

Результаты оценки радиометрических характеристик Комплекса многозональной спутниковой съёмки КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-3 путём сопоставления с данными спектрорадиометра MODIS/Aqua на этапе лётных испытаний

Т. В. Кондратьева, Б. С. Жуков, И. В. Полянский

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: tkondratieva@cosmos.ru*

Комплекс многозональной спутниковой съёмки КМСС-2 входит в состав измерительной аппаратуры гидрометеорологических космических аппаратов серии «Метеор-М», которая пополнилась очередным космическим аппаратом (КА) «Метеор-М» № 2-3 в 2023 г. В рамках лётных испытаний КА были получены и обработаны изображения естественных наземных полигонов на территории о-ва Гренландия и пустыни Каракумы, проведена оценка радиометрического качества данных аппаратуры КМСС-2 и выполнен сравнительный анализ с данными, полученными от спектрорадиометра MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) на КА Aqua (L1B). В качестве параметра для оценки использовались коэффициенты спектральной яркости объектов, регистрируемые в спектральных каналах КМСС-2 и в соответствующих им спектральных каналах MODIS. Результаты предварительного анализа показали необходимость коррекции коэффициентов чувствительности инфракрасных (ИК) каналов камер КМСС-2, полученных в ходе наземной радиометрической калибровки на 16–17 %. В красном и зелёном каналах камер коррекция была в пределах точности наземной калибровки и не превышала 1 %. После проведения коррекции значения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) ярких наземных объектов в видимом и ближнем ИК-диапазонах, рассчитываемые по данным КМСС-2, хорошо коррелируют с соответствующими измерениями по данным MODIS со среднеквадратическим отклонением не более 0,013.

Ключевые слова: КМСС-2, МСУ-100ТМ, «Метеор-М» № 2-3, MODIS, коэффициент спектральной яркости, полётная радиометрическая калибровка, радиометрическая кросс-калибровка, дистанционное зондирование Земли

Одобрена к печати: 29.05.2024
DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-61-70

Введение

В июне 2023 г. с космодрома «Восточный» состоялся запуск космического аппарата КА «Метеор-М» № 2-3, входящего в состав Космического комплекса гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-3М». Космические аппараты «Метеор-М» создаются в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» и являются полярно-орбитальными метеоспутниками, движущимися по круговым солнечно-синхронным орбитам с высотой (H) около 830 км.

В состав КА «Метеор-М» № 2-3 входит Комплекс многозональной спутниковой съёмки — КМСС-2. Такие комплексы разрабатываются и изготавливаются в Институте космических исследований РАН и работают на космических аппаратах серии «Метеор-М», начиная с запуска в 2009 г. первого КА «Метеор-М» № 1 из группировки. В 2014 г. с космодрома «Байконур» был выведен на орбиту КА «Метеор-М» № 2 с КМСС-М. Запуск КА «Метеор-М» № 2-2, в состав которого входит КМСС-2, состоялся в июле 2019 г. с космодрома «Восточный».

Приборы КМСС предназначены для решения метеорологических и природно-ресурсных задач. В состав каждого КМСС входят многозональные съёмочные устройства (МСУ) среднего разрешения, осуществляющие съёмку поверхности Земли в полосе обзора около 1000 км в видимом и ближнем ИК-спектральных диапазонах.

В данной работе рассматриваются вопросы, связанные с радиометрическим качеством данных КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-3, полученных при проведении лётных испытаний в июле — октябре 2023 г., и проводится их сравнение с данными спектрорадиометра MODIS/Aqua (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer).

Характеристики КМСС-М и КМСС-2

Комплекс многозональной спутниковой съёмки КМСС-2, установленный на борту КА «Метеор-М» № 2-3, продолжает линейку приборов КМСС, которые используются в целях мониторинга земной поверхности и атмосферы в видимом и ближнем ИК-спектральных диапазонах электромагнитного излучения на космических аппаратах серии «Метеор-М».

Каждая последующая серия КМСС имеет ряд конструктивных модификаций, нацеленных на повышение качества получаемых видеоданных и усовершенствование процесса их обработки. К наиболее значимым доработкам КМСС-2 относятся (Полянский и др., 2019):

- новая геометрическая схема съёмки с пространственно совмещёнными оптическими осями спектральных каналов;
- новые оптико-электронные датчики, которые позволили увеличить динамический диапазон регистрируемой яркости и повысить отношение сигнал/шум;
- увеличенное количество градаций яркости цифрового сигнала до 10 разрядов на канал;
- отдельное управление параметрами регистрации изображений в спектральных каналах.

