Радиометрическая интеркалибровка коротковолновых каналов многоканального спутникового устройства КА «Метеор-М» № 2 по радиометру AVHRR КА «Метоп-А»

А.А. Филей¹, А.Н. Рублев², А.А. Зайцев³

¹Дальневосточный центр ФГБУ «НИЦ «Планета», Хабаровск, 680000, Россия
E-mail: vmer@dvrspod.ru

²ФГБУ «НИЦ «Планета», Москва, 123242, Россия
E-mail: rublev@planet.iitp.ru

³АО «Российские космические системы», Москва, 111250, Россия
E-mail: contact@spacecorp.ru

В настоящей работе приведены результаты расчетной интеркалибровки значений коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) многоканального спутникового устройства (МСУ-МР) космического аппарата (КА) «Метеор-М» № 2 по прибору AVHRR КА «Метоп-А», измерения которого выбраны в качестве эталонных, поскольку постоянно корректируются и имеют схожие с МСУ-МР спектральные характеристики. Радиометрическая интеркалибровка необходима, чтобы поставить в соответствие КСЯ обоих приборов на верхней границе атмосферы. С этой целью отбирались изображения тестовых полигонов территории пустыни с разницей во времени не более получаса между съёмкой обоих спутников в стабильных атмосферных условиях. Из-за некоторого различия в спектральных характеристиках каналов двух приборов, для повышения точности сопоставления данных были учтены имеющиеся различия относительных спектральных чувствительностей первых трех каналов. Для этого были рассчитаны регрессионные отношения между тремя каналами двух приборов в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне длин волн. Регрессионные отношения получены по результатам моделирования спектров отражения системы «поверхность – атмосфера» для различных углов наблюдения и Солнца. Результатом работы стал расчет коэффициентов линейной регрессии, которые дали хорошее соответствие КСЯ, регистрируемых в первых трех каналах МСУ-МР и AVHRR – величина их среднеквадратичного отклонения не превышает 0,013, а сами коэффициенты отличаются от единицы не более чем на 4%.

Ключевые слова: МСУ-МР, AVHRR, радиометрическая калибровка, коэффициент спектральной яркости, ширина спектральной линии

Одобрена к печати: 19.10.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-251-263

Введение

Эффективность получения с помощью космических аппаратов достоверной информации о состоянии поверхности Земли и атмосферы зависит от точности измерения спектральных отражательных характеристик природных объектов земной поверхности. Для повышения точности измерения необходимо проводить проверку стабильности характеристик съёмочной аппаратуры. Одним из основных способов такой проверки является абсолютная калибровка аппаратуры. Изначально калибровка проводится перед запуском космического аппарата, однако во время запуска или длительного пребывания на орбите могут происходить сбои в настройках аппаратуры или деградация чувствительности фотоприемника, что влияет на точность измерений. Для получения достоверных данных с космического аппарата применяется полетная калибровка аппаратуры по тестовым объектам специально созданных подспутниковых полигонов или интеркалибровка по данным других спутниковых приборов, измерения которых постоянно корректируются. Для калибровки по тестовым подспутниковым полигонам необходимо предусмотреть большое количество факторов, которые будут влиять на качество калибровки: атмосферные условия, газовый состав атмосферы, точность наземных измерений КСЯ подстилающей поверхнос-

ти, которые требуют дорогого оборудования и большого количества времени (Datla et al., 2011). Кроме этого, тестовый полигон должен быть достаточно большим, по крайней мере в несколько раз больше, чем пространственное разрешение прибора, чтобы уменьшить влияние неоднородности подстилающей поверхности соседних пикселей на результирующий сигнал. С учетом вышеперечисленных факторов наиболее простым и популярным способом калибровки спутникового прибора является использование так называемой интеркалибровки двух или нескольких приборов одновременно.

В настоящей работе приводится описание интеркалибровки измерений прибора МСУ-МР КА «Метеор-М» № 2 по измерениям схожего по спектральным характеристикам прибора AVHRR/3 (далее AVHRR) КА «Metop-A», уровень погрешности которого известен и стабилен. Важность задачи состоит в том, что от уровня точности калибровки прибора зависит достоверность получаемых информационных продуктов, например, карт снежного покрова, оптической толщины атмосферы, параметров облачности, характеристик растительного покрова и др. (Асмус и др., 2014).

