

Радиометрические характеристики комплексов многозональной спутниковой съёмки КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2 и КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-2

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

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

Комплексы многозональной спутниковой съёмки (КМСС) работают на космических аппаратах серии «Метеор-М», которые входят в состав Космического комплекса гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-3М». КМСС являются приборами среднего разрешения и предназначены для съёмки поверхности Земли в полосе обзора около 1000 км в трёх спектральных зонах в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. КМСС-2 на космическом аппарате (КА) «Метеор-М» № 2-2 (запуск в июле 2019 г.) представляет собой следующее после КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2 модернизированное поколение приборов дистанционного зондирования Земли. В работе рассматриваются радиометрические данные КМСС-М и КМСС-2. Приведены результаты сравнения данных КМСС с данными MODIS при проведении полётных калибровок в 2020 г. по однородному снежному покрову Антарктиды. Отличие радиометрической калибровки указанных приборов составило 1–5 %, СКО отклонения КСЯ по измерениям КМСС и MODIS не превышало 0,05.

Ключевые слова: КМСС-М, КМСС-2, «Метеор-М» № 2, «Метеор-М» № 2-2, MODIS, Terra, Aqua, коэффициент спектральной яркости, КСЯ, полётная радиометрическая калибровка, радиометрическая кросс-калибровка, дистанционное зондирование Земли

Одобрена к печати: 09.12.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-67-76

Введение

Комплексы многозональной спутниковой съёмки (КМСС) работают на космических аппаратах (КА) серии «Метеор-М», входящих в состав Космического комплекса (КК) гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-3М», начиная с запуска в 2009 г. первого из группировки КА «Метеор-М» № 1.

Космические аппараты «Метеор-М» создаются в АО «Корпорация «ВНИИЭМ», являются полярно-орбитальными метеоспутниками, движутся по круговым солнечно-синхронным орбитам с высотой около 830 км.

КМСС разрабатываются и изготавливаются в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) и предназначены для решения метеорологических и природно-ресурсных задач. В состав каждого КМСС входят несколько многозональных съёмочных устройств (МСУ) среднего разрешения, предназначенных для съёмки поверхности Земли в полосе обзора около 1000 км в видимом и ближнем инфракрасном (ИК) спектральных диапазонах.

В настоящее время актуальными являются видеоданные, получаемые с КМСС-М КА «Метеор-М» № 2, выведенного на орбиту в 2014 г. с космодрома «Байконур», и КМСС-2 КА «Метеор-М» № 2-2, запуск которого состоялся в июле 2019 г. с космодрома «Восточный». КМСС-2 прошёл лётные испытания и был введён в эксплуатацию в составе КК «Метеор-3М» в 2020 г. Каждая последующая серия КМСС имеет ряд конструктивных модификаций, нацеленных на повышение качества получаемых видеоданных и усовершенствование процесса их обработки.

В настоящей работе рассматриваются вопросы, связанные с радиометрическим качеством данных КМСС-М КА «Метеор-М» № 2 и КМСС-2 КА «Метеор-М» № 2-2, их оценки, полученными при проведении полётных калибровок в 2020 г., а также сравнении с данными спектрорадиометра MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer).

Радиометрические характеристики КМСС-М и КМСС-2

Комплексы многозональной спутниковой съёмки КМСС-М КА «Метеор-М» № 2 и КМСС-2 КА «Метеор-М» № 2-2 предназначены для проведения съёмки поверхности Земли в видимом и ближнем ИК спектральных диапазонах электромагнитного излучения. В приборах КМСС используются оптические системы, разработанные и изготовленные в Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО).

КМСС-М КА «Метеор-М» № 2 (Аванесов и др., 2013) состоит из трёх приборов: двух идентичных камер МСУ-100М (условно именуемых МСУ-201 и МСУ-202) и одной камеры МСУ-50М (МСУ-250).