Первоначально Комплексы многозональной спутниковой съёмки КМСС на КА «Метеор-М» № 1 и КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2 имели в составе по три камеры МСУ (Аванесов и др., 2013), в которых использовались специализированные объективы типа «Руссар-Метео» с оптическими схемами, оптимизированными с точки зрения обеспечения требуемых характеристик светочувствительности, пространственно-частотных и геометрических свойств формируемого изображения. В двух камерах МСУ-100, предназначенных для исследования поверхности суши в спектральном диапазоне 450–1000 нм, использовались объективы с фокусным расстоянием 100 мм и относительным отверстием 1:5. В третьей камере МСУ-50 использовался объектив с фокусным расстоянием 50 мм и относительным отверстием 1:6,8, оптимизированный для работы в спектральном диапазоне 370–900 нм для съёмки поверхности акваторий (табл. 1). В качестве фотоэлектронных преобразователей оптического сигнала в электрический в каждой камере МСУ для КМСС и КМСС-М использовались закрытые индивидуальными светофильтрами три одинаковые ЛПЗС (линейные приборы с зарядовой связью) типа ILX508A производства компании SONY (Япония), характеризующиеся высокой чувствительностью в широком спектральном диапазоне при сохранении параметров в требуемом диапазоне температуры. При установке КМСС/КМСС-М на приборную платформу КА оптическая ось камеры МСУ-50 была направлена в надир, а оптические оси камер МСУ-100 отклонены от направления в надир в плоскости, перпендикулярной плоскости орбиты движения КА, на угол $\pm 14^\circ$. Суммарная полоса обзора двух камер МСУ-100 при этом составляет около 960 км и примерно равна полосе обзора камеры МСУ-50 (940 км). Пространственное разрешение в надире для МСУ-100 составляет 60 м, для МСУ-50 — 120 м. Направление обзора каналов 1 и 3 каждой из камер МСУ-100 отклонено в плоскости орбиты на угол $8,67^\circ$ вперёд (канал 1) и назад (канал 3) по ходу движения КА, а спектральных каналов камеры МСУ-50 — на угол $16,95^\circ$ вперёд (канал 1) и назад (канал 3).

Итак, КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-2 (Полянский и др., 2019) и КА «Метеор-М» № 2-3 выступает следующим поколением приборов ДЗЗ и имеет ряд конструктивных отличий (табл. 1). В состав каждого из комплексов КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-2 и на КА «Метеор-М» № 2-3 входят два идентичных многозональных съёмочных устройства МСУ-100ТМ с фокусным расстоянием 125 мм и относительным отверстием 1:4,3. В приборах МСУ-100ТМ установлена оптическая система ОС-125Т, разработанная и изготовленная в Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики, в которой используется система дихроических зеркал и полосовых интерференционных фильтров для формирования требуемых полос пропускания для трёх спектральных каналов видимого и ИК-диапазонов. В конструкции ОС-125Т реализован телецентрический ход лучей в заднем отрезке, что обеспечивает пространственное совмещение оптических осей спектральных каналов прибора и позволяет фиксировать одновременно изображение

одной и той же области земной поверхности в трёх спектральных каналах на трёх ЛПЗС типа KLI-8023 производства компании KODAK (США). Данные ЛПЗС характеризуются высокой квантовой эффективностью в заданном спектральном диапазоне, низким уровнем шума и хорошей стабильностью параметров в требуемом диапазоне температуры. Опорные темновые фотоэлементы, имеющиеся в ЛПЗС, и электронная регулировка экспозиции позволяют наиболее эффективно согласовывать динамический диапазон ЛПЗС с диапазоном яркости регистрируемой сцены. В каждом из ЛПЗС в приборах КМСС-2 установлены три идентичные монохромные ПЗС-линейки. При проведении съёмки только одна из ПЗС-линеек является активной в данном спектральном канале, две другие используются для обеспечения резервирования. Переключение линеек, управление ими и их настройка обеспечиваются независимо. Два прибора МСУ-100ТМ установлены на приборную платформу КА таким образом, что их оптические оси отклонены от «вертикальной» оси космического аппарата на угол $\pm 15,2^\circ$ в плоскости, перпендикулярной плоскости орбиты. Суммарная полоса обзора КМСС-2 составляет 1020 км, пространственное разрешение в надире — 55 м.