Представленный в работе метод интеркалибровки основан на перекрёстном сравнении значений КСЯ системы «поверхность – атмосфера» двух приборов в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне длин волн. Целью интеркалибровки является нахождение калибровочных констант для каналов МСУ-МР, которые будут давать наименьшее отклонение значений КСЯ от значений прибора AVHRR.

Сравнительные характеристики МСУ-МР и AVHRR

Прибор МСУ-МР (многоканальное сканирующее устройство малого разрешения), устанавливаемый на КА серии «Метеор-М», по своему назначению и информационным характеристикам подобен прибору AVHRR, устанавливаемому на оперативных метеорологических спутниках серии «NOAA» и «Metop» (Асмус и др., 2014). Прибор предназначен для получения изображений земной поверхности в трех диапазонах видимого (коротковолнового) и трех диапазонах инфракрасного спектров с разрешением 1 км в надире. Прибор МСУ-МР, как и AVHRR, работает в 6 диапазонах длин волн и позволяет получать аналогичный ряд информационных продуктов. Основные характеристики приборов МСУ-МР и AVHRR представлены в *табл. 1*.

Таблица 1. Характеристики МСУ-МР и AVHRR

<i>Характеристика</i>	<i>МСУ-МР</i>	<i>AVHRR</i>
Спектральные диапазоны (мкм)	0,52–0,72	0,58–0,68
	0,7–1,1	0,73–1,0
	1,62–1,82	1,57–1,63
	3,5–4,1	3,55–3,93
	10,5–11,5	10,5–11,5
	11,5–12,5	11,3–12,6
Полоса обзора (км)	2900	2950
Разрешение (км)	1	1,1

На рис. 1 сопоставлены функции спектральной чувствительности первых трех коротковолновых каналов приборов МСУ-МР и AVHRR.

Рис. 1. Функции спектральной чувствительности коротковолновых каналов МСУ-МР и AVHRR

Анализируя рисунок, можно заметить имеющиеся различия значений чувствительности, ширины и положения спектральных линий каналов обоих спутниковых приборов. Для учета этих различий по спектральным характеристикам приборов МСУ-МР и AVHRR был осуществлен, путем моделирования, пересчет КСЯ системы «поверхность – атмосфера» при различных зенитных углах Солнца и наблюдения, и были получены коэффициенты пропорциональности значений КСЯ между тремя парами каналов МСУ-МР и AVHRR. Уравнения линейной регрессии для пересчета КСЯ первых трех каналов имеют вид, представленный в табл. 2. Коэффициенты пропорциональности для каждой пары сравниваемых каналов МСУ-МР и AVHRR, представленных в табл. 2, ставят в соответствие КСЯ наблюдаемого участка земной поверхности, учитывая при этом различия спектральных характеристики обоих приборов.

Таблица 2. Уравнения линейной регрессии для пересчета значений КСЯ первых трех каналов МСУ-МР и AVHRR

Параметры	Спектральные каналы МСУ-МР		
	1	2	3
Уравнение регрессии	$A_{\text{мсу-мр}}=0,9663\times A_{\text{avhrr}}$	$A_{\text{мсу-мр}}=0,9936\times A_{\text{avhrr}}$	$A_{\text{мсу-мр}}=1,0863\times A_{\text{avhrr}}$

Измерения AVHRR и МСУ-МР

Поток солнечного излучения, падающий на верхнюю границу атмосферы и регистрируемый спутниковым прибором, определяется выражением (Cracknell, 1997):

$$F = \frac{F_i}{\pi} = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_0(\lambda) \phi(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где F – поток солнечного излучения, регистрируемый спутниковым прибором, Вт/м²; $F_0(\lambda)$ – поток солнечного излучения, приходящий на верхнюю границу атмосферы, Вт/(м²×нм); $\phi(\lambda)$ – относительная спектральная функция канала прибора; λ – длина волны; λ_1, λ_2 – границы чувствительности спектрального канала; F_i – интегральный поток солнечного излучения, свернутый с относительной спектральной функцией прибора.

Интенсивность солнечного излучения, отраженного от поверхности земли, прошедшего через атмосферу и достигшего сенсора космического аппарата, можно представить следующим выражением (Cracknell, 1997):

$$R_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \phi(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где R_i – интенсивность излучения, регистрируемого спутниковым прибором, Вт/(м²×ср); $S(\lambda)$ – интенсивность излучения, отраженного от сферической поверхности, Вт/(м²×нм×ср).

