

Сопоставление коэффициентов яркости природных объектов по данным КМСС на КА «Метеор-М» №1 и MODIS на КА «Terra»

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

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

Комплекс многозональной спутниковой съемки (КМСС), работающий на борту КА «Метеор-М» №1 с сентября 2009 года, включает в себя две камеры МСУ-100 с разрешением около 60 м и тремя спектральными зонами в видимом и ближнем ИК диапазонах, оптимизированными для съемок суши, и одну камеру МСУ-50 с разрешением около 120 м и тремя спектральными зонами в видимом диапазоне, оптимизированными для мониторинга водных объектов. Камеры КМСС были радиометрически прокалиброваны на Земле. В полете ежегодно проводится радиометрическая кросс-калибровка КМСС относительно спектрорадиометра MODIS на КА Terra по однородному снежному покрову высокогорного Антарктического плато с учетом его индикатрисы рассеяния.

В данной работе на основе указанной кросс-калибровки анализируется соответствие коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) на верхней границе атмосферы по данным КМСС и MODIS для широкого круга природных объектов на территории России, ежедневный оперативный мониторинг которых является основной задачей КМСС. С этой целью отбирались изображения участков земной поверхности, которые снимались КМСС и MODIS с интервалом времени не более 1–2 час в стабильных атмосферных условиях. Пересчет КСЯ между спектральными зонами КМСС и MODIS осуществлялся с использованием регрессионных соотношений, полученных по результатам моделирования спектров отражения системы поверхность – атмосфера. В отличие от кросс-калибровки по Антарктиде, различие углов наблюдения и Солнца в моменты съемок КМСС и MODIS в данном анализе не учитывается. Несмотря на это, получено хорошее соответствие КСЯ природных объектов, регистрируемых КМСС и MODIS: величина их среднеквадратического отклонения не превышает 0,022, а коэффициент линейной регрессии между ними отличается от единицы не более чем на 4%, что находится в пределах точности абсолютной радиометрической калибровки как КМСС (6–7%), так и MODIS (5%).

Ключевые слова: КМСС, Метеор-М №1, MODIS, коэффициент спектральной яркости, полетная радиометрическая калибровка.

Введение

В настоящее время широкое применение получили многоспектральные оптоэлектронные съемочные системы, позволяющие оперативно получать изображения земной поверхности в видимом и ближнем ИК диапазонах. При этом эффективность интерпретации получаемых данных во многом зависит от достоверности измерения спектральных отражательных характеристик природных объектов.

Для камер Комплекса многозональной спутниковой съемки (КМСС) на КА «Метеор-М» №1 радиометрическое качество данных обеспечивается предполетной наземной калибровкой (Ваваев и др., 2009), а также ежегодно проводимой полетной кросс-калибровкой относительно спектрорадиометра MODIS на КА «Terra» по однородному снежному покрову на высокогорном Антарктическом плато с учетом его индикатрисы рассеяния (Жуков и др., 2014). Необходимость полетной калибровки КМСС связана с тем, что вариации температуры и воздействие космических лучей и пыли на фотоприемники, оптические и электронные компоненты камер могут привести к изменению их радиометрических характеристик в полете. Точность полетной калибровки КМСС оценивается в 6–7%.

В данной работе на основе указанной калибровки анализируется соответствие коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) на верхней границе атмосферы по данным КМСС

и MODIS для широкого круга природных объектов на территории России, ежедневный оперативный мониторинг которых является основной задачей КМСС. При этом, в отличие от кросс-калибровки по Антарктиде, различие углов наблюдения и Солнца в моменты съемок КМСС и MODIS не учитывается.

Сравнительные характеристики КМСС и MODIS

Комплекс многозональной спутниковой съемки (Аванесов и др., 2013), предназначенный для решения метеорологических и природно-ресурсных задач, разработан и изготовлен в ИКИ РАН. КМСС работает на борту космического аппарата «Метеор-М» №1 на протяжении 5 лет. В состав комплекса КМСС входят две камеры МСУ-100 с фокусным расстоянием 100 мм и одна камера МСУ-50 с фокусным расстоянием 50 мм. Все камеры имеют по три ПЗС-линейки, закрытых индивидуальными светофильтрами. ПЗС-линейки установлены параллельно друг другу в фокальной плоскости объектива перпендикулярно направлению полета КА. Спектральные зоны МСУ-100 оптимизированы для исследования поверхности суши, а МСУ-50 – для исследования акваторий.

