

Атмосферная коррекция данных, регистрируемых с борта МКС. Часть II. Методика для изображений и результаты применения

М. Ю. Беляев¹, Б. И. Беляев², Д. А. Иванов², Л. В. Катковский²,
А. О. Мартинов², В. В. Рязанцев¹, Э. Э. Сармин¹, О. О. Силюк², В. Г. Шукайло²

¹ *Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва
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 части I статьи изложена методика атмосферной коррекции для спектров в видимой и ближней ИК-области спектра, получаемых фотоспектральной (ФСС) и видеоспектральной (ВСС) системами с борта Международной космической станции (МКС) в рамках космического эксперимента «Ураган».

В настоящей части II статьи представлены результаты тестирования методики атмосферной коррекции с использованием расчётных спектров уходящего излучения на верхней границе атмосферы на основе известного программного пакета LibRadTran и содержащихся в нём близких к реальным стратифицированным моделям газовой и аэрозольной атмосферы. Выполнена атмосферная коррекция спектров ФСС. Описана методика атмосферной коррекции трёхканальных (R , G , B) изображений ФСС (нахождение средних альбедо поверхности в каждом канале изображения), основанная на предварительной процедуре радиометрической коррекции изображений по измеренным спектрам ФСС. С этой целью вначале проводится уточнённое совмещение полей зрения модуля спектрального ФСС и модуля регистрации изображений ФСС корреляционным способом. После этого в рамках процедуры атмосферной коррекции для изображений выполняются аналитические расчёты различных радиационных составляющих в уравнении для спектральной плотности энергетической яркости с использованием атмосферных параметров, полученных решением обратной задачи для спектров ФСС (ВСС).

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, спектры, спектрозональные изображения, атмосферная коррекция, альбедо поверхности

Одобрена к печати: 06.10.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-223-234

Введение

Для совместного использования (обработки) спектров и изображений съёмочных систем ФСС и ВСС необходима их взаимная привязка как по пространству, так и по параметрам измеряемого излучения. Специфика данных ФСС и ВСС состоит в том, что спектры относятся к протяжённым (как правило, неоднородным) областям поверхности, содержащим большое число пикселей связанного с ними изображения. И если у ВСС спектры однозначно «привязаны» к RGB-изображениям благодаря общему объективу и светоделителю у блока изображения и трёх матричных полихроматоров (Беляев и др., 2016), а также их пространственно-временной синхронизации, то у ФСС указанная «привязка» не жёсткая из-за конструктивных особенностей и работы программы управления (Беляев и др., 2014). Поэтому для ФСС разработана специальная методика уточнённой привязки спектров к изображениям, изложенная ниже.

Тестирование методики атмосферной коррекции на расчётных спектрах СПЭЯ

Разработанная методика атмосферной коррекции вначале была протестирована на данных численных расчётов спектров уходящего излучения на верхней границе атмосферы,

выполненных с использованием кода открытого доступа LibRadTran. Валидация на данных расчётов LibRadTran является важной частью работы, поскольку представляет собой наиболее «чистый» вариант задачи (не отягощённый факторами реальных измерений) и поэтому позволяет проверить адекватность и точность используемой модели атмосферы и аналитических формул для решения обратной задачи. При этом подчеркнём, что при численном решении прямой задачи — расчёте спектра уходящего излучения в LibRadTran используются реальные стратифицированные модели атмосферы с неоднородными высотными профилями газовой и аэрозольной атмосферы, а также различными типами аэрозолей.

Точность представления спектра излучения на верхней границе атмосферы аналитическими формулами иллюстрируется *рис. 1*, на котором изображены две кривые СПЭЯ на верхней границе атмосферы: первая получена численным расчётом LibRadTran с подстилающей поверхностью «трава» и вторая — при фитировании первой кривой методом наименьших квадратов аналитической формулой (13) (см. Часть I).

Точность восстановления функции спектрального альbedo поверхности (обратная задача) демонстрируется *рис. 2* (см. с. 225), где приведены спектры альbedo для четырёх различных типов подстилающих поверхностей (вода, почва, трава, снег), полученные нашей методикой с использованием численно рассчитанных (LibRadTran) спектров яркости на верхней границе атмосферы, в сравнении с истинными альbedo-спектрами, заданными при решении прямой задачи (как входные данные для программы LibRadTran). Погрешность восстановления альbedo (совпадения кривых) характеризуется коэффициентами детерминации R^2 , указанными на каждом из рисунков, которые характеризуют близость кривых в интегральном смысле. Рисунок 2 отражает типичные погрешности восстановленного и исходного профилей альbedo, полученные и для других типов поверхностей.

