

Кросс-калибровка данных «Фотоспектральной системы» с борта МКС в космическом эксперименте «Ураган»

М. Ю. Беляев¹, Б. И. Беляев², Л. В. Катковский², А. А. Ломако²,
А. О. Мартинов², В. В. Рязанцев, Э. Э. Сармин¹, О. О. Силук²

¹ *Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва
г. Королёв, 141070, Россия
E-mail: post@rsce.ru*

² *Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко Белорусского
государственного университета, Минск, 220045, Республика Беларусь
E-mail: remsens@mail.ru*

В статье описаны результаты валидации данных, полученных после обработки измерений спектров и съёмки изображений научной аппаратурой «Фотоспектральная система» (ФСС) с борта МКС по программе космического эксперимента «Ураган». Валидация проведена путём кросс-калибровки спектров ФСС со спектрами гиперспектрометра Hyperspec, а также спектров и изображений ФСС с изображениями Landsat-7 в каналах видимого и ближнего ИК-диапазонов спектра. Кросс-калибровка спектров ФСС и Hyperspec проведена методом прямого их сопоставления с коррекцией на различную высоту Солнца. Кросс-калибровка изображений выполнена на основе сопоставления измеренных при квазисинхронных съёмках одного и того же участка поверхности Земли эффективных значений спектральной плотности энергетической яркости для каждого из сравниваемых спектральных каналов двух сенсоров. Предварительно проведена радиометрическая коррекция трёхканальных (R, G, B) изображений ФСС с использованием абсолютных значений спектров яркости отражённого излучения, зарегистрированных спектральным модулем ФСС, пространственно «привязанных» к изображениям ФСС. При сопоставлении радиометрически откорректированных значений излучения изображений ФСС и Landsat-7 вводятся поправочные коэффициенты, учитывающие отличающиеся положения и полуширины сравниваемых каналов и различные условия освещения.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, радиометрическая коррекция, гиперспектрометр, спектры, мультиспектральные изображения, кросс-калибровка

Одобрена к печати: 18.09.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-45-55

Введение

Кросс-калибровка является достаточно простым способом контроля качества данных дистанционного зондирования. Для извлечения из спутниковых изображений и спектров достоверной информации о состоянии объектов земной поверхности необходимо проводить периодическую проверку стабильности характеристик спутниковых сенсоров. Полётная калибровка аппаратуры с квазисинхронной наземной съёмкой является сложной как в части организации измерений, так и обработки данных и характеризуется значительной стоимостью. Для осуществления же кросс-калибровки не требуются наземные измерения и зачастую информация о параметрах атмосферы. Кросс-калибровка двух (или более) спутниковых сенсоров заключается в сопоставлении физических величин излучения, измеряемых этими сенсорами, в частности в сравнении абсолютных значений регистрируемых спектральных яркостей уходящего излучения на верхней границе атмосферы (в случае высокой квазисинхронности измерений одного и того же участка двумя аппаратами) либо в сравнении КСЯ (коэффициента спектральной яркости) у поверхности Земли, если для обоих наборов данных проведена атмосферная коррекция.

Необходимыми условиями успешной кросс-калибровки являются: высокая синхронность измерений одного и того же участка поверхности Земли двумя аппаратами; высокая

степень однородности подстилающей поверхности (для минимизации ошибок геопривязки); практически безоблачная атмосфера. Далее необходимо учесть различия относительных спектральных чувствительностей, положений и ширин спектральных каналов сравниваемых съёмочных систем, а также величин и условий освещения сцены.

Фотоспектральная система (ФСС), разработанная в НИИ прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко Белорусского государственного университета по заказу ракетно-космической корпорации «Энергия» имени С. П. Королева и предназначенная для совместной регистрации спектров и изображений земной поверхности с борта Международной космической станции (МКС), работает с 2010 г. на борту МКС по программе космического эксперимента «Ураган» «Экспериментальная отработка наземно-космической системы мониторинга и прогноза развития природных и техногенных катастроф» (Беляев и др., 2014а).

ФСС состоит из двух модулей: модуля регистрации изображения (МРИ) и модуля спектрорадиометра (МС). Измеренные спектрорадиометром спектры представляют собой абсолютные значения спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) в диапазоне длин волн от 350 до 1050 нм с шагом по спектру менее 1 нм и со спектральным разрешением не хуже 3–5 нм. Данные МРИ представляют собой изображения в формате RAW в трёх цветовых каналах Red (R, красный), Green (G, зелёный), Blue (B, синий) без радиометрической коррекции (Беляев и др., 2014б). При съёмке с МКС один кадр цветного изображения МРИ охватывает площадку $\sim 35000 \times 25000$ м с пространственным разрешением около 10 м (проекция пикселя на поверхность Земли), тогда как проекция входной щели спектрорадиометра на поверхность Земли имеет размер порядка 50×6000 м. Для каждого изображения спектрорадиометр регистрирует три спектра с фиксированными временными интервалами между ними.