Камеры КМСС установлены на приборную платформу КА таким образом, что оптическая ось МСУ-50 направлена в надир, оптические оси камер МСУ-100 отклонены от направления в надир в плоскости, перпендикулярной плоскости орбиты движения КА, на угол $\pm 14^\circ$. Таким образом, обеспечивается суммарная полоса обзора камер МСУ-100 в 960 км, примерно равная полосе обзора камеры МСУ-50 (940 км). Направления обзора каналов 1 и 3 каждой из камер МСУ-100 отклонены в плоскости орбиты на угол $8,67^\circ$ вперед (1 канал) и назад (3 канал) по ходу движения КА, спектральных каналов камеры МСУ-50 на угол $16,95^\circ$ вперед (1 канал) и назад (3 канал).

Характеристики камер КМСС приведены в *табл. 1*.

В данной работе анализируются только данные двух камер МСУ-100, с помощью которых проводится ежедневная съемка территории России и близлежащих государств. Эти камеры условно называются МСУ-101 и МСУ-102. Данные камеры МСУ-50, снимающей ту же полосу обзора, но с худшим разрешением, пользуются меньшим спросом у пользователей, и поэтому МСУ-50 включается лишь эпизодически. По этой причине в настоящее время отсутствует достаточно представительный материал для сопоставления ее данных с MODIS.

Спектрорадиометр MODIS является оптико-механическим сканером, имеет 36 каналов с пространственным разрешением от 250 до 1000 метров. Ширина полосы съемки MODIS составляет 2330 км.

Основные характеристики спектрорадиометра MODIS приведены в *табл. 2*.

Точность абсолютной калибровки MODIS составляет около 5% и поддерживается в полете с помощью его внутренней калибровки, калибровки по Луне и наземным тестовым участкам (Wu и др., 2013).

Таблица 1. Характеристики камер КМСС

<i>Параметры</i>	<i>Камера</i>	
	<i>МСУ-100</i>	<i>МСУ-50</i>
Фотоприемники	3 линейных ПЗС	
Число элементов в строке	3 × 7926	
Число камер	2	1
Фокусное расстояние объектива, мм	100	50
Угол поля зрения, град	31	58
Захват, км (Н = 830 км)	960 (двумя камерами)	940
Разрешение, м (Н = 830 км)	60	120
Спектральные каналы	№1: 760–900 нм №2: 630–680 нм №3: 535–575 нм	№1: 450–510 нм №2: 370–450 нм №3: 580–690 нм
Частота строк, Гц	156,25	
Информационный поток одной камеры, Мбит/сек	~30	
Разрядность АЦП / изображения, бит	16 / 8	
Динамический диапазон ПЗС	5000	
Масса, кг	2,9	2,3
Максимальное энергопотребление, Вт	6,8	6,8

Таблица 2. Характеристики спектрорадиометра MODIS на КА Terra

<i>Параметр</i>	<i>Значение</i>
Угол сканирования	±55°
Полоса обзора (Н = 705 км)	2330 км
Разрешение в надире (Н = 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 – 620–670 нм (хлорофилл растений); 2 – 841–876 нм (облачность и растительность); 4 – 545–565 нм (зеленая растительность); 9 – 438–448 нм (наблюдение за хлорофиллом); 10 – 483–493 нм (наблюдение за хлорофиллом); 17 – 890–920 нм (параметры облачности и атмосферы); 19 – 915–965 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

Методика сопоставления данных КМСС и MODIS

КСЯ природных объектов, измеряемый в спектральных зонах приборов КМСС и MODIS на верхней границе атмосферы, определяется в соответствии со способом его измерения соотношением:

$$\rho_i = \frac{L_i}{L_{S,i}} = \frac{\pi L_i}{F_{S,i} \cos \vartheta_s}, \quad (1)$$

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 съемочной системы; $L_{S,i} = \frac{F_{S,i} \cos \vartheta_s}{\pi}$ – 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 съемок КМСС и MODIS.

