тела была незначительной. Было выдвинуто предположение, что холодное тело покрыто слоем криоосадков (льдом) и его излучение не соответствует излучению холодного тела. Поправка к температуре холодного тела подбиралась посредством оптимизационной подгонки и составила +2,21 °C. Это обеспечило следующие стандартные отклонения радиационной температуры (рис. 3): 0,4 °C — для канала 5 и 0,5 °C — для канала 6. Существенного отклонения зависимости температуры от линейной не наблюдается. Зависимость устойчива в течение почти полугода. Поправка на температуру холодного тела соответствует степени «н черноты» льда.

Алгоритм расчёта температуры поверхности океана

Обычно для расчёта температуры поверхности океана (ТПО) на глубине 1 м по двухканальной методике «расщеплённое окно» используются технологии MCSST (*англ*. Multichannel Sea Surface Temperature) или NLSST (*англ*. Nonlinear Sea Surface Temperature). Технологии предполагают линейную зависимость температуры от атмосферной массы, через которую проходит излучение, попадающее на спутник. Опыт показывает, что введение нелинейных поправок существенно улучшает качество результата (Алексанин, Дьяков, 2010). Поэтому при построении алгоритма расчёта температуры была применена формула, предполагающая наличие квадратичной зависимости температуры поверхности от атмосферной массы (Тапаhashi et al., 2000). Данная зависимость и была использована для расчёта ТПО по радиационной температуре каналов 5 и 6:

$$T = b_0 + b_1 T_5 + b_2 (T_5 - T_6) + b_3 (T_5 - T_6) (\sec(\theta) - 1) + + b_4 (T_5 - T_6) (\sec(\theta) - 1) + b_5 (\sec(\theta) - 1) + b_6 (\sec(\theta) - 1)^2,$$
(4)

в которой T_5 — радиационная температура 5-го канала; T_6 — радиационная температура 6-го канала; θ — угол сканирования; $b_0 - b_6$ — регрессионные коэффициенты. Коэффициенты уравнения оптимально подбирались на основе минимизации рассогласований буйковых и спутниковых измерений ТПО (*puc. 4*). Данные были накоплены за полгода (февраль — июль 2020 г.) в Дальневосточном регионе и содержали 347 измерений с дрейфующих буев. Результаты расчётов показали, что стандартное отклонение при расчёте температуры составило 0,6 °C. Систематическая ошибка была значительная (0,14 °C) только в первые два месяца после попадания метеорита в спутник. В остальные месяцы она не превосходит точность оцифровки 0,125 °C, что соответствует современным требованиям по точности (https://www.wmo-sat.info/oscar/variables/view/sea_surface_temperature). Коэффициенты расчёта ТПО получились следующими: $b_0 = 0,67$; $b_1 = 1,086$; $b_2 = 2,08$; $b_3 = 0,97$; $b_4 = -3,36$; $b_5 = 0,39$; $b_6 = 4,58$. Пример карт ТПО приведён на *puc. 5* (см. с. 75).



Рис. 4. Сравнение спутниковой температуры моря и буйковых измерений за 2020 г. Цветом обозначено время измерений



Рис. 5. Фрагменты карт ТПО спутника Aqua (*слева*) и «Метеор-М» № 2 (*справа*) за 08.07.2020, Японское море

Заключение

Несмотря на столкновение спутника с метеоритом и проблемы при обработке ИК-изображений радиометра МСУ-МР спутника «Метеор-М» № 2-2, удалось построить методы первичной обработки данных. Создана модель коррекции регистрируемых радиометром сигналов. Разработанные алгоритмы позволяют проводить калибровку каналов и рассчитывать температуру океана по технологии NOAA/NESDIS. Ошибки расчёта температуры лежат в пределах рекомендуемой точности: систематическая не превосходит 0,125 °C, а случайная — 0,6 °C. Полученные результаты указывают на стабильность работы радиометра и корректность модели учёта влияния криоосадков.

Авторы выражают благодарность сотрудникам АО «Российские космические системы» Гектину Юрию Михайловичу и Зайцеву Александру Александровичу за консультации и помощь в работе. Работа была поддержана грантом Правительства Приморского края «Мониторинг состояния лесов Приморского края на основе комплексного использования современных спутниковых систем дистанционного зондирования».

Литература

- 1. Акимов Н. П., Бадаев К. В., Гектин Ю. М., Рыжаков А. В., Смелянский М. Б., Фролов А. Г. Многозональное сканирующее устройство малого разрешения МСУ-МР для космического информационного комплекса «Метеор-М». Принцип работы, эволюция, перспективы // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2015. Т. 2. Вып. 4. С. 30–39.
- 2. Алексанин А. И., Дьяков С. Е. Кросс-калибровка ИК-каналов спутника MTSAT-1R и алгоритм расчёта температуры поверхности моря // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 5. С. 3–10.
- 3. *Алексанин А. И., Гектин Ю. М., Дьяков С. Е., Зайцев А.А., Качур В.А.* Учет влияния криоосадков при калибровке ИК-каналов радиометра МСУ-МР // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 1. С. 72–80.
- Гектин Ю. М., Зорин С. М., Трофимов Д. О., Барсуков И.А., Жуковская К. И. Анализ методов обработки информации и координации развития космических систем ДЗЗ гидрометеорологического назначения в рамках международных программ CGMS и GSICS // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2020. Т. 7. Вып. 1. С. 59–71.
- 5. *Катаманов С. Н., Качур В. А.* Результаты географической привязки изображений МСУ-МР полярно-орбитального спутника «Метеор-М» № 2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 9–18.
- Donlon C., Robinson I., Casey K. S., Vazquez-Cuervo J., Armstrong E., Arino O., Gentemann C., May D., LeBorgne P., Piollé J., Barton I.J., Beggs H., Poulter D.J.S., Merchant C.J., Bingham A., Heinz S., Harris A., Wick G., Emery B., Minnett P., Evans R., Lewellyn-Jones D., Mutlow C., Reynolds R.W., Kawamura H., Rayner N. The global ocean data assimilation experiment high-resolution sea surface temperature pilot project // Bull. American Meteorological Society. 2007. V. 88. No. 8. P. 1197–1213.