Кросс-калибровка данных спутниковой съёмки различных сенсоров может быть выполнена, только если проведена их радиометрическая коррекция, т. е. с использованием параметров предполётных калибровок произведён пересчёт измеренных характеристик излучения из оцифрованных целочисленных отсчётов сигнала в абсолютные единицы одной и той же физической величины, как правило в СПЭЯ. В работах (Катковский, Силук, 2015; Силук, Катковский, 2016; Siliuk, Katkovsky, 2016) предложена простая методика сравнения измерений различных сенсоров, основанная на введении поправочных коэффициентов, учитывающих различие параметров сенсоров и условий измерений. Эта методика хорошо подходит для кросс-калибровки мультиспектральных спутниковых сенсоров, т. е. систем изображения с небольшим числом спектральных каналов. При пересчёте относительных значений пикселей регистрируемого изображения МРИ ФСС в целочисленных отсчётах АЦП (аналогоцифровое преобразование) в физические величины СПЭЯ на верхней границе атмосферы появляется возможность сравнивать изображения ФСС с изображениями других спутниковых съёмочных систем, которые можно считать вполне достоверными ввиду их регулярных калибровок.

Поскольку в процессе эксплуатации ФСС калибровка МРИ осуществляется по спектрам МС ФСС, в следующем разделе вначале рассматривается кросс-калибровка МС (спектров) с двумя разными данными (сенсорами): со спектрами гиперспектрометра Hyperion и с изображениями Landsat-7, а затем — кросс-калибровка изображений МРИ ФСС с изображениями Landsat-7.

Кросс-калибровка спектров ФСС и спектров гиперспектрометра Hyperion

До последнего времени наиболее известным гиперспектральным сенсором спутникового базирования был Hyperion, являющийся полезной нагрузкой спутника Earth Observing-1 (EO-1). EO-1 был выведен на орбиту 21 ноября 2000 г., миссия успешно длилась в последующие годы, и эксплуатация космического аппарата завершилась лишь в марте 2017 г. Однако вся информация, полученная Hyperion, предоставляется пользователю до сих пор в открытом доступе на портале <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

При кросс-калибровке спектров спектро радиометра ФСС высокого спектрального разрешения и данных гиперспектрального спутникового сенсора, выраженных в абсолютных единицах СПЭЯ (например, в Вт/(м²·нм·ср)), можно пренебречь различиями относительных спектральных чувствительностей и ширин спектральных каналов, если гиперспектральный сенсор имеет достаточно большое число узких каналов, поскольку при относительно гладких регистрируемых спектрах (вне полос поглощения атмосферных газов) эффективные СПЭЯ в канале гиперспектрметра шириной порядка 10 нм будут близки к соответствующим СПЭЯ в канале спектро радиометра с разрешением 3–5 нм (ФСС) для центральной длины волны канала гиперспектрметра.

Таким образом, при сопоставлении спектров яркости двух рассматриваемых аппаратов на верхней границе атмосферы необходимо учесть лишь различие освещённости (из-за разницы во времени съёмки), которое в нашей методике считается пропорциональным косинусу зенитного угла Солнца θ и учитывается корректирующим коэффициентом k_θ , определяемым формулой:

$$k_\theta = \frac{E_{sat1}}{E_{sat2}} = \frac{\cos\theta_{sat1}}{\cos\theta_{sat2}}, \quad (1)$$

где E_{sat} и θ_{sat} — освещённость поверхности и зенитный угол Солнца для соответствующего сенсора.

Для проведения кросс-калибровки были найдены данные Нурегіон и ФСС по пустыне (рис. 1) с как можно меньшим временным интервалом между съёмками, так как в данной методике не учитывается возможное изменение состояния атмосферы между съёмками двумя аппаратами. Данные ФСС были получены 21.06.2011 в 16:45:50, данные Нурегіон — 25.06.2011 в 09:30. Как видно на рис. 1, сцены ФСС и Нурегіон не перекрываются, однако на них зафиксирована одна и та же пустыня на юго-западе Туниса, и можно предположить, что КСЯ песка не сильно изменяются по ней.



Рис. 1. Положение на карте изображения Нурегіон (красный прямоугольник) и МКС (красная метка) (слева); изображение ФСС, которому соответствует исследуемый спектр (справа)

Со спектрами СПЭЯ, зарегистрированными ФСС, сравнивались спектры, усреднённые по группе пикселей, покрывающих однородную поверхность на изображении Нурегіон. Результат сравнения спектров представлен на рис. 2.

По рис. 2 можно сделать вывод, что в целом имеется хорошее совпадение спектров обоих сенсоров, так как данные ФСС соотносятся по уровню с данными, зарегистрированными аппаратом Нурегіон.

Заметим, что здесь наблюдается значительное различие спектров в сине-зелёной (коротковолновой) части спектра. Поскольку разница во времени съёмки Нурегіон и ФСС составляет 4 сут, а территории съёмок достаточно удалены друг от друга, то наблюдаемое различие

спектров в коротковолновой области объясняется, наиболее вероятно, либо изменившимися атмосферными условиями между съёмками двумя аппаратами, либо различными спектрами песка в несовпадающих местах съёмки.