Таблица 1. Характеристики КМСС, КМСС-М и КМСС-2

Параметры	КМСС на КА «Метеор-М» № 1/ КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2		КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-2/ КА «Метеор-М» № 2-3
	МСУ-100	МСУ-50	МСУ-100ТМ
Фотоприёмники, число ЛПЗС	3		9
Общее число элементов в строке	8000		
Используемое число элементов в строке изображения	3×7926		3×7984
Размер элемента, мкм	7×7		9×9
Число камер	2	1	2
Фокусное расстояние объектива, мм	100	50	125
Относительное отверстие объектива	1:5	1:6,8	1:4,3
Угол поля зрения, град	31	58	32
Угол установки приборов МСУ относительно местной вертикали, град	± 14	0	$\pm 15,2$
Полоса обзора, км	960 (двумя камерами)	940	1020 (двумя камерами)
Пространственное разрешение в надире, м	60	120	55
Спектральные каналы (на уровне 0,5), нм	№ 1: 755–870 № 2: 630–680 № 3: 535–575	№ 1: 450–510 № 2: 430–455 № 3: 610–660	№ 1: 640–690 № 2: 785–900 № 3: 520–590
Частота строк, Гц	156,25		125
Информационный поток, Мбит/с	30,72		30,08
Радиометрическое разрешение (разрядность АЦП), бит	8		10
Динамический диапазон ЛПЗС, дБ	74		82
Напряжение насыщения, В	1,5		2,5
Масса, кг	2,9	2,3	7,6
Максимальное энергопотребление, Вт	6,8		16
Высота орбиты КА, км	819–827		812–814
Наклонение орбиты КА, град	98,49		98,79
Долгота восходящего узла орбиты КА, град	305,769		230,172

При движении КА по орбите приборами КМСС/МСУ осуществляется одновременная построчная регистрация движущегося оптического изображения посредством ЛПЗС в трёх спектральных каналах в видимой и ближней ИК-областях электромагнитного спектра. ПЗС-линейки в приборах МСУ установлены параллельно друг другу в фокальной плоскости объектива камеры и перпендикулярно направлению полёта КА.

Радиометрические характеристики устройства КМСС-2 КА «Метеор-М» № 2-3

Радиометрическая калибровка камер МСУ-100ТМ (условно именуемых МСУ-231 и МСУ-232), входящих в состав КМСС-2 на КА «Метеор-М» №2-3, была проведена в ходе наземной отработки с помощью эталонных источников излучения во Всероссийском научно-исследовательском институте оптико-физических измерений. Камеры имеют сертификаты калибровки. Среднеквадратическая ошибка (СКО) наземной калибровки камер КМСС-2 составляет 2 %.

Оценка радиометрических характеристик аппаратуры КМСС-2 в ходе лётных испытаний проводилась путём сравнения яркостных характеристик изображений естественных наземных полигонов, регистрируемых аппаратурой КМСС-2, с совпадающими по времени данными съёмки спектрорадиометром MODIS/Aqua.

Основные характеристики MODIS/Aqua приведены в *табл. 2*. Прибор MODIS/Aqua является оптико-механическим сканером, имеет 36 спектральных каналов с 12-битным радиометрическим разрешением в диапазоне длин волн от 0,4 до 14,4 мкм. Ширина полосы обзора MODIS при угле сканирования $\pm 55^\circ$ составляет 2330 км, пространственное разрешение — от 250 до 1000 м. Спутник Aqua движется по приполярной солнечно-синхронной орбите с высотой около 702 км. Ошибка абсолютной калибровки спектрорадиометра MODIS/Aqua составляет около 5 %, точность калибровки поддерживается в полёте с помощью его внутренней калибровки, калибровки по Луне и наземным тестовым участкам (Wu и др., 2013).

Таблица 2. Характеристики MODIS/Aqua

Угол сканирования	$\pm 55^\circ$
Полоса обзора ($H = 705$ км)	2330 км
Разрешение в надире ($H = 705$ км)	250 м (зоны 1–2), 500 м (зоны 3–7), 1 км (зоны 8–36)
Спектральные зоны (36) (видимый, ближний, средний, тепловой ИК)	16 зон в диапазоне 0,4–1 мкм, в том числе зоны: 1-я: 620–670 нм (хлорофилл растений), 2-я: 841–876 нм (облачность и растительность), 4-я: 545–565 нм (зелёная растительность), 17-я: 890–920 нм (параметры облачности и атмосферы); 4 зоны в диапазоне 1,2–2,4 мкм; 6 зон в диапазоне 3–5 мкм; 10 зон в диапазоне 6–15 мкм
Разрядность изображения	12 бит
Наклонение орбиты КА	$98,197^\circ$
Долгота восходящего узла орбиты КА	$211,003^\circ$

Сравнение яркостных характеристик полигонов для камер КМСС-2 с данными MODIS проводилось методом сопоставления коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) природных объектов на верхней границе атмосферы, измеренных в спектральных зонах приборов. Данный метод используется для проведения ежегодной радиометрической калибровки приборов КМСС по снежным полям Антарктиды (Жуков и др., 2014; Кондратьева и др., 2020).