При выборе тестовых объектов для сопоставления значений КСЯ, измеряемых КМСС и MODIS, учитывались следующие требования:

- подбор ближайших по времени изображений КМСС и MODIS (в интервале времени не более 2 часов);
- наличие безоблачных и стабильных атмосферных условий в интервале времени между съемками КМСС и MODIS;
- пространственное совмещение данных КМСС и MODIS;
- выбор достаточно больших и однородных тестовых объектов;
- учет различия спектральных зон КМСС и MODIS.

Учет различия высоты Солнца и углов наблюдения в моменты съемок КМСС и MODIS на значения КСЯ при большом разнообразии снимаемых объектов трудно реализуем и поэтому не проводился. Этот фактор может быть одной из основных причин возможного расхождения значений КСЯ по данным КМСС и MODIS.

На *рис. 1* представлены функции спектральной чувствительности (ФСЧ) каналов камер МСУ-100 и каналов спектрорадиометра MODIS на фоне модельных спектров отражения природных объектов. Для камеры МСУ-100 «зеленый» канал 3 (535–575 нм) перекрывается с каналом 4 MODIS (545–565 нм), «красный» канал 2 (630–680 нм) МСУ-100 близок к каналу 1 (620–670 нм) MODIS, а канал 1 (760–900 нм) в ближнем ИК диапазоне МСУ-100 перекрывает каналы 2 (841–876 нм), 17 (890–920 нм) и 19 (915–965 нм) MODIS.

В *табл. 3* приведены полученные в работе (Жуков и др., 2014) регрессионные соотношения для пересчета значений КСЯ природных объектов, измеряемых на верхней границе атмосферы, между спектральными зонами камер КМСС и MODIS. Эти соотно-

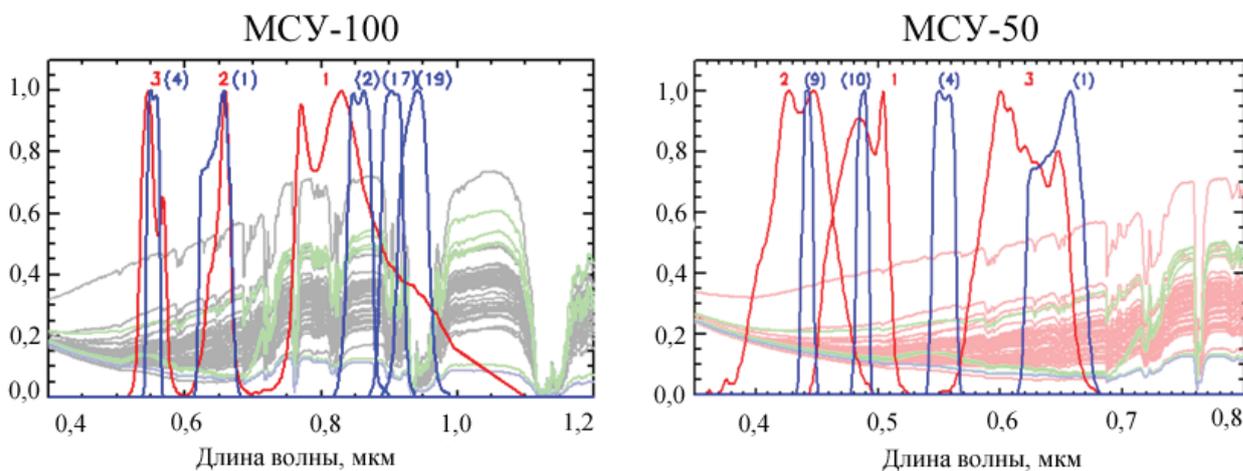


Рис. 1. Функции спектральной чувствительности каналов МСУ-100 и МСУ-50 (показаны красным цветом) и соответствующих им каналов MODIS (показаны синим цветом) на фоне модельных спектров отражения природных объектов

шения получены путем моделирования спектров отражения на верхней границе атмосферы большого числа природных объектов (почвы, растительность, вода, снег, облака) при различном состоянии атмосферы и различной высоте Солнца. Среднеквадратическая ошибка (СКО) пересчета КСЯ между спектральными зонами камер КМСС и MODIS, рассчитанная по всем рассмотренным объектам и условиям наблюдения, составляет 0,002–0,007 в зависимости от спектральной зоны. Если ограничиться рассмотрением только почвенно-растительных и водных объектов, то СКО пересчета КСЯ уменьшается до 0,001–0,005.