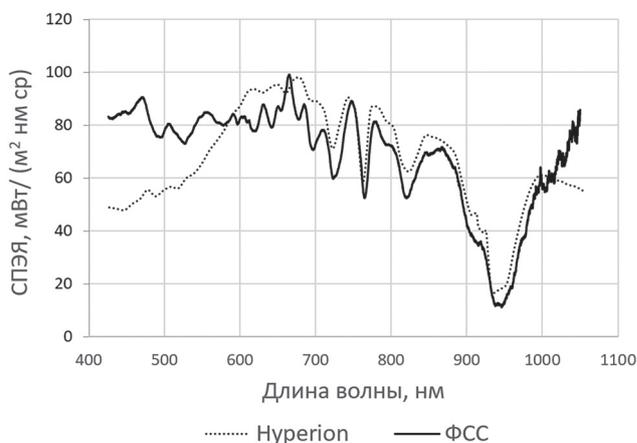


Рис. 2. Спектры песка, зарегистрированные Hyperion и ФСС

Кросс-калибровка спектров ФСС и изображений Landsat-7

Кросс-калибровку спектров ФСС (характеристик МС ФСС) можно осуществить также по изображениям мультиспектрального спутникового сенсора, имеющего достаточно широкие спектральные каналы. Хотя именно из-за значительной ширины каналов вряд ли эта калибровка будет точнее в сравнении с гиперспектральным сенсором, она может рассматриваться в качестве дополнительного независимого источника сравнения.

Для проведения кросс-калибровки было найдено несколько наборов данных спутникового сенсора Landsat-7, покрывающих ту же территорию, что и данные ФСС. Были выбраны изображения, содержащие однородные участки песчаной поверхности с безоблачной атмосферой (рис. 3).



Рис. 3. Наборы данных ФСС и Landsat-7 для кросс-калибровки

На рис. 3 иллюстрируются картографические положения найденных наборов данных ФСС и Landsat-7, положения ФСС (МКС) отображены жёлтыми метками, границы изображений Landsat-7 показаны зелёным и красным квадратами. Зелёный квадрат на рис. 3 — это пустыня на территории Алжира, данные ФСС зарегистрированы 21.06.2011 в 16:45:27 с углом

возвышения Солнца $21,59^\circ$, а данные Landsat-7 — 19.06.2011 в 09:55:31, угол возвышения Солнца — $67,23^\circ$. Красный квадрат на *рис. 3* — это пустыня на территории Туниса, данные ФСС зарегистрированы 21.08.2011 в 16:00:52 с углом возвышения Солнца $23,1^\circ$, а данные Landsat-7 — 24.08.2011 в 09:42:58, угол возвышения Солнца — $59,0^\circ$. Заметим, что территории съёмки ФСС и Landsat-7 находятся гораздо ближе друг к другу, чем в случае ФСС и Hyperion.

Для кросс-калибровки спектра ФСС по изображениям Landsat-7 необходимо преобразовать спектр высокого разрешения ФСС в эффективные СПЭЯ в значениях длин волн, соответствующих каналам Landsat-7. Желательна также по возможности более точная пространственная привязка области спектрометрирования МС ФСС (поля зрения) к пикселям изображения Landsat-7. По области спектрометрирования следует провести усреднение соответствующих значений пикселей изображения в каналах Landsat-7. В рабочем спектральном диапазоне МС ФСС 350–1050 нм имеется порядка 3000 спектральных каналов (пикселей, определяющих шаг оцифровки спектра). Сенсор изображения Landsat-7 в этом диапазоне имеет четыре спектральных канала (*табл. 1*). Таким образом, для кросс-калибровки данных необходимо пересчитать спектр ФСС с высоким спектральным разрешением в спектр из четырёх точек, соответствующих указанным каналам сенсора Landsat-7. Процедура пересчёта осуществляется по формуле:

$$B_{i,\text{ФСС}} = \frac{\int_0^\infty S_i^{\text{L7}}(\lambda) B(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty S_i^{\text{L7}}(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

где S_i^{L7} — функция спектральной чувствительности i -го канала сенсора Landsat-7; $B(\lambda)$ — измеренный МС ФСС спектр подстилающей поверхности.

Таблица 1. Характеристики систем изображений Landsat-7 и ФСС (МКС)

	Landsat-7	ФСС (МКС)
<i>Параметры орбиты</i>		
Высота орбиты, км	705	~400
Наклонение орбиты, град	98,2	51,63
Период обращения, мин	98,9	92,8
<i>Характеристики мультиспектральных съёмочных систем</i>		
Спектральные диапазоны каналов изображений, мкм	Blue: 0,45–0,52 Green: 0,52–0,60 Red: 0,63–0,69 NIR: 0,77–0,90	Blue: 0,40–0,52 Green: 0,46–0,64 Red: 0,56–0,72
Разрешение на местности, м	30	~10

Функции спектральных чувствительностей, используемых при кросс-калибровке каналов Landsat-7, и чувствительности МРИ ФСС иллюстрируются на *рис. 4*. Также в данном случае необходимо учесть различия освещённости вводом поправочного коэффициента k_θ , рассчитываемого по формуле (1).