Используя выражения (1) и (2), КСЯ системы «поверхность – атмосфера» в спектральном диапазоне спутникового прибора на верхней границе атмосферы при зенитном угле Солнца равном нулю, можно представить в следующем виде (Cracknell, 1997):

$$A = \frac{R_i}{F} \cdot 100, \quad (3)$$

где A – коэффициент спектральной яркости, %.

В большинстве случаев для расчета КСЯ вместо интенсивности излучения R_i , регистрируемой спутниковым прибором, используют так называемое спектральное излучение (спектральная яркость), которое определяется выражением (Cracknell, 1997):

$$R_s = \frac{R_i}{w}, \quad (4)$$

где R_s – спектральная яркость, Вт/(м²×ср×нм); w – эквивалентная ширина спектральной функции канала, нм.

Эквивалентная ширина спектральной функции вычисляется по следующей формуле (Cracknell, 1997):

$$w = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda) d\lambda, \quad (5)$$

В реальных условиях для расчета значения КСЯ необходимо учитывать зенитный угол Солнца и среднее расстояние от Земли до Солнца. В таком случае (3) может быть представлено в виде (Cracknell, 1997):

$$A = \frac{w \cdot \pi \cdot R_s \cdot l^2}{F_i \cdot \cos \theta} \cdot 100 = \frac{\pi \cdot R_i \cdot l^2}{F_i \cdot \cos \theta} \cdot 100, \quad (6)$$

где l – среднее расстояние от Земли до Солнца в астрономических единицах; θ – зенитный угол Солнца.

Используя информацию о функциях спектральной чувствительности прибора МСУ-МР, предоставленную АО «Российские космические системы», была определена эквивалентная ширина спектральной функции и интегральный поток солнечного излучения для каждого канала МСУ-МР. Для прибора AVHRR КА «Метоп-А» информация о функциях спектральной чувствительности была получена из (<http://www.star.nesdis.noaa.gov>). Данные о солнечном спектре строятся на стандарте ASTM G-173-03 (<http://rredc.nrel.gov>). В табл. 3 представлена эквивалентная ширина спектральной функции и интегральный поток солнечного излучения для каждого канала приборов AVHRR и МСУ-МР.

Таблица 3. Эквивалентная ширина спектральной функции и интегральный поток солнечного излучения для каждого канала приборов AVHRR и МСУ-МР

Номер канала	AVHRR		МСУ-МР	
	F_i	w	F_i	w
1	139,9	84,90	309,48	189,80
2	232,9	229,29	251,43	242,20
3	14,0	57,18	36,75	183,01

Особенности интеркалибровки

Интеркалибровка двух приборов разных космических аппаратов требует точного согласования в 8-мерном пространстве, включающем время, широту, долготу, высоту, солнечный зенитный угол, угол обзора по азимуту, зенитный угол наблюдения и спектральный диапазон. Значительные погрешности в любой из перечисленных составляющих могут привести к случайным и систематическим ошибкам, что впоследствии приведет к неточностям измерения. В общем, задача состоит не в том, чтобы достичь «идеального» наблюдения во всем 8-мерном пространстве, а в том, чтобы определить, насколько близки должны быть наблюдения, сделанные с обоих приборов, чтобы достичь необходимой заданной точности.

Результаты многих исследований показывают, что при интеркалибровке согласование зенитных углов наблюдений более критично, чем время и пространственное разрешение. По данным (Datla et al., 2011), при угле согласования в пределах 2 градусов ошибка

в измерениях может составить от 0,2% до 0,3%. Случайный шум и ошибки смещения увеличиваются линейно при изменении угла сканирования.

Вопросами интеркалибровки приборов космических аппаратов серии Метеор-М посвящено несколько работ (Жуков и др., 2014; Кондратьева и др., 2015), в которых подробно описывается методика интеркалибровки комплекса многозональной спутниковой съемки (KMCC) относительно радиометра MODIS по однородному снежному покрову с учетом различия углов наблюдения и Солнца в моменты съемок обоих приборов.