Необходимо отметить, что приведенные регрессионные соотношения справедливы для конкретных ФСЧ каналов камер КМСС на КА «Метеор-М» №1. Для камер КМСС-М на следующем КА «Метеор-М» №2, у которых ФСЧ несколько отличаются, аналогичные регрессионные соотношения могут быть получены по такой же методике.

Данные КМСС получены из архива Научного центра оперативного мониторинга Земли (НЦОМЗ). Данные КМСС проходили радиометрическую и геометрическую коррекцию и географическую привязку и загрублялись до 1 км, соответствующего разрешению MODIS. Данные MODIS с разрешением 1 км, обработанные до уровня 1В (радиометрически

Таблица 3. Регрессионные соотношения для пересчета значений КСЯ между спектральными зонами камер КМСС и MODIS (mod_i – КСЯ в зоне i MODIS)

Канал	Регрессионное соотношение
Камеры МСУ-100:	
канал 1 (0,76–0,90 мкм)	$0,658 \cdot \text{mod}_2 + 0,161 \cdot \text{mod}_{17} + 0,160 \cdot \text{mod}_{19}$
канал 2 (0,63–0,68 мкм)	$1,006 \cdot \text{mod}_1$
канал 3 (0,535–0,575 мкм)	$0,990 \cdot \text{mod}_4$
Камера МСУ-50:	
канал 1 (0,45–0,51 мкм)	$1,008 \cdot \text{mod}_{10}$
канал 2 (0,37–0,45 мкм)	$0,998 \cdot \text{mod}_9$
канал 3 (0,58–0,69 мкм)	$0,734 \cdot \text{mod}_1 + 0,233 \cdot \text{mod}_4$

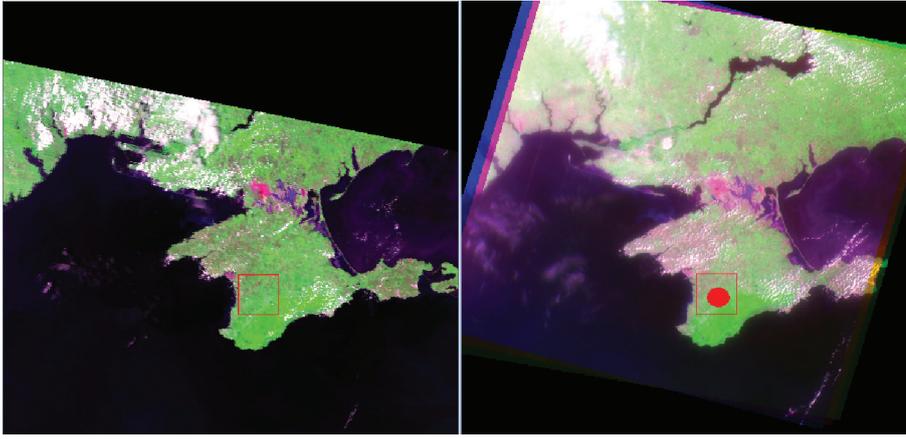


Рис. 2. Пример выбора тестового участка на изображениях MODIS (слева) и KMCC (справа)