На верхней границе атмосферы КСЯ ρ объектов определяется соотношением:

$$\rho_i = \frac{L_i}{L_{S,i}} = \pi \frac{L_i}{F_{S,i} \cos \vartheta_s},$$

где L_i — зональная яркость системы «поверхность — атмосфера», являющаяся средневзвешенным значением спектральной плотности энергетической яркости $L(\lambda)$, где в качестве весовой функции используется функция спектральной чувствительности (ФСЧ) $s_i(\lambda)$ спектральной зоны i съёмочной системы, $L_i = \int s_i(\lambda)L(\lambda) d\lambda / \int s_i(\lambda) d\lambda$; $L_{S,i}$ — яркость идеального ламбертовского отражателя на верхней границе атмосферы в зоне i , $L_{S,i} = F_{S,i} \cos \vartheta_s / \pi$; $F_{S,i}$ — зональный поток солнечного излучения на верхней границе атмосферы, $F_{S,i} = \int s_i(\lambda)F_s(\lambda) d\lambda / \int s_i(\lambda) d\lambda$; $F_s(\lambda)$ — спектральный поток солнечного излучения; λ — длина волны; ϑ_s — зенитный угол Солнца.

Сравнение КСЯ по данным КМСС-2 и MODIS было проведено в спектральных каналах приборов, ФСЧ которых перекрываются: зелёный канал № 3 КМСС-2 (520–590 нм) с каналом № 4 MODIS (545–565 нм); красный канал № 1 КМСС-2 (640–690 нм) с каналом № 1 MODIS (620–670 нм); канал № 2 КМСС-2 (785–900 нм) в ближнем ИК-диапазоне с каналами № 2 (841–876 нм) и № 17 (890–920 нм) MODIS.

Пересчёт значений КСЯ между спектральными зонами КМСС-2 и MODIS проводился по методике, описанной в работе (Жуков и др., 2014). Для этого осуществлялось интегрирование по указанным зонам спектрального распределения КСЯ почв, растительности, воды и снега из библиотеки ASTER, пересчитанных на верхнюю границу атмосферы с использованием стандартных моделей атмосферы MODTRAN, а также спектрального распределения КСЯ моделей облаков MODTRAN. Полученные в результате диаграммы рассеяния показаны на *рис. 1* (см. с. 66), а соответствующие регрессионные соотношения приведены в *табл. 3*. Они мало отличаются для камер КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-2 и «Метеор-М» № 2-3, у которых ФСЧ спектральных каналов близки. Отличие от камер КМСС «Метеор-М» № 1 (Жуков и др., 2014) и КМСС-М «Метеор-М» № 2 (Кондратьева и др., 2018) более существенно.

Для инфракрасного канала КМСС-2 (785–900 нм), который перекрывается с двумя каналами MODIS (841–876 нм) и (890–920 нм), для сравнения была проведена простая (парная) регрессия с каналом (841–876 нм) и множественная регрессия с обоими каналами MODIS. Как показывает *рис. 1в, г*, использование множественной регрессии с двумя каналами MODIS обеспечивает значительно большую точность пересчёта КСЯ, чем при использовании только одного канала 2 MODIS.

В ходе проведения лётных испытаний КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-3 была проведена проверка радиометрической калибровки камер по однородному снежному покрову о-ва Гренландия. Для обработки были отобраны безоблачные изображения камер КМСС-2 и по результатам наземной калибровки была проведена их радиометрическая и геометрическая коррекция и географическая привязка. Изображения КМСС-2 загроублялись до разрешения 1 км, соответствующего разрешению MODIS, путём усреднения значений яркости. Данные MODIS/Aqua (продукт MYD021KM) с разрешением 1 км, обработанные до уровня 1В (радиометрически калиброванные и географически привязанные изображения), были получены из Системы спутниковых данных наблюдения Земли и информационной системы Национального управления по авиации и исследованию космического пространства США (*англ.* Earth Observing System Data and Information System, National Aeronautics and Space Administration — EOSDIS NASA) (<https://earthdata.nasa.gov>). Интервал времени между съёмками КМСС-2 и MODIS не превышал двух часов. Использовались только безоблачные сцены.

Вычисления средних значений КСЯ, а также соответствующих им углов Солнца и углов наблюдения проводились поканально в области перекрытия сцен съёмки КМСС-2 и MODIS по единому географическому полигону, который состоит в среднем из 300 пикселей и имеет однородные спектрально-яркостные характеристики со среднеквадратическим отклонением КСЯ не более 0,01. Учёт различий значений КСЯ снежного покрова вследствие различия

высоты Солнца в моменты съёмки КМСС и MODIS проводился с использованием индикатрисы рассеяния снега, построенной в работе (Жуков и др., 2014) для малых углов Солнца, при которых проводится ежегодная калибровка камер КМСС-2 по Антарктиде.