Как показывают приведённые результаты, использованная в нашей методике относительно простая модель аэрозольной компоненты атмосферы (для неё введены четыре неизвестных параметра τ_{a0} , τ_e , β , g_a) обеспечивает высокую точность восстановления спектрального альbedo поверхности. Это также согласуется с выводами работы (Katsev et al., 2010) в том, что, с одной стороны, спектры уходящего излучения на верхней границе атмосферы в диапазоне 400–900 нм не содержат достаточной информации для однозначного выбора типа аэрозоля, а с другой стороны, восстанавливаемые спектры альbedo поверхности достаточно стабильны по отношению к выбору аэрозольной модели атмосферы.

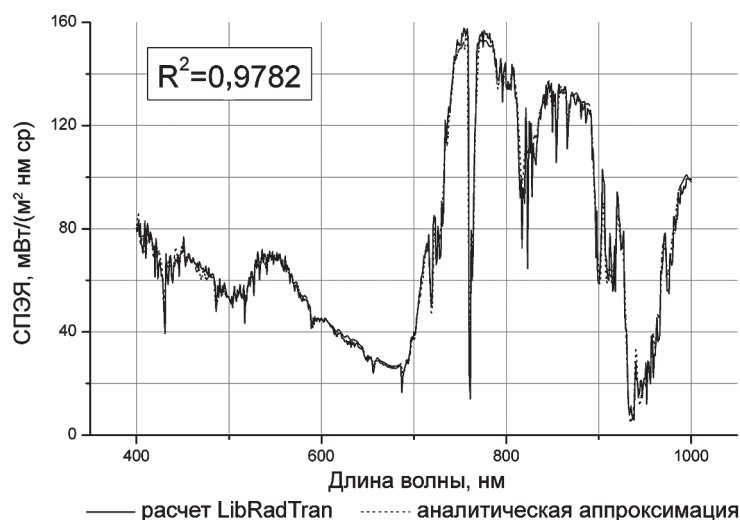


Рис. 1. СПЭЯ на верхней границе атмосферы по расчётам LibRadTran и фитирование аналитической функцией (13)