В настоящей работе для минимизации ошибок, связанных с углами наблюдения и Солнца, отбирались безоблачные случаи, когда орбиты двух спутников совпадают как по времени пролета, так и по углу наблюдения над заданным регионом исследования. Одним из таких случаев, согласно информации об орбитальных данных КА «Metop-A» и «Метеор-М» №2, представленных в (<https://www.ssec.wisc.edu>), является период 9–11 мая 2016 года, когда оба космических аппарата пересекают экватор с разницей 15 минут, а углы наблюдения приборов AVHRR и MSU-MP лежат в пределах 3 градусов.

Тестовые полигоны

Для выполнения точной интеркалибровки спутниковых приборов необходимы однородные участки земной поверхности с постоянными климатическими условиями (Datla et al., 2011) и высокой отражательной способностью для получения высокого отношения «сигнал/шум». В рамках CEOS (The Committee on Earth Observation Satellites) существует сеть наземных тестовых полигонов для интеркалибровки спутниковых оптических съемочных систем. Эти полигоны состоят из однородных, хорошо отражающих участков земной поверхности без существенного растительного покрова (Жуков и др., 2014).

Тестовые полигоны, используемые в данной работе, представлены на *рис. 2*.

Рис. 2. Географическое положение 6 тестовых полигонов, участвующих в интеркалибровке

Полигоны 1–4 были выбраны из списка тестовых полигонов CEOS, как имеющие более высокую отражательную способность и равномерную структуру земной поверхности в виде небольших песчаных дюн. Полигоны 5, 6 были выбраны автором и, хотя имеют более низкую отражательную способность по сравнению с другими полигонами, но являются наиболее равномерными по структуре. Общий структурный вид тестовых полигонов представлен на *рис. 3*. Отсутствие существенных источников загрязнений делают альbedo песка в указанных районах достаточно стабильным. Вследствие малых наклонов поверхности их влиянием на индикатрису рассеяния песка можно пренебречь (Лихачева и др., 2009). В силу того, что пространственное разрешение спутниковых приборов AVHRR и МСУ-МР составляет 1 км, морфологическая неоднородность пустынных участков в виде дюн нивелируется при пространственном усреднении, и на первый план выходит отражательная способность поверхности.

Рис. 3. Типы различных участков пустыни: (а) Ливия, (б) Алжир, (в) Саудовская Аравия, (г) Туркменистан, (д) Китай, (е) Нигер по данным сервиса Google Maps

Калибровка над пустынными участками может быть использована не только для обеспечения интеркалибровки между двумя датчиками в течение близкого интервала времени, но и с разницей в наблюдении в несколько суток при условии, что погодные условия постоянны.

Методика и результаты калибровки

В качестве примера проведения интеркалибровки рассмотрим в качестве тестового полигона безоблачный участок пустыни (полигон 1 на *рис. 2*) на территории Ливии 10 мая

2016 года, *рис. 4*. Разница по зенитному углу наблюдения приборов AVHRR и МСУ-МР не превышает 1 градуса, а по углу Солнца 4 градусов.

Рис. 4. Тестовый полигон для интеркалибровки

Используя данные *табл. 2*, были пересчитаны КСЯ каналов МСУ-МР, которые затем сопоставлены с данными AVHRR. На *рис. 5* представлены графики зависимости пересчитанных значений КСЯ МСУ-МР и значений AVHRR для первых трех каналов приборов. Зависимости пересчитанных значений КСЯ на *рис. 5* для первых двух каналов показали высокую корреляцию, близкую к единице, однако в третьем канале наблюдается сильное расхождение КСЯ. Для наглядности значения КСЯ каналов обоих приборов по выделенному участку изображения представлены на *рис. 6* в цветовой шкале. Пересчитанные значения КСЯ МСУ-МР в третьем канале меньше AVHRR в 1,55 раза.

Таким образом, при пересчете значения КСЯ МСУ-МР для всех шести тестовых полигонов были получены средние коэффициенты линейной регрессии, которые представлены в *табл. 4*. Данные коэффициенты позволяют получить значения КСЯ, имеющие наименьшую погрешность с измерениями AVHRR.