Погрешности кросс-калибровки по данной методике для четырёх каналов аппарата Landsat-7, рассчитываемые по формуле:

$$\Delta = \left| 1 - \frac{B_{i,\text{ФСС}}}{B_{i,\text{L7}}} \right| \cdot 100\%, \quad (3)$$

приведены в *табл. 2* ($B_{i,\text{L7}}$ — значение эффективной СПЭЯ в i -м канале Landsat-7).

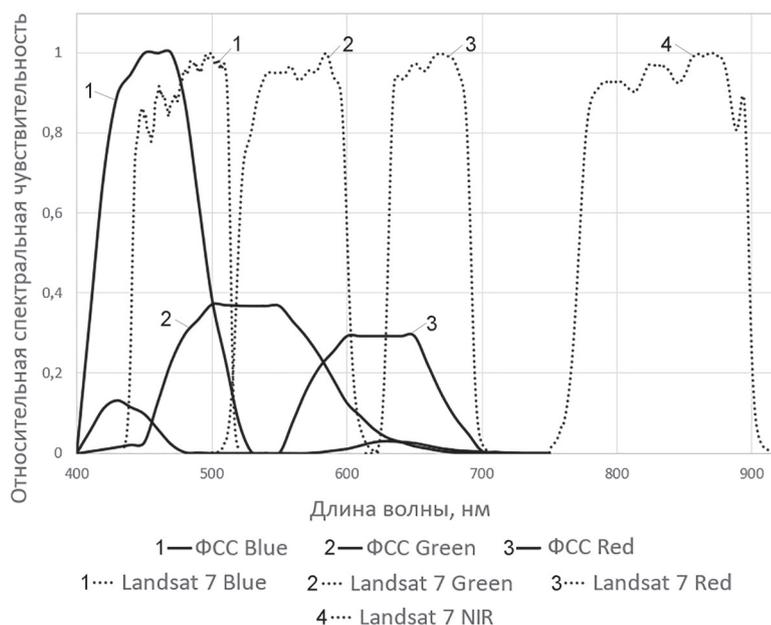


Рис. 4. Относительные спектральные чувствительности каналов Landsat-7 (Blue, Green, Red, NIR) и каналов RGB МРИ ФСС

Таблица 2. Результаты кросс-калибровки спектров ФСС и изображений Landsat-7

Место, дата и время (UTC) съёмки	Δ, %			
	Blue	Green	Red	NIR
Пустыня, территория Алжира ФСС: 21.06.2011, 16:45:27 Landsat-7: 19.06.2011, 09:55:31	30,01	14,53	5,83	2,34
Пустыня, территория Туниса ФСС: 21.08.2011, 16:00:52 Landsat-7: 24.08.2011, 09:42:58	11,5	6,6	12,9	16,5

Таким образом, при сравнении эффективных значений СПЭЯ в четырёх каналах Landsat-7 с соответствующими СПЭЯ, определёнными интегрированием спектров МС ФСС по каждому из этих каналов, полученные относительные погрешности не превышают 20 % (за исключением синего канала для одного из объектов). При регулярном проведении кросс-калибровка ФСС по данным надёжного спутникового аппарата является оптимальным способом быстрой проверки стабильности и отслеживания изменений в характеристиках съёмочной аппаратуры ФСС.

Кросс-калибровка изображений ФСС и Landsat-7

Модуль регистрации изображений ФСС не проходил предполётную радиометрическую калибровку. В работе (Шукайло, Катковский, 2016) представлена методика радиометрической калибровки RGB-изображений ФСС по сопутствующим им спектрам, зарегистрированным спектрорадиометром ФСС. Используя абсолютные значения СПЭЯ спектров, можно определить эффективные абсолютные значения СПЭЯ для каждого канала R, G, B изображений ФСС. Указанная методика включает уточнение положения области спектрометрирования МС на изображении на основе максимума корреляции измеренных величин излучения спектрорадиометром и камерой. Очевидно также, что средняя яркость пикселей изображения каждого канала R, G, B МРИ по всем пространственным пикселям в пределах поля зрения