В приборах КМСС-М использованы специализированные объективы типа «Руссар-Метео», оптическая схема которых оптимизирована с точки зрения обеспечения требуемых световых характеристик, а также пространственно-частотных и геометрических свойств формируемого изображения. В МСУ-100М применён объектив «Руссар-Метео-100» с фокусным расстоянием 100 мм, относительным отверстием 1:5, оптимизированный для работы в спектральном диапазоне 450–1000 нм для исследования поверхности суши. Объектив «Руссар-Метео-50» в МСУ-50М имеет фокусное расстояние 50 мм и относительное отверстие 1:6,8, оптимизирован для работы в спектральном диапазоне 370–900 нм для съёмки поверхности акваторий.

В качестве фотоэлектронных преобразователей оптического сигнала в электрический в каждой камере КМСС-М используются три одинаковых линейных прибора зарядовой связи (ЛПЗС) (типа ILX508A производства компании SONY (Япония)), закрытые индивидуальными светофильтрами. Эти ЛПЗС характеризуются высокой чувствительностью в широком спектральном диапазоне при сохранении параметров в требуемом диапазоне температуры.

Камеры КМСС-М установлены на приборную платформу КА таким образом, что оптическая ось МСУ-50М направлена в нади́р, оптические оси камер МСУ-100М отклонены от направления в нади́р в плоскости, перпендикулярной плоскости орбиты движения КА, на угол $\pm 14^\circ$. Суммарная полоса обзора двух камер МСУ-100М при этом составляет около 960 км и примерно равна полосе обзора камеры МСУ-50М (940 км). Пространственное разрешение в нади́ре для МСУ-100М составляет 60 м, для МСУ-50М — 120 м. Направление обзора каналов 1 и 3 каждой из камер МСУ-100М отклонено в плоскости орбиты на угол $8,67^\circ$ вперёд (канал 1) и назад (канал 2) по ходу движения КА, а спектральных каналов камеры МСУ-50М — на угол $16,95^\circ$ вперёд (канал 1) и назад (канал 3).

КМСС-2 КА «Метеор-М» № 2-2 (Полянский и др., 2019) является следующим после КМСС-М поколением приборов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и имеет ряд конструктивных отличий (табл. 1).

В состав КМСС-2 входят два идентичных многозональных съёмочных устройства МСУ-100ТМ (МСУ-221 и МСУ-222) с фокусным расстоянием 125 мм и относительным отверстием 1:4,3.

Оптическая система ОС-125Т в приборах МСУ-100ТМ сконструирована таким образом, чтобы обеспечить пространственное совмещение оптических осей спектральных каналов прибора и тем самым фиксировать изображение одной и той же области земной поверхности в трёх спектральных каналах на трёх ЛПЗС. Формирование требуемых полос пропускания для трёх спектральных каналов видимого и ИК-диапазонов реализовано в оптической системе ОС-125Т за счёт использования системы дихроических зеркал и полосовых интерференционных фильтров.

В приборах МСУ-100ТМ/КМСС-2 используются ЛПЗС типа KLI-8023 производства компании KODAK (США). Эти ЛПЗС характеризуются высокой квантовой эффективностью в заданном спектральном диапазоне, низким уровнем шума и хорошей стабильностью параметров в требуемом диапазоне температуры. В ЛПЗС имеются опорные темновые фотоэлементы и электронная регулировка экспозиции, что позволяет наиболее эффективно согласовывать динамический диапазон ЛПЗС с диапазоном яркости регистрируемой сцены.

ны. В каждом из ЛПЗС в приборах КМСС-2 установлены три идентичных монохромных ПЗС-линейки. При проведении съёмки активной в данном спектральном канале является только одна из ПЗС-линеек, две другие используются для обеспечения резервирования. Переключение линеек, управление и их настройка обеспечиваются независимо.

Таблица 1. Характеристики КМСС-М и КМСС-2

Параметры	КМСС-М (МСУ-100М, МСУ-50М) на КА «Метеор-М» № 2		КМСС-2 (МСУ-100ТМ) на КА «Метеор-М» № 2-2
	МСУ-201 (МСУ-202)	МСУ-250	МСУ-221 (МСУ-222)
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	±15,2
Захват, км	960 (двумя камерами)	940	1020 (двумя камерами)
Пространственное разрешение в надире, м	60	120	55
Спектральные каналы (на уровне 0,5), нм	1-й: 755–870 2-й: 630–680 3-й: 535–575	1-й: 450–510 2-й: 430–455 3-й: 610–660	1-й: 640–690 2-й: 785–900 3-й: 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	98,494		98,63
Долгота восходящего узла орбиты КА, град	305,769		230,172

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.