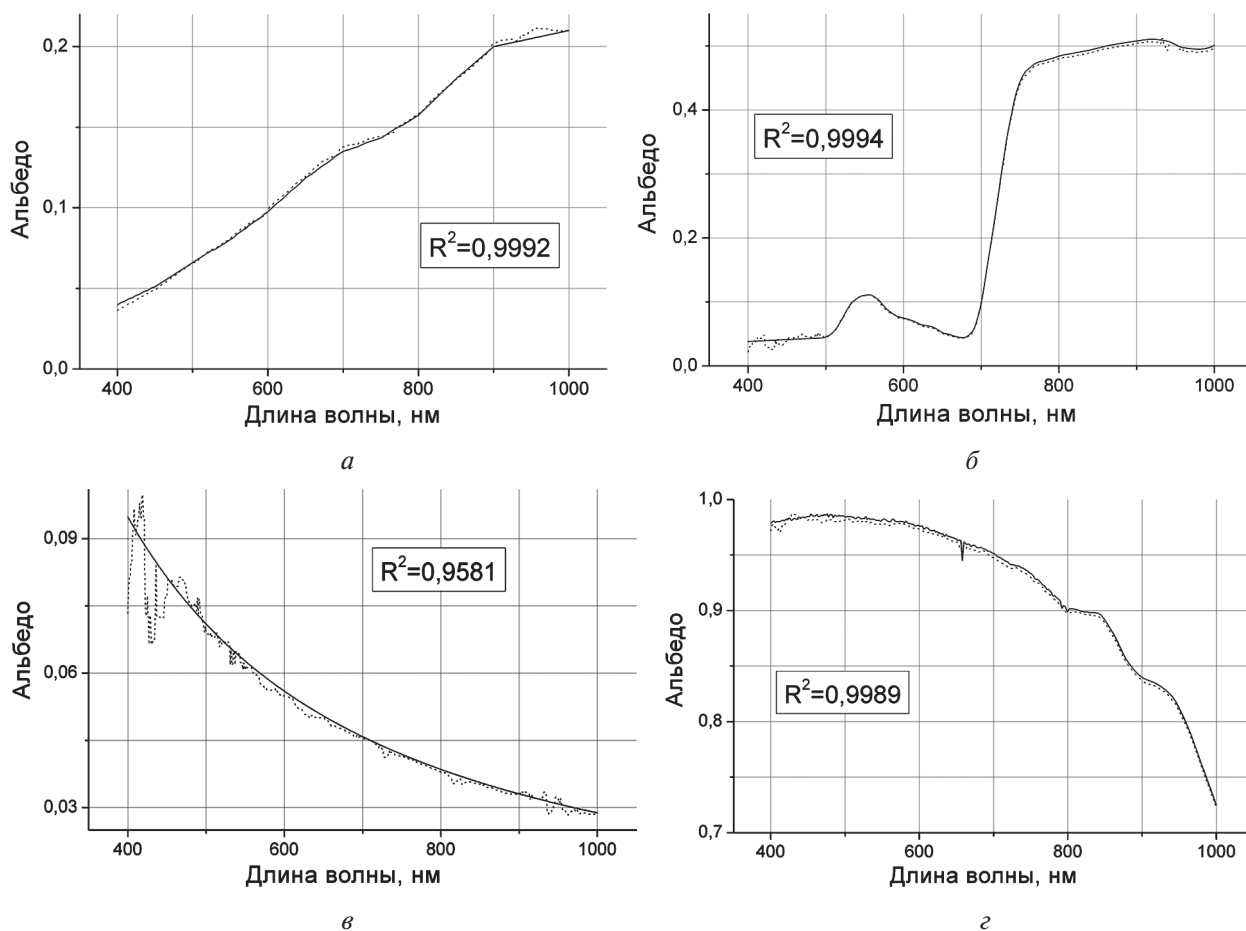


Рис. 2. Исходные (заданные при решении прямой задачи, сплошная линия) и восстановленные при решении обратной задачи (пунктирная линия) спектры альbedo четырёх типов поверхности: а — почва; б — растительность; в — вода; г — снег

Результаты атмосферной коррекции спектров ФСС

Далее представлены результаты применения описанной методики атмосферной коррекции к спектрам ФСС. Для одного из спектров в табл. 1, 2 показаны значения параметров используемой модели атмосферы. В частности, в табл. 1 приведены: начальные значения параметров, задаваемых в рамках итерационной процедуры решения обратной задачи (initial); верхняя и нижняя границы соответствующих параметров (lower и upper) — заданные пределы, в которых ищутся неизвестные значения параметров; найденные значения в результате решения обратной задачи (fit). В табл. 2 приведены значения показателей для газовых пропусканий, фигурирующих в формуле (13) (см. Часть I).

Таблица 1. Значения параметров модели атмосферы

Параметры	initial	lower	upper	fit
c	0,2	0,001	10	0,3966
β	3	1	3,5	3,3684
τ_e	0,01	0,005	0,2	0,0052
τ_{a0}	0,3	0,005	1,5	0,2721
g_a	0,3	0,1	0,9	0,2541
q	1	0	10	1,8221

Таблица 2. Значения параметров модели атмосферы для фитирования поглощающей массы газовых компонентов атмосферы: водяного пара (m_{11} , m_{12}) кислорода (m_2) и озона (m_3)

Параметры	initial	lower	upper	fit
m_{11}	0,1	0,1	5	0,1
m_{12}	0,87	0,1	5	0,8756
m_2	1	0,1	5	1,1999
m_3	1	0,1	5	0,3646

На рис. 3 показан результат подгонки (фитирования) экспериментального спектра, измеренного модулем спектро радиометра (МС) ФСС с борта МКС (точки), и теоретического спектра (сплошная кривая). Здесь подгонка спектра выполнена лишь по параметрам табл. 1 для стандартного содержания газовых компонентов. Затем при повторной аппроксимации спектров указанные в табл. 1 параметры рассматриваются как константы, а варьируются параметры m_{11} , m_{12} , m_2 , m_3 для кривых пропускания с поглощающими массами, отличными от стандартных, и реальных углов Солнца и измерений.

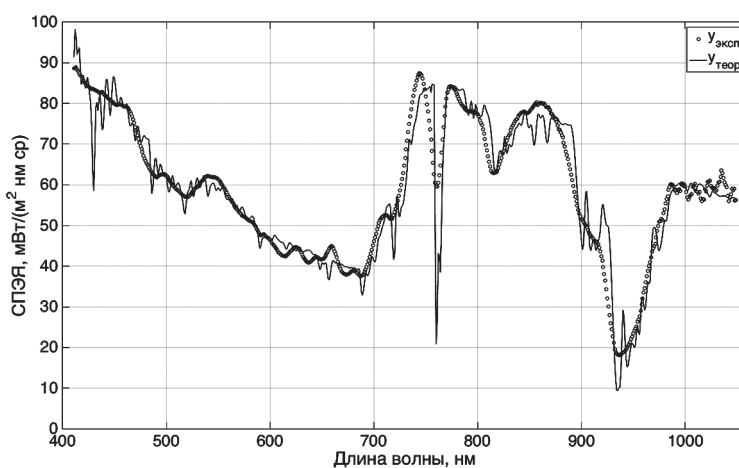


Рис. 3. «Подгонка» в рамках метода наименьших квадратов экспериментальной (МС ФСС) и теоретической кривых СПЭЯ на верхней границе атмосферы подбором параметров, приведённых в табл. 1, для стандартной модели газовой атмосферы (типовой спектр растительности взят в качестве подстилающей поверхности в нулевом приближении)