МС (проекция входной щели на Землю) и интегральная яркость спектров МС по длинам волн (в пределах каждого из каналов МРИ) равны между собой, поскольку относятся к одному и тому же участку подстилающей поверхности и спектральному интервалу. С учётом неоднородной угловой чувствительности МС и спектральных чувствительностей МРИ в каналах цветности получаем следующее равенство:

$$\frac{1}{N} \sum_{i,j=1}^N B_{\text{АЦП}}^{\text{R,G,B}}(i,j) \cdot f_i = S^{\text{R,G,B}} \left[\frac{\sum_{\lambda_k \in \text{R,G,B}} B_{\text{МС}}(\lambda_k) \cdot S_{\text{отн}}^{\text{R,G,B}}(\lambda_k)}{\sum_{\lambda_k \in \text{R,G,B}} S_{\text{отн}}^{\text{R,G,B}}(\lambda_k)} \right], \quad (4)$$

где $B_{\text{АЦП}}^{\text{R,G,B}}(i,j)$ — измеренные МРИ значения яркости изображения в безразмерных относительных единицах (некалиброванные, в отсчётах АЦП) для пикселя (i,j) ; $B_{\text{МС}}(\lambda_k)$ — измеренные МС калиброванные значения СПЭЯ для длины волны λ_k (в k -м канале МС); f_i — нормированный весовой коэффициент i -го пикселя в спектрометрируемом участке, учитывающий функцию угловой чувствительности МС в зависимости от положения этого пикселя относительно центра участка (вдоль щели по координате i , поперёк щели по координате j чувствительность равномерна); N — количество пикселей изображения в пределах щели спектрометра; $S_{\text{отн}}^{\text{R,G,B}}(\lambda_k)$ — известные относительные спектральные чувствительности соответствующих каналов МРИ (паспортные данные фотоприёмника, см. *рис. 4*); $S^{\text{R,G,B}}$ — неизвестные абсолютные интегральные чувствительности каналов, которые подлежат определению. Поскольку относительные спектральные чувствительности $S_{\text{отн}}^{\text{R,G,B}}$ каналов R, G, B МРИ изначально не нормированы на единицу (в интегральном смысле), правая часть выражения (4) поделена на нормирующую сумму. В такой форме записи уравнения (4) величины $S^{\text{R,G,B}}$ включают в себя время экспозиции МРИ при съёмке изображения и возможную различную предустановку коэффициента усиления камеры (чувствительности по ISO), которые устанавливаются автоматически, поэтому нахождение констант $S^{\text{R,G,B}}$ из выражения (4) следует выполнять для каждой серии измерений.

Рассчитанные константы $S^{\text{R,G,B}}$ являются коэффициентами радиометрической калибровки для пересчёта «сырых» значений АЦП пикселей RGB-изображения в единицы эффективных спектральных СПЭЯ в каналах цветности.

Далее для откалиброванных таким способом изображений МРИ ФСС (по спектрам МС) проведено сравнение (кросс-калибровка) с изображениями Landsat-7. При этом используются те же снимки Landsat-7, которые использовались выше для кросс-калибровки спектров МС с Landsat-7 (см. *рис. 3*).

На *рис. 5* приведены изображение ФСС и участок изображения Landsat-7, соответствующие зелёному квадрату на *рис. 3*, а на *рис. 6* (см. с. 52) — изображение ФСС и участок изображения Landsat-7, соответствующие красному квадрату на *рис. 3*.

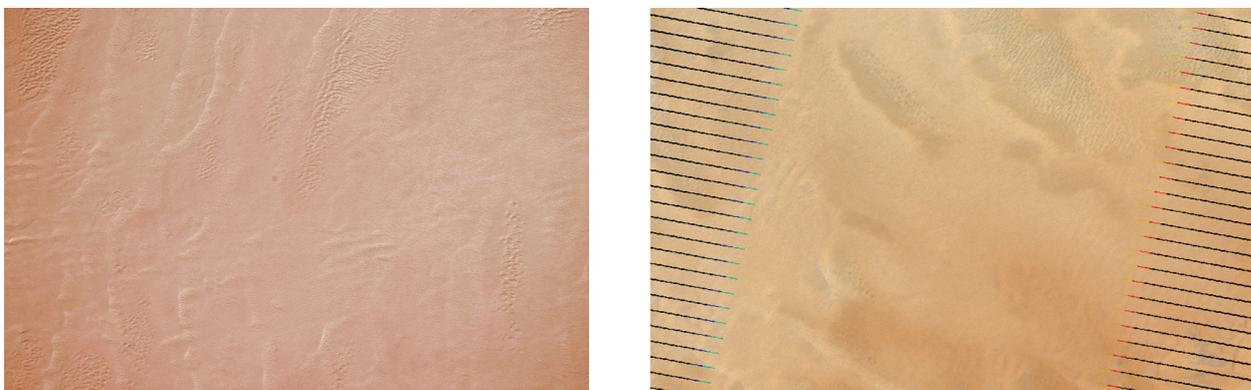


Рис. 5. Снимок МРИ ФСС (слева) и участок изображения Landsat-7 (справа) пустыни, территория Алжира