Принцип действия приборов КМСС-М и КМСС-2 основан на одновременной построочной регистрации движущегося оптического изображения посредством фоточувствительных ПЗС-линеек (ЛПЗС) (в трёх спектральных каналах в видимой и ближней ИК-областях электромагнитного спектра), установленных в фокальной плоскости объектива. ПЗС-линейки установлены параллельно друг другу в фокальной плоскости объектива камеры и перпендикулярно направлению полёта КА.

К наиболее значащим 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 регистрируемых яркостей и повысить отношение сигнал/шум;
- увеличенное до 10 разрядов на канал количество градаций яркости цифрового сигнала;
- раздельное управление параметрами регистрации изображений в спектральных каналах.

Сопоставление КСЯ природных объектов, измеряемых КМСС-М, КМСС-2 и MODIS

Радиометрическое качество видеоданных КМСС обеспечивается предполётной наземной калибровкой (Ваваев и др., 2009), точность которой составляет 2 %, и ежегодной полётной калибровкой по снежным полям Антарктиды (Жуков и др., 2014), при выполнении которой анализируется соответствие коэффициентов спектральной яркости (КСЯ), измеряемых на верхней границе атмосферы съёмочными системами КМСС и MODIS. Сопоставление данных КМСС-М и КМСС-2 проводилось с данными MODIS на КА Terra и КА Aqua.

Спектрорадиометры MODIS/Terra и MODIS/Aqua являются идентичными оптико-механическими сканерами, имеют 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. КА Terra и КА Aqua движутся по приполярным солнечно-синхронным орбитам с высотой около 702 км.

Основные характеристики MODIS/Terra и MODIS/Aqua приведены в *табл. 2*.

Таблица 2. Характеристики MODIS/Terra и MODIS/Aqua

Параметр	Значение
Угол сканирования, град	± 55
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 инфракрасный)	16 зон в диапазоне 0,4–1 мкм; в том числе зоны: 1 — 620–670 нм (хлорофилл растений), 2 — 841–876 нм (облачность и растительность), 4 — 545–565 нм (зелёная растительность), 17 — 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, бит	12
Наклонение орбиты КА, град	98,206 (Terra); 98,197 (Aqua)
Долгота восходящего узла орбиты КА, град	344,994 (Terra); 211,003 (Aqua)

Точность абсолютной калибровки спектрорадиометров MODIS/Terra и MODIS/Aqua составляет около 5 % и поддерживается в полёте с помощью их внутренней калибровки, калибровки по Луне и наземным тестовым участкам (Wu et al., 2013).

Сопоставление и анализ данных проводились для двух камер в составе КМСС-М (МСУ-201, МСУ-202) с данными MODIS/Terra и камер МСУ-221 и МСУ-222 из состава КМСС-2 с данными MODIS/Aqua. Такой приоритет определялся исходя из необходимости корреляции по времени данных КМСС и MODIS. Имеющихся данных камеры МСУ-250/КМСС-М для сопоставления с MODIS в настоящее время недостаточно: МСУ-250

включается эпизодически, поскольку проводит съёмку в той же полосе обзора с худшим разрешением и поэтому имеет меньший спрос у пользователей.

Кросс-калибровка камер КМСС-М, КМСС-2 и MODIS была выполнена методом сопоставления КСЯ природных объектов на верхней границе атмосферы, измеренных в спектральных зонах приборов.

КСЯ на верхней границе атмосферы определяется соотношением:

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

где $L_i = \int s_i(\lambda)L(\lambda) d\lambda / \int s_i(\lambda) d\lambda$ — 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; $L_{S,i} = (F_{S,i} \cdot \cos \theta_S) / \pi$ — яркость идеального ламбертовского отражателя на верхней границе атмосферы в зоне i ; $F_{S,i} = \int s_i(\lambda)F_S(\lambda) d\lambda / \int s_i(\lambda) d\lambda$ — зональный поток солнечного излучения на верхней границе атмосферы; $F_S(\lambda)$ — спектральный поток солнечного излучения; λ — длина волны; θ_S — зенитный угол Солнца.