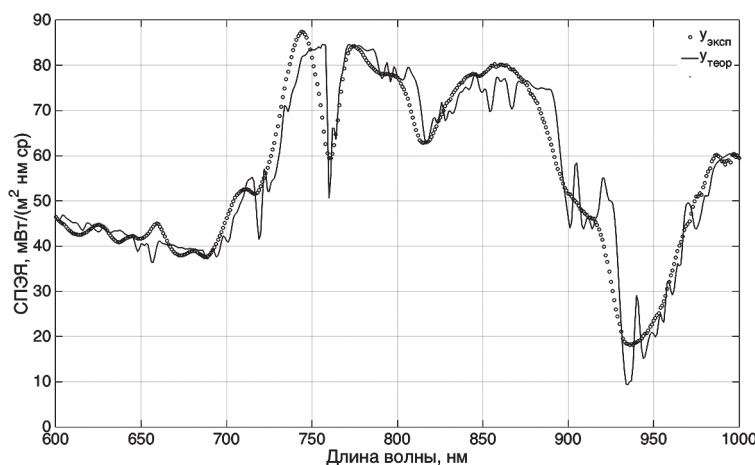


Рис. 4. СПЭЯ на верхней границе атмосферы после подгонки спектральной кривой в области полос поглощения газовых компонентов путём повторного фитирования, при котором уточняются только показатели степени m_{11} , m_{12} , m_2 , m_3

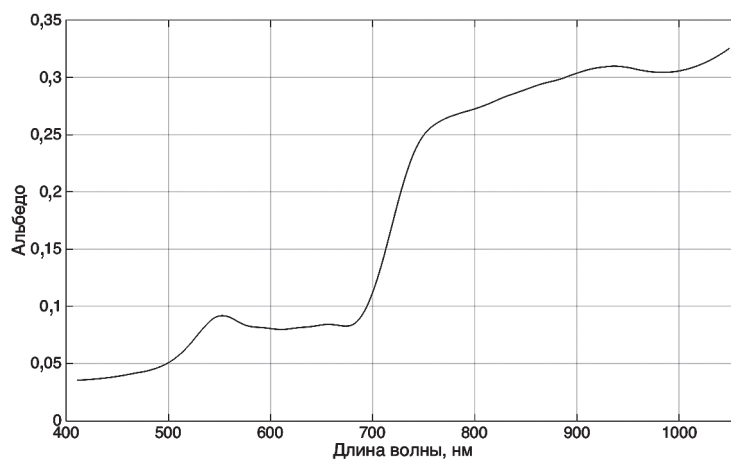


Рис. 5. Спектр альbedo, полученный при атмосферной коррекции уточнённой методикой, восстановленный по измеренному спектру СПЭЯ МС ФСС из уравнения (13) при найденных параметрах атмосферы (табл. 1, 2)

Результат с уточнёнными параметрами m_{11} , m_{12} , m_2 , m_3 для газов показан на рис. 4 (см. с. 226). При этом фитирование выполнялось только на спектральных подынтервалах, соответствующих полосам поглощения водяного пара, кислорода и озона.

На рис. 5 показан реальный спектр альbedo спектрометрируемой МС ФСС поверхности, восстановленный в результате процедуры атмосферной коррекции.

Методика и результаты атмосферной коррекции изображений ФСС

Атмосферная коррекция изображений состоит в получении среднего значения альbedo для каждого пикселя изображения и для каждого спектрального канала R , G , B с использованием эффективного (по спектральному каналу) измеренного значения СПЭЯ изображения модулем регистрации изображения (МРИ) ФСС и параметров атмосферы, полученных в результате описанной выше процедуры атмосферной коррекции спектров МС ФСС.

Атмосферная коррекция может быть выполнена только в случае, если спектры или изображения измерены в абсолютных единицах СПЭЯ, т.е. над выходными целочисленными данными АЦП (аналого-цифрового преобразования) выполнена радиометрическая коррекция, которая предполагает проведение предварительной спектрально-энергетической калибровки съёмочных систем. Такая калибровка для МРИ ФСС не проводилась, поскольку в процессе съёмки осуществляется автоматическая установка времени экспозиции и коэффициента усиления камеры МРИ (чувствительности ISO) в зависимости от яркости сцены. Поэтому калибровка изображений МРИ выполняется при обработке данных по калиброванным спектрам МС ФСС, что, в свою очередь, требует точной привязки областей спектрометрирования к соответствующим им изображениям.