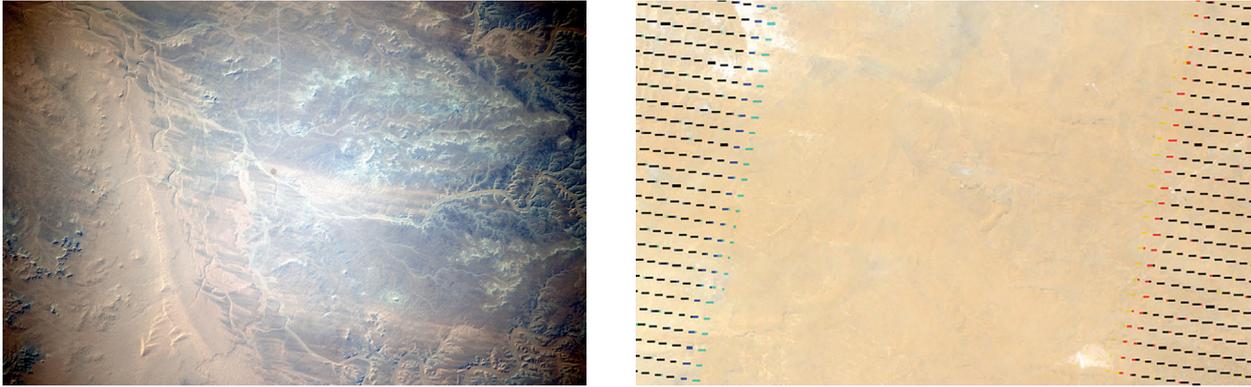


Рис. 6. Снимок МРИ ФСС (слева) и участок изображения Landsat-7 (справа) пустыни, территория Туниса

Для корректного сопоставления изображений двух съёмочных систем необходимо учесть имеющиеся различия относительных спектральных чувствительностей, положений и ширины спектральных каналов сравниваемых сенсоров. Эти различия иллюстрируются в табл. 1, а также на рис. 4, где представлены относительные спектральные чувствительности четырёх каналов Landsat-7, находящихся в рабочем диапазоне МС ФСС, и каналов МРИ ФСС. При кросс-калибровке изображений двух съёмочных систем использовались только первые три канала Landsat-7, которые наиболее близко соответствуют каналам R, G, B МРИ ФСС.

Поскольку спектр восходящего излучения поверхности при квазисинхронных измерениях неизвестен, то для учёта возникающих по указанным причинам (чувствительности, полуширины каналов и спектр излучения) различий рассчитывался отклик (эффективное значение СПЭЯ) в каждом из сравниваемых каналов съёмочных систем на один и тот же спектр рассматриваемой подстилающей поверхности на верхней границе атмосферы по формуле:

$$B = \frac{\int_0^{\infty} S(\lambda)B(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} S(\lambda) d\lambda}, \quad (5)$$

где $S(\lambda)$ — функция относительной спектральной чувствительности канала съёмочной системы изображений (МРИ $\{S_i^{\text{МРИ}}\}$ либо Landsat-7 $\{S_i^{\text{L7}}\}$), причём в качестве спектра $B(\lambda)$ используется спектр уходящего излучения на верхней границе атмосферы, зарегистрированный МС ФСС для данного изображения (оно достаточно пространственно однородно). Отношение рассчитанных откликов для пары сравниваемых каналов определяет второй поправочный коэффициент k_s , зависящий от чувствительностей каналов и используемый в качестве корректирующего множителя при сопоставлении эффективных СПЭЯ поверхностей, снятых двумя спутниковыми сенсорами:

$$k_s = \frac{B_{\text{L7}}}{B_{\text{МРИ}}},$$

где B_{L7} , $B_{\text{МРИ}}$ вычисляются по формуле (5) для S_i^{L7} и $S_i^{\text{МРИ}}$ соответственно. Учёт различных условий освещения при съёмке одной и той же подстилающей поверхности разными сенсорами производится, как и прежде, с использованием корректирующего множителя k_0 (формула (1)).

Для сопоставления измерений и анализа выбираются общие участки с однородной подстилающей поверхностью в пределах перекрывающихся пространственных зон съёмки обоими аппаратами. С учётом различных пространственных разрешений и ориентации снимков

проводилось усреднение измеренных каждой системой значений СПЭЯ по приблизительно совпадающим пространственным областям (различным группам пикселей каждого изображения). К полученным значениям СПЭЯ применялись рассчитанные выше поправочные коэффициенты k_0 , k_S и находились искомые отношения измеряемых эффективных СПЭЯ изображений МРИ ФСС и Landsat-7.

Результаты кросс-калибровки по двум различным объектам для трёх сравниваемых каналов приведены в *табл. 3* для относительной погрешности (в процентах), вычисляемой по формуле (3).