- Robel J., Graumann A. NOAA KLM User's Guide August 2014 Revision. 2014. 2530 p. URL: https:// www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/satellite/publications/podguides/N-15%20thru%20N-19/pdf/0.0%20 NOAA%20KLM%20Users%20Guide.pdf.
- 8. *Tanahashi S., Kawamura H., Matsuura T., Takahashi T., Yusa H.* Improved estimates of wide-ranging sea surface temperature from GMS S-VISSR data // J. Oceanography. 2000. V. 56. No. 3. P. 345–358.

IR channels calibration of the MSU-MR radiometer of the Meteor-M No. 2-2 satellite

A. I. Alexanin, S. E. Diakov

Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia E-mail: aleks@iacp.dvo.ru

The MSU-MR radiometer is a standard instrument of the Meteor-M satellites and an analogue of the AVHRR radiometer. The collision of the Meteor-M No. 2-2 satellite with a meteorite almost immediately after the end of flight tests did not disable the device, but required a verification of the received data calibration. The satellite also has a problem with cryprecipitation, which is deposited as a thin film on the input windows of the IR sensors and distorts the signal received. An algorithm for calculating the attenuation of a signal when it passes through films has been created. The functions of the received signal correction have been constructed. The created algorithms allowed us to make cross-calibration of the IR channels of the MSU-MR radiometer with the appropriate channels of the MODIS/Aqua radiometer. It showed high quality of the instrument data and made it possible to calculate the correction to the temperature of the cold target, which was apparently caused by the deposition of cryoprecipitates on it. An algorithm for ocean surface temperature retrieving on the base of a two-channel technique was developed. A quadratic relationship to MCSST technique was used to calculate the temperature. Comparison of satellite temperature estimates with drifting buoys measurements was carried out. The standard deviation of SST computation was 0.6 °C. The bias did not exceed 1/8 °C.

Keywords: MSU-MR, Meteor-M No.2-2, calibration, cryoprecipitation, sea surface temperature

Accepted: 12.01.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-70-77

References

- Akimov N. P., Badaev K. V., Gektin Yu. M., Ryzhakov A. V., Smelyanskii M. B., Frolov A. G., Mnogozonal'noe skaniruyushchee ustroistvo malogo razresheniya MSU-MR dlya kosmicheskogo informatsionnogo kompleksa "Meteor-M". Printsip raboty, evolyutsiya, perspektivy (Multiband scanner of low spatial resolution MSU-MR for space-based information system "Meteor-M". The principle of operation and development prospects), *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*, 2015, Vol. 2, Issue 4, pp. 30–39.
- 2. Aleksanin A. I., D'yakov S. E., Kross-kalibrovka IK-kanalov sputnika MTSAT-1R i algoritm rascheta temperatury poverkhnosti morya (Cross-Calibration of the MTSAT-1R Satellite Data and Sea Surface Temperature Retrieving Algorithm), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2010, No. 5, pp. 3–10.
- 3. Aleksanin A. I., Gektin Yu. M., D'yakov S. E., Zaitsev A. A., Kachur V. A., Uchet vliyaniya krioosadkov pri kalibrovke IK-kanalov radiometra MSU-MR (Cryoprecipitation influence accounting in IR-channels calibration of MSU-MR radiometer), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2018, No. 1, pp. 72–80.
- 4. Gektin Yu. M., Zorin S. M., Trofimov D. O., Barsukov I.A., Zhukovskaya K. I., Analiz metodov obrabotki informatsii i koordinatsii razvitiya kosmicheskikh sistem DZZ gidrometeorologicheskogo naznacheniya v ramkakh mezhdunarodnykh programm CGMS i GSICS (Data Processing Methods and the Coordination of the Development of Hydrometeorological ERS Space Systems as Part of the CGMS and GSICS International Programs), *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*, 2020, Vol. 7, Issue 1, pp. 59–71.

- Katamanov S. N., Kachur V. A., Rezul'taty geograficheskoi privyazki izobrazhenii MSU-MR polyarnoorbital'nogo sputnika "Meteor-M" No. 2 (Navigation results for MSU-MR imagery of polar-orbital satellite Meteor-M No. 2), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 2, pp. 9–18.
- Donlon C., Robinson I., Casey K.S., Vazquez-Cuervo J., Armstrong E., Arino O., Gentemann C., May D., LeBorgne P., Piollé J., Barton I.J., Beggs H., Poulter D.J.S., Merchant C.J., Bingham A., Heinz S., Harris A., Wick G., Emery B., Minnett P., Evans R., Lewellyn-Jones D., Mutlow C., Reynolds R.W., Kawamura H., Rayner N., The global ocean data assimilation experiment high-resolution sea surface temperature pilot project, *Bull. American Meteorological Society*, 2007, Vol. 88, No. 8, pp. 1197–1213.
- Robel J., Graumann A, NOAA KLM user's guide August 2014 Revision, 2014, 2530 p., available at: https://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/satellite/publications/podguides/N-15%20thru%20N-19/ pdf/0.0%20NOAA%20KLM%20Users%20Guide.pdf.
- 8. Tanahashi S., Kawamura H., Matsuura T., Takahashi T., Yusa H., Improved estimates of wide-ranging sea surface temperature from GMS S-VISSR data, *J. Oceanography*, 2000, Vol. 56, No. 3, pp. 345–358.