Методика пространственной привязки областей спектрометрирования к изображениям ФСС

Основная особенность системы ФСС состоит в том, что пространственное разрешение регистрируемых изображений значительно отличается от пространственного разрешения регистрируемых спектров. При съёмке с борта МКС один кадр цветного изображения охватывает площадку около 35000×25000 м с пространственным разрешением порядка 10 м (проекция пикселя на поверхность Земли), тогда как проекция входной щели спектрометра на поверхность Земли имеет размер по принятым оценкам около 50×6000 м (Беляев и др., 2013, 2014).

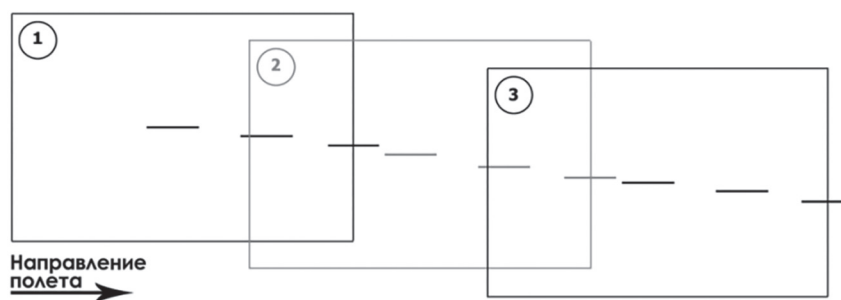


Рис. 6. Взаимное расположение трёх последовательных изображений (прямоугольники) и областей спектрометрирования (отрезки — проекции щели на Землю) при съёмке ФСС в надир с борта МКС

Модуль спектрорадиометра ориентирован в пространстве таким образом, что его щель располагается вдоль длинной стороны кадра изображения, которая, в свою очередь, ориентирована вдоль направления вектора скорости станции (рис. 6). Последовательность изображений получается в режиме трассовой съёмки за счёт движения МКС по орбите с перекрытием соседних кадров 10–30 %. Для каждого изображения спектрорадиометр регистрирует три спектра с фиксированными временными интервалами между ними. Примерное взаимное положение кадров МРИ и спектрометрируемых участков МС при трассовой съёмке в надир представлено на рис. 6. Смещение кадров по вертикали обусловлено как суточным вращением Земли и наклоном орбиты, так и возможными отклонениями ориентации длинной стороны кадра от вектора скорости станции.

Взаимная ориентация жёстко фиксированных относительно друг друга оптических осей МРИ и МС определялась во время проведения наземных лабораторных калибровок ФСС и корректировалась по результатам специального эксперимента «Калибровка по Луне» (Беляев и др., 2013, 2014). Однако она может изменяться в процессе эксплуатации.

Для предварительной пространственной привязки спектральных данных к изображениям (при известном взаимном положении оптических осей МС и МРИ) используются данные о геометрии съёмки и координатно-временные параметры орбитального полёта МКС.

Вычисление горизонтальных смещений областей спектрометрирования относительно центра изображения, обусловленных движением станции, производится по временным характеристикам сеанса съёмки и по данным о высоте и скорости полёта МКС.

Определение вертикальных смещений, обусловленных суточным вращением Земли, выполняется с помощью построения трассовой мозаики изображений (см. рис. 6). После этого области спектрометрирования смещаются по вертикали при сохранении полученных горизонтальных смещений таким образом, чтобы они располагались на линии центров соседних кадров мозаики. Однако даже после такой привязки спектров к изображениям, учитывающей все возможные смещения щели при съёмке, наблюдаются погрешности в положениях области спектрометрирования, обусловленные погрешностями времени съёмки спектров и изображения, погрешностями в построении трассовой мозаики, а также в данных о скорости, высоте полёта и особенно ориентации осей станции в момент регистрации изображения.

От точности этой привязки зависит как визуально-интерактивный анализ изображений и спектров, так и точность процедур атмосферной коррекции и тематической обработки спектров и изображений.

Для минимизации погрешностей привязки спектров и изображений разработана методика коррекции положения проекции щели спектрорадиометра МС на изображение МРИ. Методика основана на поиске максимума корреляции приведённых к общим единицам значений СПЭЯ по области спектрометрирования, измеряемых МС и МРИ, при изменении положения и размеров этой области относительно изображения.

Для приведения к общим единицам измерений МРИ и МС фактически необходимо выполнить калибровку изображений МРИ по спектрам МС. Задача сводится к расчёту неизвестных абсолютных спектральных чувствительностей $S^{R,G,B}(\lambda) = S^{R,G,B} \cdot S_{\text{отн}}^{R,G,B}(\lambda)$ каналов R, G, B МРИ, служащих для пересчёта относительных отсчётов АЦП изображений в абсолютные

единицы СПЭЯ. Здесь $S_{\text{отн}}^{R,G,B}(\lambda)$ — известные относительные спектральные чувствительности соответствующих каналов (рис. 7), $S^{R,G,B}$ — абсолютные интегральные чувствительности каналов, которые подлежат определению.