Использование КСЯ ρ_i вместо яркости L_i позволяет частично компенсировать влияние различия высоты Солнца в моменты съёмок КМСС и MODIS.

На *рис. 1* изображены функции относительной спектральной чувствительности спектральных каналов приборов КМСС-М, КМСС-2 и MODIS на фоне модельных спектров отражения природных объектов.

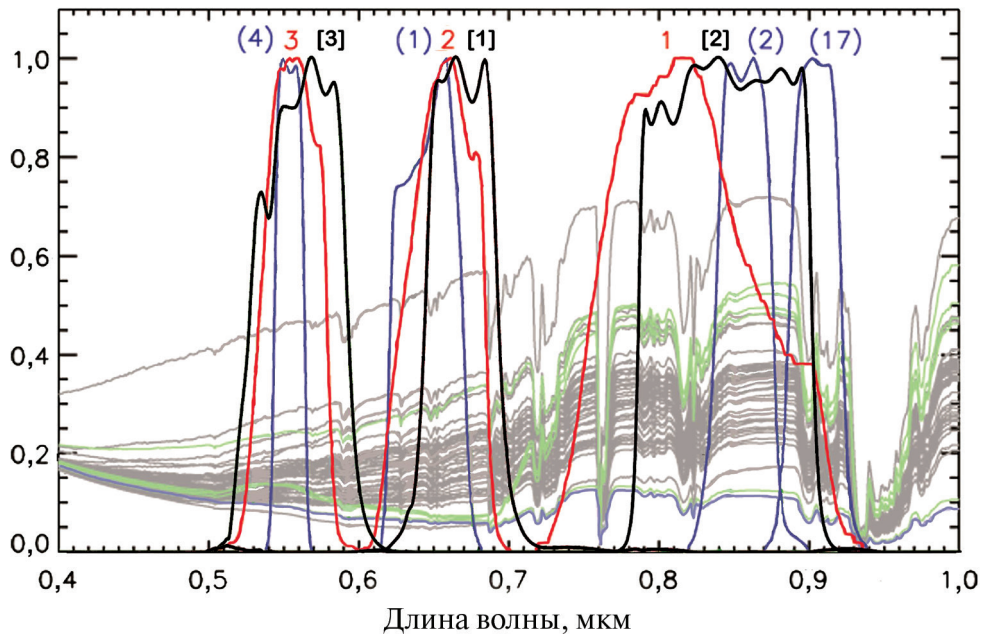


Рис. 1. Функции спектральной чувствительности каналов камер МСУ-201 (202), входящих в состав КМСС-М (показаны красным цветом), МСУ-221 (222), входящих в состав КМСС-2 (показаны чёрным цветом) и соответствующих им каналов MODIS (показаны синим цветом) на фоне модельных спектров отражения природных объектов

На *рис. 1* видно различие характеристик оптических систем КМСС-М и КМСС-2, ФСЧ которой имеет выраженный спад на краях спектральных каналов.

Перекрытие спектральных каналов КМСС-М, КМСС-2 и MODIS определяется для «зелёных» каналов 3 камер КМСС-М (535–575 нм) и КМСС-2 (520–590 нм) с каналом 4

MODIS, «красных» каналов 2 КМСС-М (630–680 нм) и 1 КМСС-2 (640–690 нм) с каналом 1 MODIS. В ближнем ИК-диапазоне ФСЧ значительно шире для каналов 1 КМСС-М (755–870 нм) и 2 КМСС-2 (785–900 нм) и перекрываются с каналами 2 и 17 MODIS.

Для учёта различия спектральных зон КМСС и MODIS были использованы регрессионные соотношения, полученные по методике, изложенной в работе (Жуков и др., 2014), моделированием спектров отражения на верхней границе атмосферы большого числа природных объектов (почвы, растительности, воды, снега, облаков) при различном состоянии атмосферы и различной высоте Солнца.

Регрессионные соотношения для пересчёта значений КСЯ природных объектов, измеряемых на верхней границе атмосферы, в спектральных зонах камер КМСС-М и КМСС-2 по значениям КСЯ, измеряемым в спектральных зонах MODIS, приведены в табл. 3 и 4. Коэффициенты в соотношениях немного отличаются для камер МСУ из-за небольшого различия их ФСЧ.