Таблица 4. Коэффициенты линейной регрессии каналов МСУ-МР для шести тестовых полигонов

<i>№ полигона</i>	<i>k1</i>	<i>k2</i>	<i>k3</i>
1	1,01738	1,01374	1,55509
2	1,02266	1,02471	1,56219
3	1,04246	1,01107	1,61316
4	1,02478	1,00895	1,59669
5	1,00617	1,00612	1,50193
6	1,03271	1,01832	1,54895
Среднее	1,02436	1,01381	1,56300

Рис. 5. Графики зависимости пересчитанных значений КСЯ МСУ-МР и значений AVHRR: а) первый канал; б) второй канал; в) третий канал

Рис. 6. Цветовое представление значений спектральной яркости выделенного участка изображения: а) первый канал AVHRR; в) второй канал AVHRR; д) третий канал AVHRR; б) первый канал МСУ-МР; г) второй канал МСУ-МР; е) третий канал МСУ-МР

Уравнения регрессии, связывающие значения КСЯ спектральных каналов AVHRR и МСУ-МР представлены в табл. 5.

Таблица 5. Связь КСЯ в спектральных каналах AVHRR и МСУ-МР

Параметры	Спектральные каналы МСУ-МР		
	1	2	3
Уравнение регрессии	$R_{avhrr} = 1,02436 \times R_{msu-mr}$	$R_{avhrr} = 1,01381 \times R_{msu-mr}$	$R_{avhrr} = 1,56300 \times R_{msu-mr}$

Использование коэффициентов линейной регрессии для шести полигонов позволило добиться лучшего соответствия КСЯ, регистрируемых AVHRR и МСУ-МР – величина их среднеквадратичного отклонения не превышает 0,013, а сами коэффициенты линейной регрессии отличаются от единицы не более чем на 4%.

На рис. 7 изображены пересчитанные значения КСЯ МСУ-МР для полигона, представленного на рис. 4, без использования коэффициентов линейной регрессии (красный цвет), с использованием (синий цвет), а также измеренные значения КСЯ прибора AVHRR (зеленый цвет). Как видно из рисунка, с использованием коэффициентов линейной регрессии удалось добиться лучшего согласования значений КСЯ по всем трем каналам приборов AVHRR и МСУ-МР.

Рис. 7. Нормализованное распределение количества пикселей по КСЯ:
а) первый канал; в) второй канал; д) третий канал

Сопоставление результатов

Для проверки правильности проведённой интеркалибровки каналов прибора МСУ-МР рассмотрим наглядный пример построения индекса влажности подстилающей поверхности (LSWI). Индекс влажности основан на двух длинах волн 0,86 и 1,6 мкм и рассчитывается по формуле:

$$LSWI = \frac{b2 - b3}{b2 + b3}, \quad (7)$$

где $b2$ – канал на длине волны 0,86 мкм; $b3$ – канал на длине волны 1,6 мкм.

На *рис. 8* изображено цветное представление индекса влажности тестового участка земной поверхности за 10 мая 2016 года до и после калибровки каналов прибора МСУ-МР.

Рис. 8. Цветовое представление значения индекса влажности:
а) AVHRR; б) МСУ-МР до калибровки; в) МСУ-МР после калибровки

После выполнения интеркалибровки значений КСЯ наблюдается визуальное совпадение индексов влажности по данным AVHRR (рис. 8а) и МСУ-МР (рис. 8в). Визуальное сопоставление индексов влажности подтверждает требуемую точность калибровки каналов прибора МСУ-МР.

Заключение

Была проведена интеркалибровка коротковолновых каналов МСУ-МР по данным AVHRR с использованием данных съемок тестовых полигонов территории пустыни. Интеркалибровка проводилась с согласованием зенитных углов освещения и наблюдения над тестовыми полигонами, при этом учитывалось различие спектральных характеристик приборов. Результатом работы стал расчет коэффициентов линейной регрессии, которые позволили пересчитать КСЯ в первых трех каналах МСУ-МР – величина их среднеквадратичного отклонения не превышает 0,013, а сами коэффициенты отличаются от единицы не более чем на 4%.

Литература

1. Асмус В.В., Загребяев Л.А., Макриденко О.Е., Милехин О.Е., Соловьев В.И., Успенский А.Б., Фролов А.В., Хайлов М.Н. Система полярно-орбитальных метеорологических спутников серии «Метеор-М» // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 5–16.
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» No. 1 по спектрометриру 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., Полянский И.В., Фориш А.А. Сопоставление коэффициентов яркости природных объектов по данным КМСС на КА «Метеор-М» No1 и MODIS на КА «Terra» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 215–224.
4. Лихачева М.В., Копелевич О.В., Шеберстов С.В. Коррекция данных спутникового сканера MODIS на солнечный блик без использования дополнительных данных о скорости ветра // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Вып. 6. Т. 1. С. 421–428.
5. Cracknell A.P. The Advanced Very High Resolution Radiometer. London: Taylor and Francis Ltd., 1997. 968 p.
6. Datta R.U., Rice J.P., Lykke K.R., Johnson B.C. Best Practice Guidelines for Pre-Launch Characterization and Calibration of Instruments for Passive Optical Remote Sensing // Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. 2011. Vol. 116. No. 2. P. 621–646.