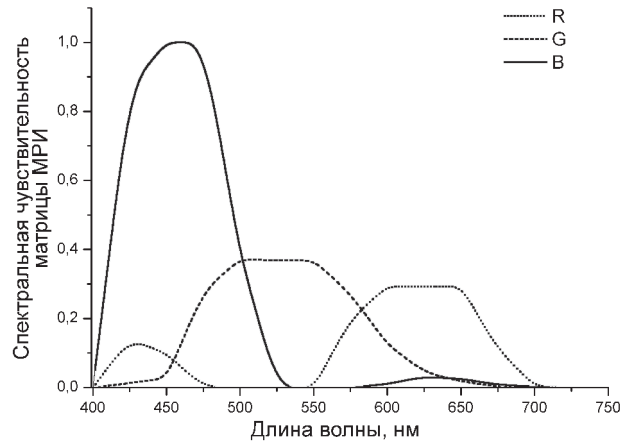


Рис. 7. Относительные спектральные чувствительности каналов R, G, B МРИ ФСС

Очевидно, что суммарная 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 — R, G, B) равны между собой, поскольку относятся к одному и тому же участку подстилающей поверхности. С учётом неоднородной угловой чувствительности МС и спектральных чувствительностей МРИ в каналах цветности получаем следующее равенство:

$$\frac{1}{N} \sum_{i,j=1}^N B_{\text{АЦП}}^{R,G,B}(i,j) \cdot f_i = S^{R,G,B} \int_{R,G,B} B_{\text{МС}}(\lambda) \cdot \bar{S}_{\text{отн}}^{R,G,B}(\lambda) d\lambda = S^{R,G,B} \cdot \frac{\sum_{\lambda_k \in R,G,B} B_{\text{МС}}(\lambda_k) \cdot S_{\text{отн}}^{R,G,B}(\lambda_k)}{\sum_{\lambda_k \in R,G,B} S_{\text{отн}}^{R,G,B}(\lambda_k)}. \quad (1)$$

Заметим, что здесь в интегральные чувствительности каналов $S^{R,G,B}$ включены неизвестные величины экспозиции и чувствительности камеры МРИ, так что размерность $[S^{R,G,B}] = \text{АЦП}/(\text{Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{мкм} \cdot \text{с}))$; $B_{\text{АЦП}}^{R,G,B}(i,j)$ — измеренные МРИ значения яркости изображения в безразмерных отсчётах АЦП для пикселя (i,j) ; $B_{\text{МС}}(\lambda)$ — измеренные МС 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; $S_{\text{отн}}^{R,G,B}$, $\bar{S}_{\text{отн}}^{R,G,B}$ — ненормированные (см. рис. 7) и нормированные спектральные чувствительности каналов R, G, B МРИ. Уравнение (1) позволяет найти нормирующие константы (интегральные чувствительности каналов) S^R, S^G, S^B , согласующие измерения двух подсистем — МРИ и МС.

Поскольку после предварительной привязки положение щели является недостаточно точным, для решения уравнения (1) необходимо использовать измерения по однородным подстилающим поверхностям (например, океану, однородной облачности и т.п.), так чтобы ошибка в положении щели практически не сказывалась на вычисленной левой части (1). Также необходимо предварительно устранить искажения виньетирования изображений при помощи измерений, проведённых в лабораторных условиях с использованием пространственно-однородного поля излучения фотометрической сферы метрологического комплекса «Камелия-М» (Беляев и др., 2006).

После расчёта S^R, S^G, S^B выполнялось уточнение положения щели относительно полученного в результате описанной выше процедуры предварительной привязки путём минимизации следующего среднеквадратичного отклонения:

$$\delta = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i,j=1}^N B_{\text{АЦП}}^{R,G,B}(i,j) \cdot f_i - S^{R,G,B} \sum_{\lambda_k \in R,G,B} B_{\text{МС}}(\lambda_k) \cdot \bar{S}_{\text{ОТН}}^{R,G,B}(\lambda_k) \right\}^2. \quad (2)$$

Вначале, итеративно производя сдвиги положения щели МС на изображении и рассчитывая среднеквадратичное отклонение (2), находим положение щели, наиболее точно соответствующее измерениям МС спектра (абсолютный минимум δ). На *рис. 8* изображено исходное положение щели МС на изображении, снятом МРИ, и новое положение щели после процедуры уточнённой пространственной привязки. Можно видеть, что уточнение положения щели было произведено в основном за счёт сдвига вдоль длинной стороны кадра. Это связано с тем, что поперёк щели укладывается всего несколько пикселей изображения, поэтому при сдвиге вдоль короткой стороны кадра происходит значительная смена пикселей, попадающих в область спектрометрирования, тогда как при сдвиге вдоль длинной стороны кадра доля заменяемых пикселей незначительна.