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

Камера, спектральный канал		Регрессионные соотношения
МСУ-201	канал 1 (755–870 нм)	$0,658 \text{ mod}_2 + 0,313 \text{ mod}_{17}$ (СКО = 0,0021)
	канал 2 (630–680 нм)	$1,015 \text{ mod}_1$ (СКО = 0,0019)
	канал 3 (535–580 нм)	$0,988 \text{ mod}_4$ (СКО = 0,0089)
МСУ-202	канал 1 (755–870 нм)	$0,680 \text{ mod}_2 + 0,285 \text{ mod}_{17}$ (СКО = 0,0018)
	канал 2 (630–680 нм)	$1,017 \text{ mod}_1$ (СКО = 0,0020)
	канал 3 (535–580 нм)	$0,990 \text{ mod}_4$ (СКО = 0,0099)

Таблица 4. 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-221	канал 1 (640–690 нм)	$1,023 \text{ mod}_1$ (СКО = 0,0044)
	канал 2 (785–900 нм)	$0,662 \text{ mod}_2 + 0,348 \text{ mod}_{17}$ (СКО = 0,0057)
	канал 3 (520–590 нм)	$0,974 \text{ mod}_4$ (СКО = 0,0054)
МСУ-222	канал 1 (640–690 нм)	$1,024 \text{ mod}_1$ (СКО = 0,0044)
	канал 2 (785–900 нм)	$0,662 \text{ mod}_2 + 0,347 \text{ mod}_{17}$ (СКО = 0,0057)
	канал 3 (520–590 нм)	$0,974 \text{ mod}_4$ (СКО = 0,0052)

Среднеквадратическая ошибка (СКО) пересчёта КСЯ между спектральными зонами камер КМСС-М и MODIS, рассчитанная по всем рассмотренным объектам и условиям наблюдения, составляет $\sim 0,002$ в каналах 2 и 3 камер КМСС-М и увеличивается до $\sim 0,01$ в канале 1, в котором ФСЧ КМСС-М и MODIS существенно различаются.

Для проведения сопоставления КСЯ подбирались пространственно совмещённые, ближайшие по времени (в интервале времени не более двух часов) безоблачные изображения КМСС и MODIS.

Данные MODIS с разрешением 1 км, обработанные до уровня 1В (радиометрически калиброванные и географически привязанные изображения), были получены из Системы спутниковых данных наблюдения Земли информационной системы НАСА (EOSDIS NASA, <https://earthdata.nasa.gov>) (EOSDIS — *англ.* Earth Observing System Data and Information System; НАСА — Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, *англ.* NASA — National Aeronautics and Space Administration). Данные КМСС, полученные из архива Научного центра оперативного мониторинга Земли АО «Российские кос-

мические системы» (НЦ ОМЗ АО РКС), проходили радиометрическую и геометрическую коррекцию и географическую привязку (Жуков и др., 2008) и загрублялись до 1 км, соответствующего разрешению MODIS.

Средние значения КСЯ (а также соответствующие им значения углов Солнца и наблюдения) вычислялись в области перекрытия сцен съёмки КМСС и MODIS по единому географическому полигону, состоящему в среднем из 300 пикселей и имеющему однородные спектрально-яркостные характеристики, поканально для КМСС и MODIS.

С помощью регрессионных соотношений, приведённых в табл. 3 и 4, полученные значения КСЯ для спектральных зон MODIS пересчитывались в значения КСЯ соответствующих каналов камер КМСС и сравнивались со значениями КСЯ, реально измеренными КМСС.

Кросс-калибровка с MODIS была проведена для КМСС-М и КМСС-2 по снежным полям Антарктиды в период январь – февраль 2020 г. КСЯ также были рассчитаны для основных классов природных объектов: растительности, почвы — по данным за период май – июнь 2020 г.

Результаты кросс-калибровки камер МСУ-221 и МСУ-222 с данными MODIS/Aqua представлены на рис. 2 и 3. Аналогичный вид имеют результаты кросс-калибровки камер МСУ-201 и МСУ-202 с данными MODIS/Terra.