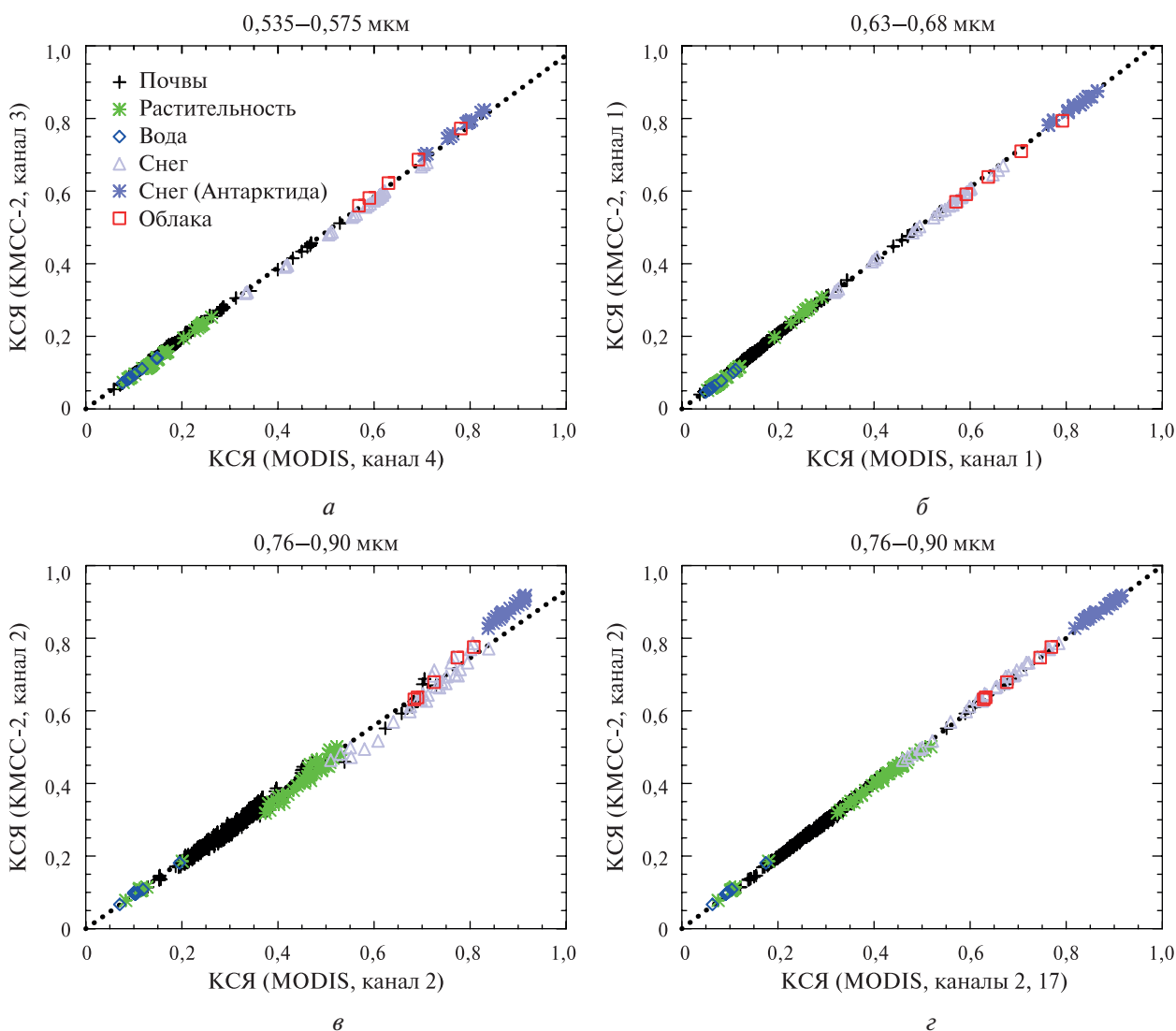


Рис. 1. Связь КСЯ природных объектов в спектральных зонах МСУ-231 и MODIS: а–в — простая регрессия с одним каналом MODIS для разных длин волн; г — множественная регрессия с двумя каналами MODIS для ИК-канала КМСС-2. Номера использованных каналов указаны в названиях осей

Таблица 3. Регрессионные соотношения для пересчёта значений КСЯ между спектральными зонами камер КМСС-2 и MODIS/Aqua (mod_i — КСЯ в зоне i MODIS/Aqua)