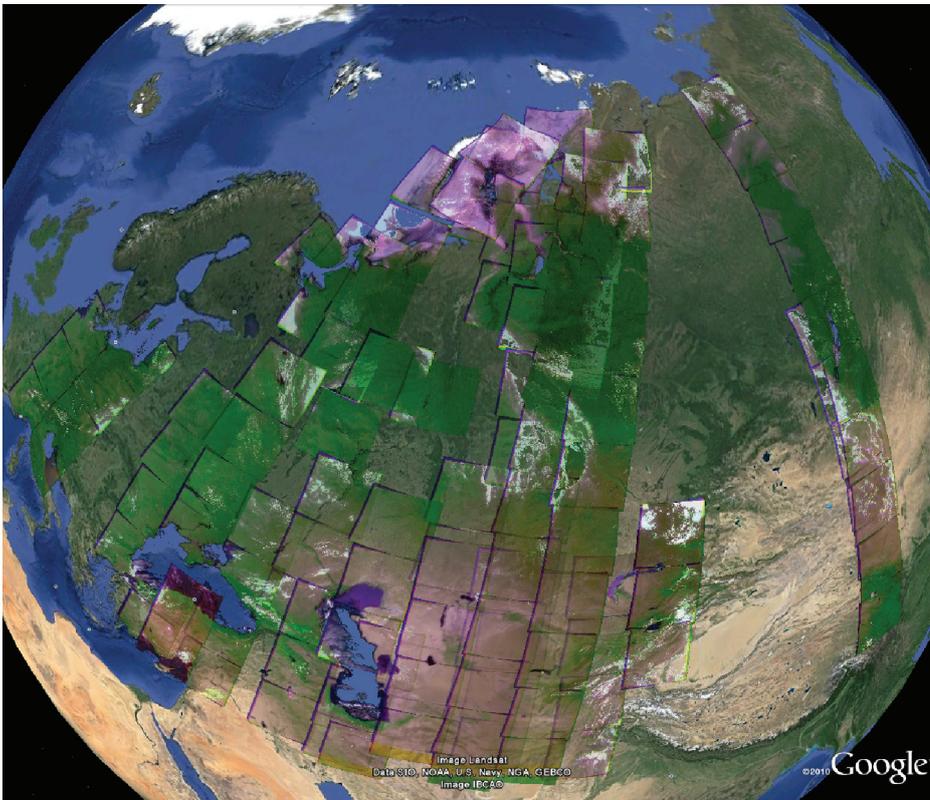


Рис. 3. Мозаика обработанных изображений KMCC, наложенная на основу Google Earth

калиброванные и географически привязанные изображения), получены из Системы архивирования и распространения данных НАСА (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data>).

На совмещенных изображениях KMCC и MODIS (рис. 2) в области перекрытия сцен съемки выбирались безоблачные фрагменты, состоящие в среднем из 500 пикселей, с изображением однородного природного объекта и вычислялись средние значения КСЯ поканально для KMCC и MODIS, а также соответствующие им значения углов Солнца и наблюдения.

Полученные значения КСЯ для спектральных зон MODIS пересчитывались с помощью регрессионных соотношений, приведенных в табл. 3, в значения КСЯ соответствующим

ющих каналов камер КМСС и сравнивались со значениями КСЯ, реально измеренными КМСС. Были рассмотрены основные классы природных объектов: растительность, почва, вода, а также снег Антарктиды. В общей сложности было проанализировано более 100 полигонов для каждой их камер МСУ-101 и МСУ-102. На представленной на *рис. 3* мозаике проанализированные гранулы изображений КМСС наложены на основу Google Earth.

Результаты обработки

В результате обработки данных КМСС и MODIS были построены графики, иллюстрирующие соответствие КСЯ природных объектов, полученных по данным измерений камерами КМСС и по данным MODIS, пересчитанным для каждого спектрального канала КМСС, а также соответствие условий наблюдения.

На *рис. 4* представлены результаты, полученные для прибора МСУ-101. В верхнем ряду показана связь зенитных углов наблюдения и Солнца для МСУ-101 и MODIS. Зенитные углы Солнца практически совпадают для МСУ-101 и MODIS, когда их значения превышают 40° . При значении зенитного угла Солнца менее 40° указанный угол для МСУ-100 остается практически неизменным, а для MODIS, съемка которым проводится позже, может