Таблица 3. Результаты кросс-калибровки изображений ФСС и Landsat-7

Место, дата и время (UTC) съёмки	Δ, %		
	Blue	Green	Red
Пустыня, территория Алжира ФСС: 21.06.2011, 16:45:27 Landsat-7: 19.06.2011, 09:55:31	29,29	14,9	6,3
Пустыня, территория Туниса ФСС: 21.08.2011, 16:00:52 Landsat-7: 24.08.2011, 09:42:58	11,3	7,4	13,3

Принимая во внимание погрешности предполётных лабораторных калибровок, неучтённые различия условий съёмки (наибольшее влияние могут оказывать изменившиеся параметры атмосферы: содержание аэрозоля, водяного пара, температура и давление), разную высоту орбиты, разные азимутальный и зенитный углы съёмки (учтено частично), значительно более широкие каналы МРИ ФСС в сравнении с Landsat-7 (с плавно спадающими чувствительностями, см. *рис. 4*), другие неучтённые параметры при пересчёте значений пикселей изображений ФСС в СПЭЯ, можно утверждать, что полученные различия в измеряемых СПЭЯ в пределах не более 15 % (кроме одного случая) могут быть объяснимы указанными причинами. Однако для более надёжных выводов необходимо провести кросс-калибровку для большего числа снимков, полученных ФСС, что требует новых данных ФСС с необходимой их географической привязкой.

Сравнение *табл. 2* и *3* показывает очень высокую попарную корреляцию (близость значений) погрешностей в одних и тех же каналах по одним и тем же объектам при кросс-калибровке спектров ФСС с изображениями Landsat-7, с одной стороны, и изображений ФСС и Landsat-7 — с другой. Например, для пустыни Алжира погрешности составляют: 29,3 и 30,0 % — для канала Blue; 14,9 и 14,5 % — для канала Green; 6,3 и 5,8 % — для канала Red. Аналогичный результат имеет место для пустыни Туниса.

Этот факт говорит о том, что абсолютная радиометрическая калибровка изображений ФСС по его спектрам выполнена корректно. Поскольку сравнение проинтегрированных в соответствии с формулой (2) спектров ФСС с изображениями Landsat-7 можно считать более точной процедурой, чем сравнение СПЭЯ в достаточно различающихся широких каналах (изображений), то наблюдаемые в *табл. 3* погрешности, выходящие за границы объяснимых (в канале Blue), следует относить либо к действительно изменившейся чувствительности приёмника МС ФСС в синей области спектра, либо к изменившейся атмосфере (измерения в разные дни), например по содержанию аэрозоля, что в первую очередь наиболее сильно повлияет на синюю область спектра. Последнее объяснение более правдоподобно, поскольку для пустыни Туниса мы наблюдаем хорошее совпадение и в синем канале. Для более точных выводов необходимы более близкие по времени измерения.

Заключение

Для проведения кросс-калибровок фотоспектральной системы (ФСС), работающей на борту МКС, с другими сенсорами выбраны наиболее стабильные по отражательным характеристикам и достаточно пространственно однородные песчаные поверхности пустынь в Африке. Проведены кросс-калибровки спектров высокого разрешения ФСС со спектрами гиперспектрометра Hyperspec, спектров ФСС, проинтегрированных по четырём широким каналам Landsat-7, с изображениями в указанных четырёх каналах Landsat-7, а также трёхканальных (R, G, B) изображений ФСС по трём близким к ним по положению каналам изображений Landsat-7.

Во всех случаях кросс-калибровки (за исключением одного объекта в синем канале) относительные погрешности сравнения находятся в пределах 2–17 %, величина которых вполне объяснима погрешностями предполётных радиометрических калибровок обоих сенсоров (порядка 5 %), а также рядом неучтённых факторов, таких как: различное состояние атмосферы (из-за значительной разновременности съёмки), пространственное несовпадение объектов сравнения, разная высота орбиты, разные азимутальный и зенитный углы съёмки, различные спектральные ширины каналов и ряд других факторов.

Наблюдаемое для одного спектра ФСС (и соответствующего ему изображения) расхождение около 30 % с данными Landsat-7 и Hyperspec в коротковолновой части спектра (канал Blue Landsat-7) можно объяснить как большой разницей во времени съёмки (изменившимся состоянием атмосферы), так и различием спектрометрируемых поверхностей (объекты съёмки находятся на значительном расстоянии друг от друга), но не изменением чувствительности МС ФСС в этой области, поскольку в другом случае (пустыня в Тунисе) совпадение ФСС с каналом Blue Landsat-7 достаточно хорошее — 11 % (в пределах оцениваемой суммарной погрешности).

В целом, учитывая несинхронность измерений и различия орбитальных параметров съёмки, погрешности калибровок ФСС с другими сенсорами можно считать приемлемыми.

Для более точных выводов необходимы измерения с более высокой временной синхронностью и пространственным совпадением областей измерений. При регулярном проведении кросс-калибровка ФСС по данным других спутниковых систем является малозатратным способом быстрой проверки стабильности и отслеживания изменений в характеристиках съёмочной аппаратуры ФСС.