Камера, спектральный канал	Регрессионные соотношения
МСУ-231, канал 1 (640–690 нм)	$1,018 \times \text{mod_1}$ (СКО = 0,0033)
канал 2 (785–900 нм)	$0,698 \times \text{mod_2} + 0,310 \times \text{mod_17}$ (СКО = 0,0058)
канал 3 (520–590 нм)	$0,980 \times \text{mod_4}$ (СКО = 0,0048)
МСУ-232, канал 1 (640–690 нм)	$1,021 \times \text{mod_1}$ (СКО = 0,0033)
канал 2 (785–900 нм)	$0,663 \times \text{mod_2} + 0,346 \times \text{mod_17}$ (СКО = 0,0057)
канал 3 (520–590 нм)	$0,979 \times \text{mod_4}$ (СКО = 0,0045)

При проведении сопоставления КСЯ выбранных участков в спектральных зонах MODIS пересчитывались в значения КСЯ в соответствующих спектральных каналах камер КМСС-2 с помощью регрессионных соотношений, приведённых в *табл. 3*, и сопоставлялись со значениями КСЯ, непосредственно измеренными КМСС-2. В соответствии с *табл. 3*, среднеквадратическая ошибка пересчёта значений КСЯ между спектральными зонами КМСС-2 и MODIS составляет от 0,0033 до 0,0058, с максимальным значением в ИК-канале КМСС-2, в котором ФСЧ КМСС-2 и MODIS существенно различаются. Сопоставление значений КСЯ в спектральных зонах КМСС-2, реально измеренных и пересчитанных по данным MODIS, показало их хорошее согласие в красном и зелёном каналах, где оно составило 1 и 0,5 % соответственно. Однако в ИК-каналах камер КМСС-2 их расхождение составило 16–17 %, что значительно превышает как ошибку пересчёта, так и ошибку наземной калибровки. Для устранения полученных расхождений была проведена коррекция абсолютной чувствительности камер КМСС-2 по отношению к полученной при наземной калибровке с коэффициентами коррекции, приведёнными в *табл. 4*.

Таблица 4. Коэффициенты коррекции чувствительности камер КМСС-2 по результатам полётной калибровки

Камера, спектральный канал	Коэффициент коррекции
МСУ-231, канал 1 (640–690 нм)	0,99
канал 2 (785–900 нм)	0,84
канал 3 (520–590 нм)	1,005
МСУ-232, канал 1 (640–690 нм)	0,99
канал 2 (785–900 нм)	0,83
канал 3 (520–590 нм)	1,004

Проведённая кросс-калибровка КМСС-2 и MODIS проверялась по пескам пустыни Каракумы, Туркмения. Обработка изображений выбранных однородных участков и сопоставление их КСЯ по данным КМСС-2 и MODIS проводилась так же, как в случае Гренландии. На *рис. 2, 3* (см. с. 68) представлены результаты сопоставления КСЯ, измеряемых на верхней границе атмосферы в спектральных каналах съёмочных систем КМСС-2 и MODIS после проведения коррекции радиометрической калибровки КМСС-2. В верхней части графиков представлены данные по Гренландии, в нижней — данные природных объектов (Каракумы, Туркмения).

В *табл. 5* приведены результаты сопоставления КСЯ природных объектов в спектральных каналах КМСС-2 по данным КМСС-2 и MODIS/Aqua.

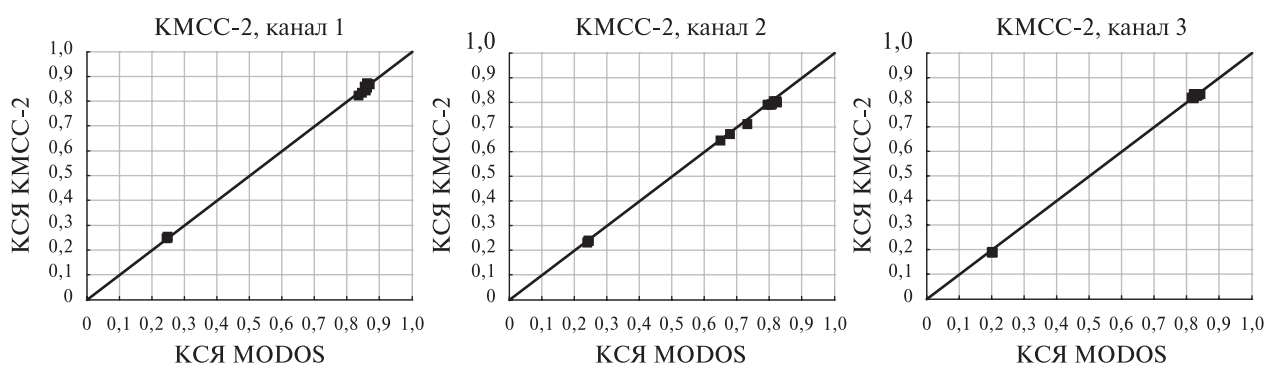


Рис. 2. Соотношение КСЯ в спектральных каналах КМСС-2 по измерениям МСУ-231 (с учётом коррекции) и MODIS