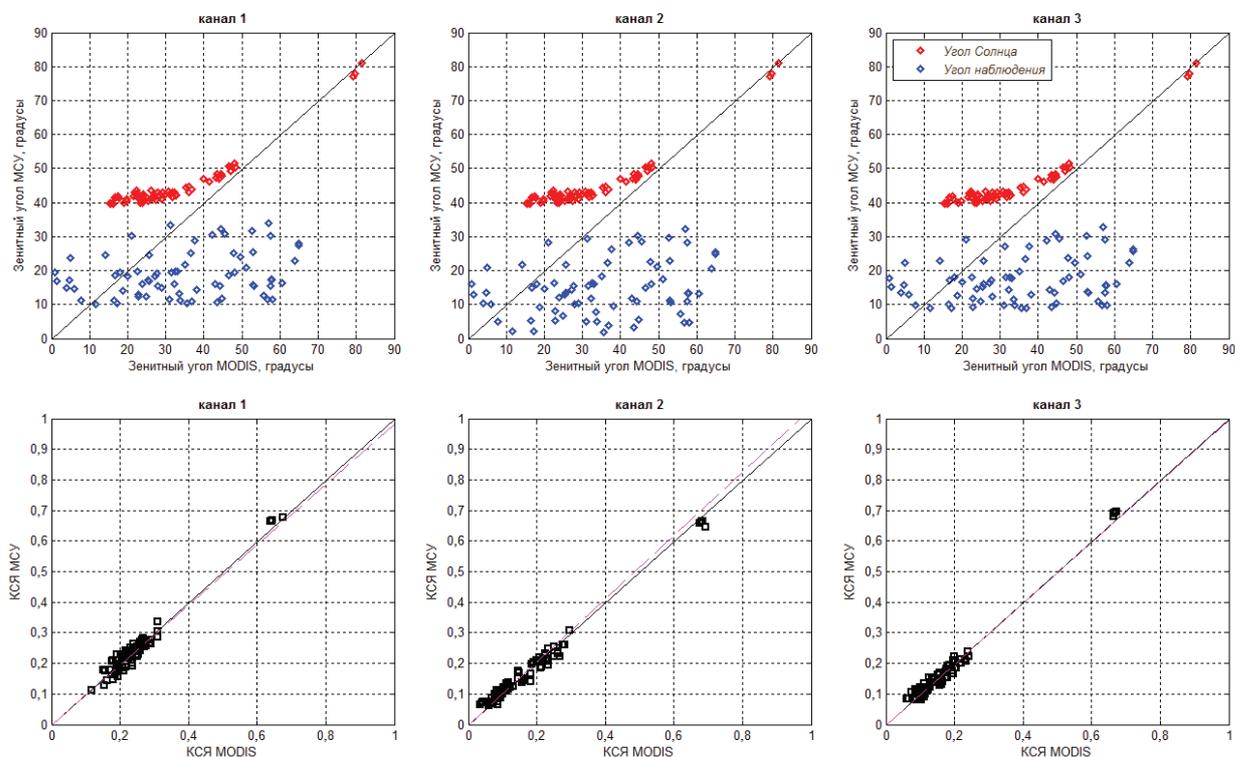


Рис. 4. Связь КСЯ природных объектов по измерениям МСУ-101 и MODIS. Верхний ряд – связь зенитных углов Солнца (показано красным цветом) и зенитных углов наблюдения (показано синим цветом) в спектральных зонах МСУ-101 и MODIS; нижний ряд – связь КСЯ природных объектов в спектральных зонах МСУ-101 и MODIS (пунктирной линией показана линия регрессии)

быть значительно меньше. Значения зенитных углов наблюдения для МСУ-101 и MODIS меняются случайно в диапазоне от 0 до 65° для MODIS и от 0 до 40° для МСУ-101.

В нижнем ряду показана связь между измеренными и пересчитанными по данным MODIS значениями КСЯ в трех спектральных каналах прибора МСУ-101. В идеальном случае точки должны ложиться на биссектрису угла между осями абсцисс и ординат. Из графиков видно, что значения КСЯ по данным МСУ-101 и MODIS лежат вблизи биссектрисы, хотя имеют некоторый разброс, который можно объяснить, в частности, различием углов освещения и наблюдения. СКО измеренных и рассчитанных значений КСЯ для спектральных каналов МСУ-101 не превышает 0,021 (табл. 4). Коэффициент линейной регрессии между значениями КСЯ, определенными по данным МСУ-101 и MODIS, отличается от единицы не более, чем на 3,3%.

Результаты сопоставления данных приборов МСУ-102 и MODIS представлены на рис. 5. Связь зенитных углов Солнца и наблюдения в моменты съемок МСУ-102 и MODIS примерно такая же, как и для МСУ-101. СКО значений КСЯ, полученных по данным съемок МСУ-102 и MODIS, не превышает 0,022 (табл. 5), а отличие коэффициента регрессии между ними от единицы не превышает 4%. Как и в случае МСУ-101, это отклонение находится в пределах точности абсолютной радиометрической калибровки как КМСС (6–7%), так и MODIS (5%).