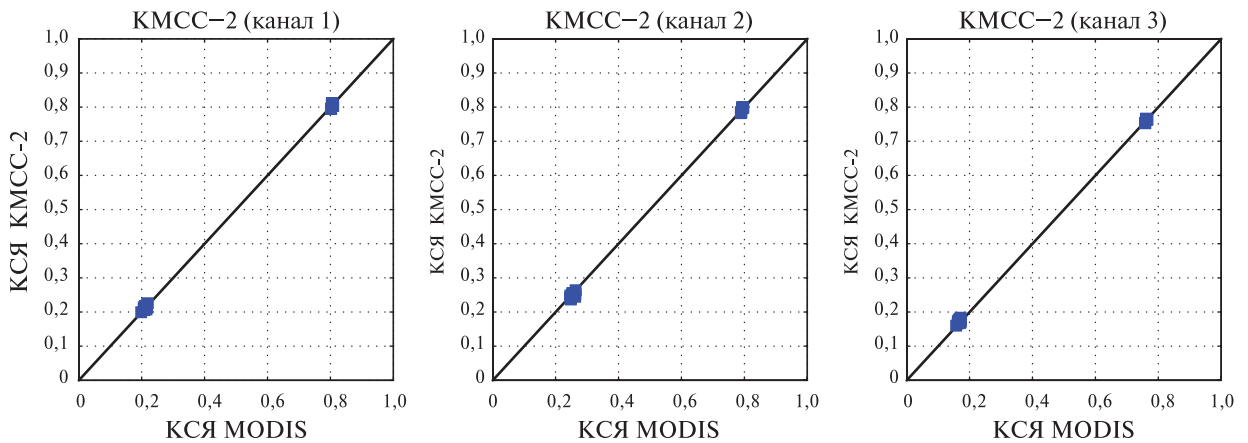


Рис. 2. Соотношение КСЯ природных объектов в спектральных каналах МСУ-221 и MODIS/Aqua

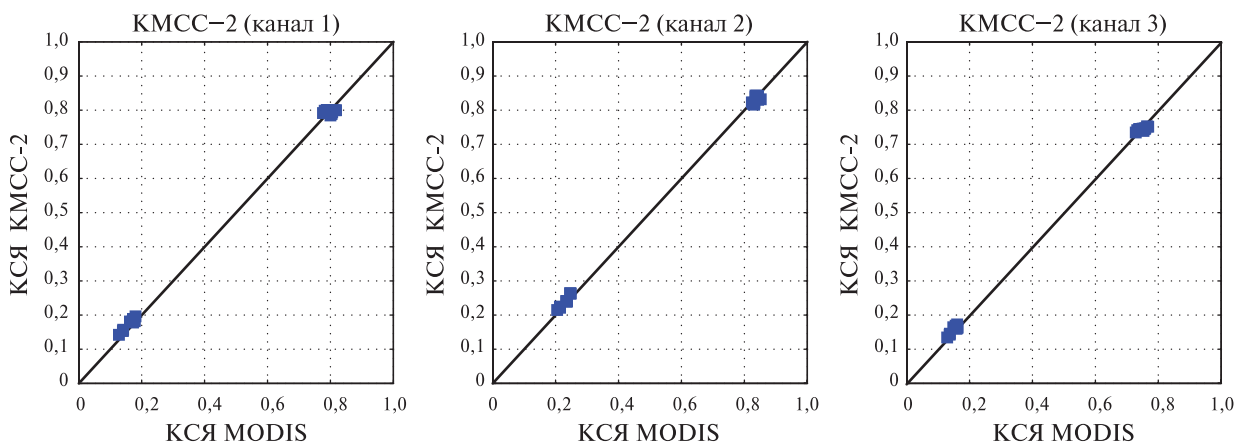


Рис. 3. Соотношение КСЯ природных объектов в спектральных каналах МСУ-222 и MODIS/Aqua

Значения КСЯ, измеренные камерами МСУ и вычисленные по данным MODIS с использованием регрессионных соотношений, совпадают и ложатся на биссектрису угла между осями абсцисс и ординат. В верхней части графиков представлены данные по Антарктиде, в нижней — данные природных объектов.