На *рис. 9* приведён график зависимости значений среднеквадратичного отклонения от сдвига щели МС (для первого из трёх спектров кадра) по осям вдоль длинной стороны кадра — ΔX и короткой стороны кадра — ΔY . Из графика хорошо видно, что начальное значение координаты положения щели вдоль короткой стороны кадра (поперёк щели) находится в минимуме значений отклонения (2), т. е. в уточнении практически не нуждается.

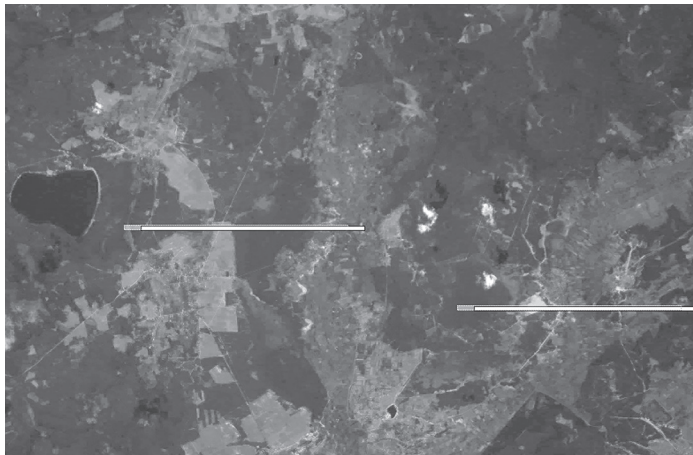


Рис. 8. Изначально рассчитанное положение проекций щели МС на изображении МРИ (серый цвет) и новое положение щели, найденное по методике уточнения положения щели МС на изображении МРИ (белый цвет)

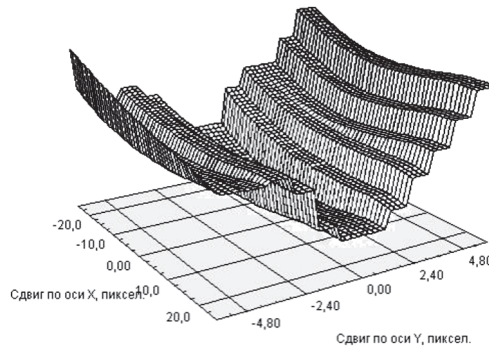


Рис. 9. График зависимости среднеквадратичного отклонения δ от сдвигов по осям вдоль длинной стороны кадра (вдоль щели спектрометра) и вдоль короткой стороны кадра (поперёк щели спектрометра)

Также на *рис. 9* видно, что при сдвигах вдоль длинной стороны кадра наблюдаются значительно меньшие изменения значений δ , однако они имеют чёткий локальный минимум при незначительном сдвиге вдоль этой оси.

На втором этапе производилось уточнение реальных размеров щели спектрометра путём минимизации того же среднеквадратичного отклонения (2). Для этого применялся статистический подход и итеративно производились уточнения положений щели для большого количества изображений с использованием различных параметров размеров щели. Если считать, что неточности в положении щели обусловлены случайными независимыми процессами, то форма распределений значений сдвигов ΔX и ΔY должна описываться по закону Гаусса. На *рис. 10* изображены распределения сдвигов ΔX и ΔY при заданных размерах щели 745×5 пикселей изображения МРИ (см. *рис. 10а*) и 895×8 пикселей (см. *рис. 10б*). Можно видеть, что форма распределений на *рис. 10а* лучше описывает распределение сдвигов при случайном характере ошибок, чем распределения на *рис. 10б*, из чего можно сделать вывод о том, что относительные размеры щели спектрометра соответствуют размерам, определённым во время предполётных калибровок приборов ФСС (Беляев и др., 2014).

Таким образом, представленная методика позволяет выполнять коррекцию относительной пространственной привязки проекции щели спектрометра на изображение и её ширины на этапе предварительной обработки данных ФСС. При помощи этой методики также были подтверждены используемые размеры щели, определённые во время предполётных калибровок.