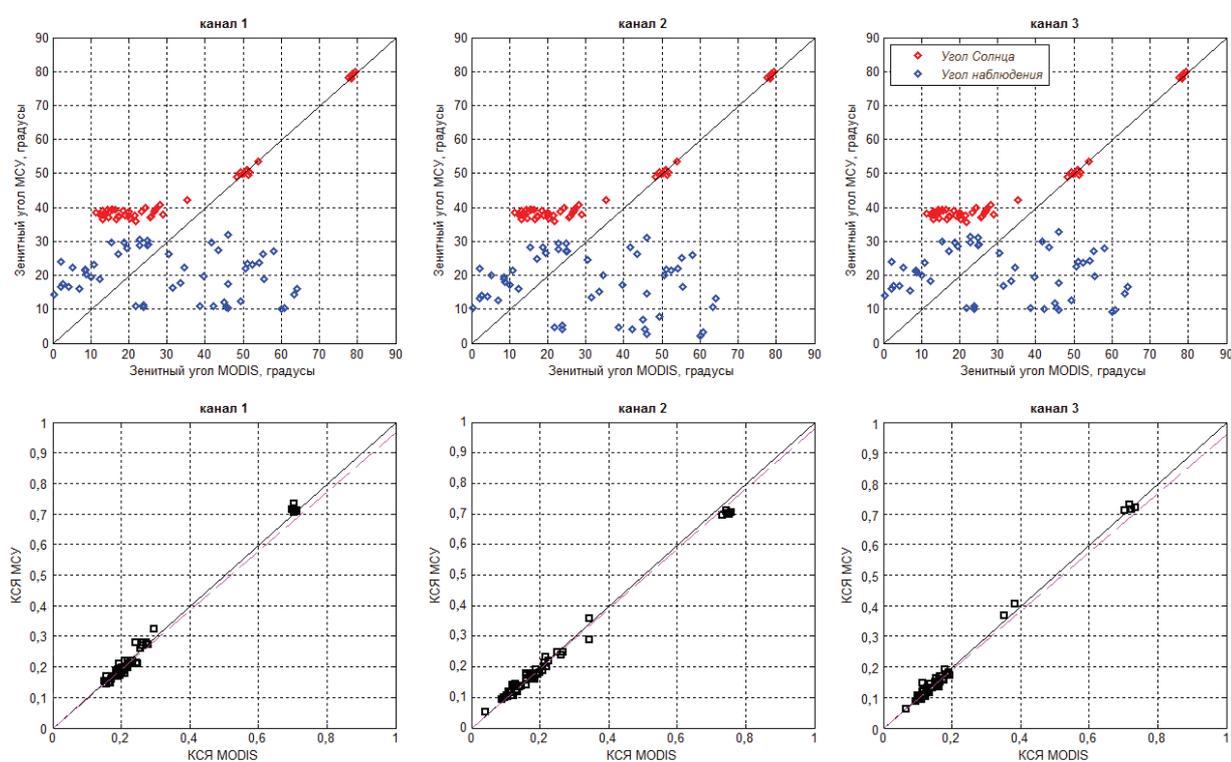


Рис. 5. Связь КСЯ природных объектов по измерениям МСУ-102 и MODIS. Верхний ряд – связь зенитных углов Солнца (показано красным цветом) и зенитных углов наблюдения (показано синим цветом) в спектральных зонах МСУ-102 и MODIS; нижний ряд – связь КСЯ природных объектов в спектральных зонах МСУ-102 и MODIS (пунктирной линией показана линия регрессии)

Таблица 4. Связь КСЯ природных объектов в спектральных каналах МСУ-101 и MODIS

<i>Параметры</i>	<i>Спектральные каналы камеры МСУ-101</i>		
	<i>Канал 1</i>	<i>Канал 2</i>	<i>Канал 3</i>
СКО КСЯ	0,021	0,019	0,018
Уравнение линейной регрессии	$\rho_{МСУ} = 0,983 * \rho_{MODIS}$	$\rho_{МСУ} = 1,033 * \rho_{MODIS}$	$\rho_{МСУ} = 0,995 * \rho_{MODIS}$