В табл. 5 и 6 приведены результаты сопоставления КСЯ природных объектов в спектральных каналах КМСС-М по данным КМСС-М и MODIS/Terra и в спектральных каналах КМСС-2 по данным КМСС-2, MODIS/Aqua.

Таблица 5. Сопоставление КСЯ природных объектов в спектральных каналах КМСС-М по данным КМСС-М и MODIS/Terra

Параметры	Канал 1 (755–870 нм)	Канал 2 (630–680 нм)	Канал 3 (535–575 нм)
<i>МСУ-201</i>			
СКО КСЯ	0,027	0,031	0,027
Уравнение линейной регрессии значений КСЯ	$\rho_{МСУ} = 0,992 \rho_{MODIS}$	$\rho_{МСУ} = 0,966 \rho_{MODIS}$	$\rho_{МСУ} = 0,97 \rho_{MODIS}$
Отклонение коэффициента регрессии от 1	0,827 %	3,417 %	3,047 %
<i>МСУ-202</i>			
СКО КСЯ	0,027	0,046	0,034
Уравнение линейной регрессии значений КСЯ	$\rho_{МСУ} = 0,974 \rho_{MODIS}$	$\rho_{МСУ} = 0,955 \rho_{MODIS}$	$\rho_{МСУ} = 0,964 \rho_{MODIS}$
Отклонение коэффициента регрессии от 1	2,573 %	4,513 %	3,578 %

Таблица 6. Сопоставление КСЯ природных объектов 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-221</i>			
СКО КСЯ	0,006	0,007	0,007
Уравнение линейной регрессии значений КСЯ	$\rho_{МСУ} = 1,005 \rho_{MODIS}$	$\rho_{МСУ} = 0,998 \rho_{MODIS}$	$\rho_{МСУ} = 1,02 \rho_{MODIS}$
Отклонение коэффициента регрессии от 1	0,532 %	1,147 %	2,035 %
<i>МСУ-222</i>			
СКО КСЯ	0,011	0,009	0,008
Уравнение линейной регрессии значений КСЯ	$\rho_{МСУ} = 1,027 \rho_{MODIS}$	$\rho_{МСУ} = 1,019 \rho_{MODIS}$	$\rho_{МСУ} = 1,02 \rho_{MODIS}$
Отклонение коэффициента регрессии от 1	2,681 %	1,943 %	2,09 %

Отклонение коэффициента регрессии КСЯ от единицы для приборов КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2 имеет значения 0,8–4,5 % в зависимости от спектрального канала, СКО КСЯ по данным этих сенсоров не превышает 0,046. Для приборов КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-2 отклонение коэффициента регрессии КСЯ составило 0,5-2,6 %, а СКО КСЯ не превышает 0,011.

Отклонение коэффициента регрессии от единицы можно рассматривать как отклонение абсолютной радиометрической калибровки камер МСУ и MODIS. Разброс значений КСЯ около линии регрессии можно объяснить различием условий наблюдения объектов этими сенсорами.

Выводы

При сопоставлении КСЯ природных объектов по данным КМСС-М и MODIS/Terra отличие коэффициента линейной регрессии от единицы, которое можно рассматривать как оценку расхождения абсолютной калибровки этих сенсоров, составляет 0,8–4,5 % в зависимости от спектрального канала, а СКО КСЯ не превышает 0,046.

По данным КМСС-2 и MODIS/Aqua расхождения абсолютной калибровки составляет 0,5–2,6 % в зависимости от спектрального канала, а СКО КСЯ не превышает 0,011.