Литература

1. Беляев Б. И., Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Катковский Л. В., Крот Ю. А., Сармин Э. Э. (2014а) Результаты испытаний фотоспектральной системы на МКС // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 6. С. 27–39.
2. Беляев Б. И., Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Катковский Л. В., Сармин Э. Э. (2014б) Обработка спектров и изображений с фотоспектральной системы в космическом эксперименте «Ураган» на МКС // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 6. С. 54–65.
3. Катковский Л. В., Силюк О. О. Кросс-калибровка съёмочных систем Белорусского космического аппарата и Landsat 8 // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы 3-й Международной научно-практической конф. Минск, 28–29 апр. 2015. 2015. С. 62–64.
4. Силюк О. О., Катковский Л. В. Методика и результаты кросс-калибровки изображений Белорусского космического аппарата и других съёмочных систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 261–270.
5. Шукайло В. Г., Катковский Л. В. Уточнение пространственной привязки и предварительной обработки спектров и изображений, регистрируемых фотоспектральной системой с борта Международной космической станции // Вестн. Белорусского гос. ун-та. 2016. № 1. С. 41–48.
6. Siliuk V., Katkovsky L. Inter-calibration of Belarusian Satellite with other imagers // Global Space-based Inter-Calibration System Quarterly: Newsletter Fall Issue. 2016. V. 10. No. 3. P. 6–8. DOI: 10.7289/V5PC30DM.

Cross-calibration of Photospectral System data measured from the ISS in the Uragan space experiment

M. Yu. Belyaev¹, B. I. Belyaev², L. V. Katkovsky², A. A. Lomako², A. O. Martinov²,
V. V. Riazantsev¹, E. E. Sarmin¹, O. O. Siliuk²

¹ *S. P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia, Korolev 141070, Russia*
E-mail: post@rsce.ru

² *A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belorussian State University*
Minsk 220045, Republic of Belarus
E-mail: remsens@mail.ru

The paper describes the results of processing of data (images and spectra) registered by the Photospectral system (PhSS) from the International space station during the Uragan space experiment. Validation was performed by cross-calibration of PhSS spectra with Hyperion spectra, as well as PhSS data with Landsat 7 data in the visible and NIR spectral bands. The cross-calibration of the PhSS and Hyperion spectra was carried out by direct comparison with a correction of different Sun elevation angles. Cross-calibration of PhSS and Landsat 7 images was carried by comparison of radiances of the same Earth surface measured quasi-synchronously by two sensors in three spectral bands. Radiometric correction of three-band (R, G, B) images of the PhSS was carried out previously using the radiance spectra of PhSS related to these images. When comparing radiometrically corrected radiance values of images of the PhSS and Landsat 7, correction factors are used that take into account the differences in full width at half maximum of the compared channels and lighting conditions.

Keywords: remote sensing, radiometric correction, hyperspectral instrument, spectra, multispectral images, cross-calibration

Accepted: 18.09.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-45-55

References

1. Belyaev B. I., Belyaev M. Yu., Desinov L. V., Katkovskii L. V., Krot Yu. A., Sarmin E. E. (2014a), Rezul'taty ispytaniy fotospektral'noi sistemy na MKS (Photospectral system test results on ISS), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 6, pp. 27–39.
2. Belyaev B. I., Belyaev M. Yu., Desinov L. V., Katkovskii L. V., Sarmin E. E. (2014b), Obrabotka spektrov i izobrazhenii s fotospektral'noi sistemy v kosmicheskom eksperimente "Uragan" na MKS (Spectra and images processing from Photospectral system in space experiment "Hurricane" on the ISS), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 6, pp. 54–65.
3. Katkovskii L. V., Silyuk O. O., Kross-kalibrovka s'emochnykh sistem Belorusskogo kosmicheskogo apparata i Landsat 8 (Cross-calibration of the Belarusian satellite and Landsat 8), *Prikladnye problemy optiki, informatiki, radiofiziki i fiziki kondensirovannogo sostoyaniya* (Applied Problems of Optics, Informatics, Radiophysics And Condensed Matter Physics), Proc. 3rd Intern. Scientific-Practical Conf., Minsk, 28–29 Apr. 2015, 2015, pp. 62–64.
4. Silyuk O. O., Katkovskii L. V., Metodika i rezul'taty kross-kalibrovki izobrazhenii Belorusskogo kosmicheskogo apparata i drugikh s'emochnykh sistem (Methods and results of image cross-calibration of the Belarusian satellite and other sensors), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 261–270.
5. Shukaiilo V. G., Katkovskii L. V., Utochnenie prostranstvennoi privyazki i predvaritel'noi obrabotki spektrov i izobrazhenii, registriruemyykh fotospektral'noi sistemoi s borta Mezhdunarodnoi kosmicheskoi stantsii (Refinement of the spatial reference and preprocessing of spectra and images registered by the photospectral system from the International Space Station), *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, No. 1, pp. 41–48.
6. Siliuk V., Katkovsky L., Inter-calibration of Belarusian Satellite with other imagers, *Global Space-based Inter-Calibration System Quarterly: Newsletter Fall Issue*, 2016, Vol. 10, No. 3, pp. 6–8.