Таблица 5. Связь КСЯ природных объектов в спектральных каналах МСУ-102 и MODIS

<i>Параметры</i>	<i>Спектральные каналы камеры МСУ-102</i>		
	<i>Канал 1</i>	<i>Канал 2</i>	<i>Канал 3</i>
СКО КСЯ	0,018	0,022	0,013
Уравнение линейной регрессии	$\rho_{МСУ} = 0,966 * \rho_{MODIS}$	$\rho_{МСУ} = 0,98 * \rho_{MODIS}$	$\rho_{МСУ} = 0,96 * \rho_{MODIS}$

Выводы

Проведенные исследования по сопоставлению коэффициентов спектральной яркости природных объектов, измеренных Комплексом многозональной спутниковой съемки (КМСС) на КА «Метеор-М» №1 и рассчитанных в спектральных зонах КМСС по данным спектрорадиометра MODIS, позволяют заключить, что КСЯ природных объектов по данным КМСС и MODIS хорошо согласуются. Среднеквадратическое отклонение между ними не превышает 0,022, даже принимая во внимание различие между углами наблюдения и Солнца в момент съемок КМСС и MODIS. Коэффициент линейной регрессии между значениями КСЯ, определенными по данным МСУ и MODIS, отличается от единицы не более, чем на 4%, что находится в пределах точности абсолютной радиометрической калибровки как КМСС (6–7%), так и MODIS (5%).

Литература

1. Аванесов Г. А., Полянский И. В., Жуков Б. С., Никитин А. В., Фори А. А. Комплекс многозональной спутниковой съемки на борту КА «Метеор-М» № 1: три года на орбите // Исследование 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 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.
5. 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. Geosci. Remote Sens. 2013. Vol. 51. No. 7. P. 4330–4338.

Comparison of reflectances of natural objects from Meteor-M No.1 Multispectral Satellite Imaging System and Terra MODIS spectroradiometer

T.V. Kondratieva, B.S. Zhukov, I.V. Polyansky, A.A. Forsh

Space Research Institute RAS, Moscow, 117997, Russia

E-mail: tkondratieva@iki.rssi.ru

The multispectral satellite imaging system KMSS is operated on-board Meteor-M No.1 since September 2009. It consists of two MSU-100 cameras with a resolution of 60 m in three channels in the visible and near IR spectral ranges, optimized for monitoring land surfaces, and one MSU-50 camera with a resolution of 120 m in three channels in the visible range, optimized for imaging water surfaces. The KMSS cameras were radiometrically calibrated in-lab. The in-flight cross-calibration of KMSS with Terra MODIS is performed yearly using images of homogeneous snow cover on the high-altitude Antarctic Plateau with account for its scattering law.

Based on this cross-calibration, the KMSS and MODIS top-of-atmosphere reflectances of a wide range of natural objects on the territory of Russia are compared. For this purpose, images of the same areas were selected that were surveyed by KMSS and MODIS with a time interval of not more than 1–2 hours in stable atmospheric conditions. The reflectance recalculation between the KMSS and MODIS spectral bands was performed using the regression relationships that were obtained by reflectance spectra simulation of the surface-atmosphere system. In contrast to cross-calibration over the Antarctic, the difference in the sun and viewing angles at the time of KMSS and MODIS imaging was not accounted in this analysis. In spite of this, the results demonstrate a good correspondence between the reflectances of natural objects derived from data of KMSS and MODIS, with a root-mean-square deviation of no more than 0,022. The linear regression coefficient between the KMSS- and MODIS-based reflectances differs from 1 by no more than 4%, which is within the radiometric calibration accuracy of both KMSS (6-7%) and MODIS (5%).

Keywords: KMSS, multispectral satellite imaging system, Meteor-M No.1, MODIS, reflectance, in-flight radiometric calibration.

References

1. Avanesov G. A., Polyanskii I. V., Zhukov B. S., Nikitin A. V., Forsh A. A. Kompleks mnogozonol'noi sputnikovoi s'emki na bortu KA «Meteor M» № 1: tri goda na orbite (Multispectral Satellite 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., Polyanskii I.V. Nazemnaya kalibrovka kamer KMSS dlya KA «Meteor-M» №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., Polyanskii 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., Polyanskii I.V., Permitina L.I. Poletnaya radiometricheskaya kross-kalibrovka kompleksa mnogozonol'noi sputnikovoi s'emki na KA «Meteor-M» №1 po spektrometriu 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. 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. Geosci. Remote Sens.*, 2013, Vol. 51, No. 7, pp. 4330–4338.