Литература

1. Аванесов Г. А., Полянский И. В., Жуков Б. С., Никитин А. В., Фори А. А. Комплекс многозональной спутниковой съёмки на борту КА «Метеор-М» № 1: три года на орбите // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 2. С. 74–83.
2. Ваваев В. А., Василейский А. С., Жуков Б. С., Жуков С. Б., Куркина А. Н., Полянский И. В. Наземная калибровка камер КМСС для КА «Метеор-М» № 1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Вып. 6. Т. 1. С. 251–258.
3. Жуков Б. С., Василейский А. С., Жуков С. Б., Зиман Я. Л., Полянский И. В., Бекренев О. В., Пермитина Л. И. Предварительная обработка видеоданных КМСС с КА «Метеор-М» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 1. С. 260–266.
4. Жуков Б. С., Кондратьева Т. В., Полянский И. В., Пермитина Л. И. Полетная радиометрическая кросс-калибровка комплекса многозональной спутниковой съёмки 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.
5. Полянский И. В., Жуков Б. С., Кондратьева Т. В., Прохорова С. А., Сметанин П. С. Комплекс многозональной спутниковой съёмки 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., Morstad D., Angal A., Bhatt R. Characterization of Terra and Aqua MODIS VIS, NIR, and SWIR Spectral Bands' Calibration Stability // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2013. V. 51. No. 7. P. 4330–4338.

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

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

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

The multispectral satellite Earth remote sensing systems (KMSS) operate on board Meteor-M satellites, which are parts of the Meteor-3M space system of hydrometeorological and oceanographic support. KMSS are medium-resolution instruments designed to survey the Earth's surface in a swath of about 1000 km in three VNIR spectral bands. KMSS-2 (launched in July 2019 on-board the Meteor-M No. 2-2 s/c) is the next modernized generation of ERS instrument after KMSS-M on the Meteor-M No. 2 s/c. In this work, the radiometric data of KMSS-M and KMSS-2 are analyzed. The comparison results of the KMSS and MODIS data obtained during in-flight calibrations in 2020 over the homogeneous snow cover of Antarctica are presented. The difference in the radiometric calibration of these instruments was estimated at 1–5 %, the root-mean-squared (RMS) deviation of the KMSS and MODIS reflectance measurements was found to be within 0.05.

Keywords: KMSS-M, KMSS-2, multispectral satellite imaging system, Meteor-M No. 2, Meteor-M No. 2-2, MODIS, Terra, Aqua, reflectance, in-flight radiometric calibration and validation, remote sensing of the Earth

Accepted: 09.12.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-67-76

References

1. Avanesov G. A., Polyanskiy I. V., Zhukov B. S., Nikitin A. V., Forsh A. A., Kompleks mnogozonol'noi sputnikovoi s'emki na bortu KA "Meteor M" No. 1: tri goda na orbite (Multispectral Sattelite Imaging System Aboard the Meteor-M No. 1 Spacecraft: Three Years in Orbit), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 2, pp. 74–83.
2. Vavaev V. A., Vasileiskii A. S., Zhukov B. S., Zhukov S. B., Kurkina A. N., Polyanskiy I. V., Nazemnaya kalibrovka kamer KMSS dlya KA "Meteor-M" No. 1 (On-ground calibration of KMSS cameras for Meteor-M No. 1), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, Vol. 1, No. 6, pp. 251–258.
3. Zhukov B. S., Vasileiskii A. S., Zhukov S. B., Ziman Ya. L., Polyanskiy I. B., Bekrenev O. V., Permitina L. I., Predvaritel'naya obrabotka videodannykh KMSS s KA "Meteor-M" (Preprocessing of imaging data from KMSS on Meteor-M s/c), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 1, No. 5, pp. 260–266.
4. Zhukov B. S., Kondratieva T. V., Polyanskiy I. V., Permitina L. I., Poletnaya radiometricheskaya kross-kalibrovka kompleksa mnogozonol'noi sputnikovoi s'emki na KA "Meteor-M" No. 1 po spektroradiometru MODIS na KA Terra (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.
5. Polyanskiy I. V., Zhukov B. S., Kondratieva T. V., Prokhorova S. A., Smetanin P. S., Kompleks mnogozonol'noi sputnikovoi s'emki srednego razresheniya dlya gidrometeorologicheskikh kosmicheskikh apparatov (Medium-resolution multispectral satellite imaging system for hydrometeorological spacecraft), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 83–92, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-83-92.
6. Wu A. S., Xiong X. X., Doelling D. R., Morstad D., Angal A., Bhatt R., Characterization of Terra and Aqua MODIS VIS, NIR, and SWIR Spectral Bands' Calibration Stability, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2013, Vol. 51, No. 7, pp. 4330–4338.