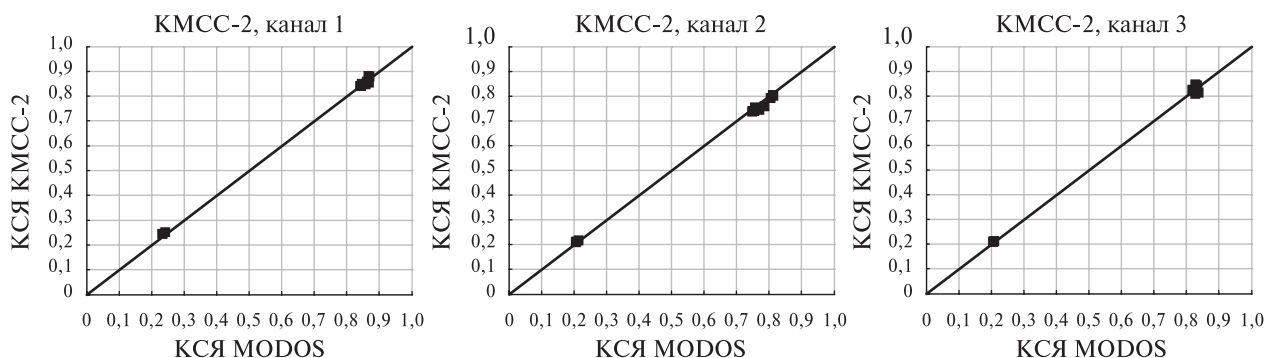


Рис. 3. Соотношение КСЯ в спектральных каналах КМСС-2 по измерениям МСУ-232 (с учётом коррекции) и MODIS

Таблица 5. Сопоставление КСЯ в спектральных каналах КМСС-2 по данным КМСС-2 и MODIS/Aqua

Параметры	Канал 1 (640–690 нм)	Канал 2 (785–900 нм)	Канал 3 (520–590 нм)
<i>МСУ-231</i>			
СКО КСЯ	0,008	0,013	0,009
Уравнение линейной регрессии значений КСЯ	$\rho_{МСУ} = 0,998 \times \rho_{MODIS}$	$\rho_{МСУ} = 0,981 \times \rho_{MODIS}$	$\rho_{МСУ} = 0,983 \times \rho_{MODIS}$
Отклонение коэффициента регрессии от единицы, %	-0,12	-1,9	-1,7
<i>МСУ-232</i>			
СКО КСЯ	0,010	0,013	0,012
Уравнение линейной регрессии значений КСЯ	$\rho_{МСУ} = 1,012 \times \rho_{MODIS}$	$\rho_{МСУ} = 0,992 \times \rho_{MODIS}$	$\rho_{МСУ} = 1,005 \times \rho_{MODIS}$
Отклонение коэффициента регрессии от единицы, %	1,2	-0,8	0,5

Отклонение коэффициента регрессии от единицы является следствием остаточного различия абсолютной радиометрической калибровки камер КМСС-2 и MODIS. Это отклонение по проведённым измерениям составляет по модулю 0,12–1,9 % в зависимости от спектрального канала. По этим данным СКО КСЯ не превышает 0,013. Разброс значений КСЯ около линии регрессии можно объяснить различием условий наблюдения объектов этими сенсорами.

Выводы

В ходе лётных испытаний аппаратуры КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-3 проведена её кросс-калибровка со спектрорадиометром MODIS на КА Aqua по участкам с однородным снежным покровом Гренландии. По её результатам проведена коррекция коэффициентов чувствительности камер КМСС-2, полученных в ходе наземной радиометрической калибровки, на 16–17 % в ИК-каналах камер и в пределах 1 % в красном и зелёном каналах.

После проведённой коррекции сопоставление значений КСЯ однородных участков на изображениях Гренландии и Каракум, полученных КМСС-2 и MODIS, показало, что отличие коэффициента линейной регрессии между ними от единицы, которое можно рассматривать как оценку расхождения абсолютной калибровки этих сенсоров, составляет по модулю 0,12–1,9 % в зависимости от спектрального канала, а СКО КСЯ не превышает 0,013.