Radiometric cross-calibration of shortwave channels of Multi-Channel Scanning Unit on board Meteor-M No. 2 relative to spectroradiometer AVHRR on board Metop-A

A.A. Filei¹, A.N. Rublev², A.A. Zaitsev³

¹*Planeta Far-Eastern Center of State Research Center for Space Hydrometeorology
Khabarovsk 680000, Russia
E-mail: vmer@dvrpod.ru*

²*Planeta State Research Center, Moscow 123242, Russia
E-mail: rublev@planet.iitp.ru*

³*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow 111250, Russia
E-mail: contact@spacecorp.ru*

In the work, we presented the results of radiometric cross-calibration of shortwave channels of Multi-Channel Scanning Unit (MSU-MR) on-board Meteor-M No. 2 relative to radiometer AVHRR on-board Metop-A. AVHRR measurements were chosen as a reference, because they are continually updated and have spectroscopic characteristics similar to the MSU-MR ones. A radiometric cross-calibration is needed to match the top of atmosphere reflectances (TOA reflectances) of both satellite instruments at the upper boundary of the atmosphere. For this purpose, desert test polygon areas were selected with constant climatic conditions, the time difference between the overflights of the two satellites was no more than an hour. Spectral characteristics of three short-wave channels of the two satellite instruments have some differences. To take them into account, the regression relationship between the three short-wave channels of the two satellite instruments were calculated in the visible and near-infrared wavelengths. The regression relationships were obtained as a result of reflection spectra simulation of the 'surface – atmosphere' system for a variety of viewing and sun illumination angles. The result is calculation of linear regression coefficients which provided a good agreement of the reflectance measurements in the three MSU-MR and AVHRR shortwave channels. The standard deviation of values of the linear regression coefficients did not exceed 0.013, and the coefficients differ from unity by no more than 4%.

Keywords: MSU-MR, AVHRR, radiometric calibration, TOA reflectance, the equivalent width of a spectral line

Accepted: 19.10.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-251-263

References

1. Asmus V.V., Zagrebaev L.A., Makridenko O.E., Milekhin O.E., Solov'yev V.I., Uspensky A.B., Frolov A.V., Khaylov M.N., Sistema polarno-orbital'nykh meteorologicheskikh sputnikov serii "Meteor-M" (The system of polar-orbiting meteorological satellite Meteor-M series), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2014, No. 12, pp. 5–16.
2. Zhukov B.S., Kondrat'yeva T.V., Polyanskiy I.V., Permitina L.I., Poletnaya radiometricheskaya kross-kalibrovka kompleksa mnogozonal'noy sputnikovoy s"emki na KA "Meteor-M" No. 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.
3. Kondrat'yeva T.V., Zhukov B.S., Polyanskiy I.V., Forsh A.A., Sopotavlenie koeffitsientov yarkosti prirodnykh ob"ektov po dannym KMSS na KA "Meteor-M" No. 1 i MODIS na KA "Terra" (Comparison of reflectances of natural objects from Meteor-M No. 1 Multispectral Satellite Imaging System and Terra MODIS spectroradiometer), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 215–224.
4. Likhacheva M.V., Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Korrektsiya dannykh sputnikovogo skanera MODIS na solnechnyy blik bez ispol'zovaniya dopolnitel'nykh dannykh o skorosti vetra (Sun glint correction of data from satellite scanner MODIS with no ancillary information on wind speed), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, Vol. 1, pp. 421–428.
5. Cracknell A.P., The Advanced Very High Resolution Radiometer, Taylor and Francis Ltd., London, 1997, 968 p.
6. Datla R.U., Rice J.P., Lykke K.R., Johnson B.C., Best Practice Guidelines for Pre-Launch Characterization and Calibration of Instruments for Passive Optical Remote Sensing, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2011, Vol. 116, No. 2, pp. 621–646.