Литература

1. Аванесов Г.А., Полянский И.В., Жуков Б.С и др. Комплекс многозональной спутниковой съемки на борту КА «Метеор-М» № 1: три года на орбите // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 2. С. 74–83. DOI: 10.7868/S0205961413020012.
2. Жуков Б.С., Кондратьева Т.В., Полянский И.В., Пермитина Л.И. Полетная радиометрическая кросс-калибровка комплекса многозональной спутниковой съемки на КА «Метеор-М» № 1 по спектрорадиометру MODIS на КА Terra // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 123–137.
3. Кондратьева Т.В., Жуков Б.С., Пермитина Л.И., Полянский И.В. Сопоставление радиометрических данных КМСС-М КА «Метеор-М» № 2 с данными MODIS КА Terra и OLI Landsat-8 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 19–28. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-19-28.
4. Кондратьева Т.В., Жуков Б.С., Полянский И.В. Радиометрические характеристики комплексов многозональной спутниковой съемки КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2 и КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 67–76. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-67-76.
5. Полянский И.В., Жуков Б.С., Кондратьева Т.В. и др. Комплекс многозональной спутниковой съемки среднего разрешения для гидрометеорологических космических аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 83–92. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-83-92.
6. Wu A. S., Xiong X. X., Doelling D. R. et al. Characterization of Terra and Aqua MODIS VIS, NIR, and SWIR Spectral Bands' Calibration Stability // IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing. 2013. V. 51. No. 7. P. 4330–4338. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2226588.

Radiometric characteristics estimation of multispectral satellite imaging system KMSS-2 on board Meteor-M No. 2-3 satellite by comparison with data from MODIS/Aqua spectroradiometer during flight tests

T. V. Kondratieva, B. S. Zhukov, I. V. Polyanskiy

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: tkondratieva@cosmos.ru

The multispectral satellite imaging system KMSS-2 is installed on hydrometeorological spacecrafts of the Meteor-M series, which was enlarged with another Meteor-M No. 2-3 spacecraft in 2023. As part of flight tests, images of natural ground test sites in Greenland and the Karakum Desert were obtained and used for radiometric quality estimation of KMSS-2 data and for their comparative analysis with data of spectroradiometer MODIS/Aqua (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) of level L1B. For this purpose, reflectances of natural objects in the spectral channels of KMSS-2 and in the corresponding spectral channels of MODIS were compared. The results of preliminary analysis showed the necessity to correct the sensitivity coefficients of the KMSS-2 NIR (near-infrared) channels, which were obtained during KMSS-2 on-ground calibration, by as much as 16–17 %. In the red and green channels, the required correction did not exceed 1 % and was within the accuracy of the on-ground calibration. After the correction, the reflectance of bright terrestrial objects in the visible and NIR ranges calculated from KMSS-2 data correlates well with the corresponding MODIS measurements with a root-mean-squared (RMS) deviation within 0.013.

Keywords: KMSS-2, MSU-100TM, multispectral satellite imaging system, Meteor-M No. 2-3, MODIS, reflectance, in-flight radiometric calibration, radiometric cross-calibration, remote sensing of the Earth

Accepted: 29.05.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-61-70

References

1. Avanesov G. A., Polyanskiy I. V., Zhukov B. S. et al., Multispectral satellite imaging system on-board "Meteor-M" No. 1: three years in orbit, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 2, pp. 74–83 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961413020012.
2. Zhukov B. S., Kondratieva T. V., Polyanskiy I. V., Permitina L. I., In-flight radiometric cross-calibration of Multispectral Satellite Imaging System on-board Meteor-M No. 1 relative to spectroradiometer MODIS on-board Terra, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 123–137 (in Russian).
3. Kondratieva T. V., Zhukov B. S., Permitina L. I., Polyanskiy I. V., Reflectance data comparison of multispectral satellite imaging system KMSS-M on-board Meteor-M No. 2, MODIS on Terra and OLI on Landsat-8, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 2, pp. 19–28 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-19-28.
4. Kondratieva T. V., Zhukov B. S., Polyanskiy I. V., Radiometric characteristics of multispectral satellite imaging systems KMSS-M on board Meteor-M No. 2 and KMSS-2 on board Meteor-M No. 2-2 satellites, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 7, pp. 67–76 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-67-76.
5. Polyanskiy I. V., Zhukov B. S., Kondratieva T. V. et al., Medium-resolution multispectral satellite imaging system for hydrometeorological spacecraft, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 83–92 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-83-92.
6. Wu A. S., Xiong X. X., Doelling D. R. et al., Characterization of Terra and Aqua MODIS VIS, NIR, and SWIR Spectral Bands' Calibration Stability, *IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing*, 2013, Vol. 51, No. 7, pp. 4330–4338, DOI: 10.1109/TGRS.2012.2226588.