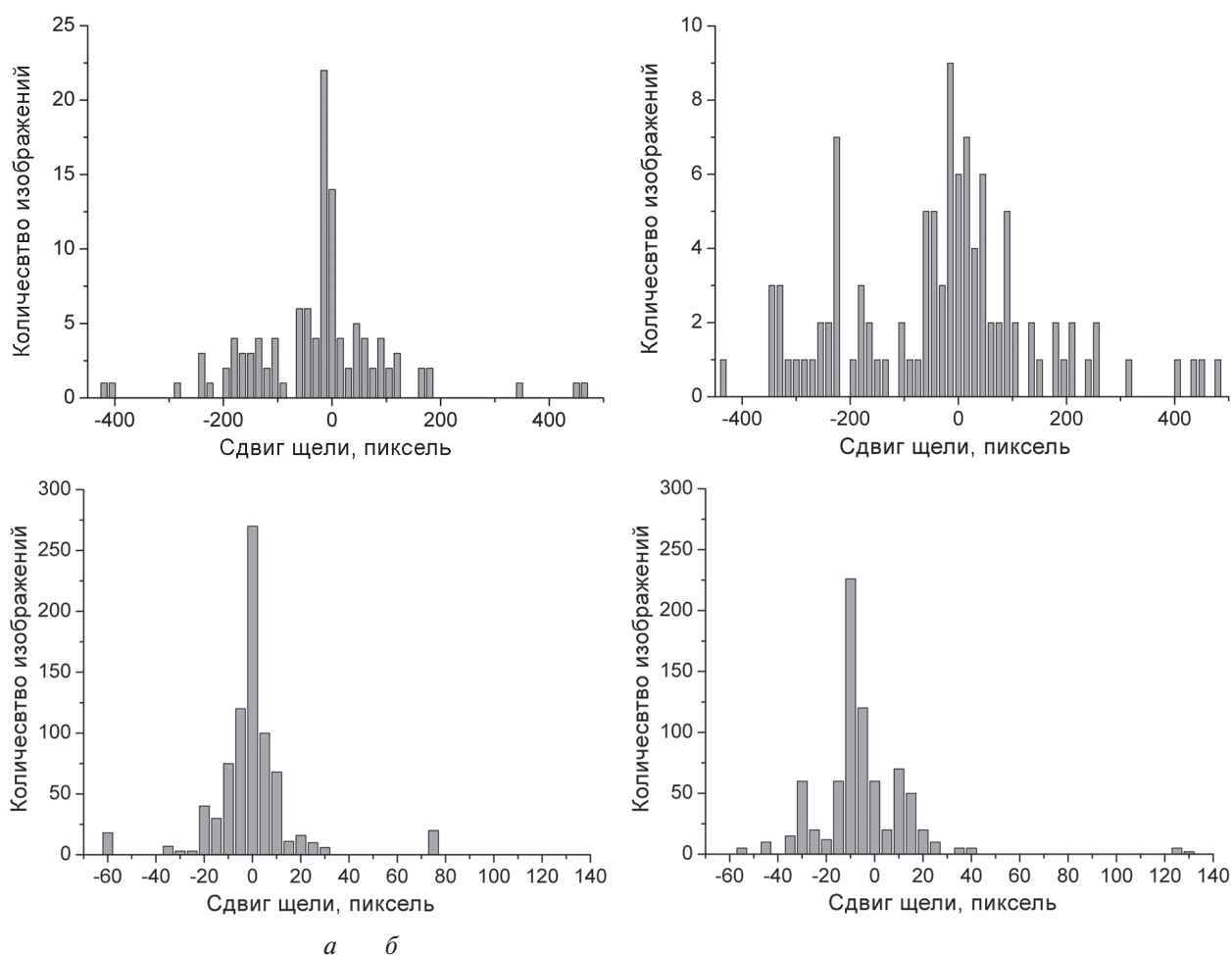


Рис. 10. Гистограмма распределения: *а* — значений ΔX и ΔY при выбранной длине щели 745 пикселей и ширине 4 пикселя; *б* — значений ΔX и ΔY при выбранной длине щели 895 пикселей и ширине 8 пикселей

Следует отметить, что уточнение пространственной привязки спектров и изображений, описанное выше, является одноразовой, но периодически повторяемой процедурой, проводимой по однородным поверхностям.

Нахождение средних по спектру альbedo в каналах изображения МРИ

После нахождения из уравнения (1) интегральных чувствительностей каналов МРИ S^R, S^G, S^B , согласующих измерения изображений МРИ и спектров МС, необходимо с их использованием выполнить радиометрическую коррекцию изображений, т.е. рассчитать эффективные значения СПЭЯ в каждом канале R, G, B МРИ ФСС для проведения атмосферной коррекции изображений. Нахождение интегральных чувствительностей S^R, S^G, S^B необходимо проводить для каждой серии измерений, поскольку съёмка может выполняться при различных установках МРИ, а погрешности зависят от самой сцены.

Запишем выражение (по определению) для измеряемой МРИ яркости в единицах АЦП, проинтегрировав истинную СПЭЯ пикселя $B_l(\lambda, \mu, \mu_0, \varphi)$ с учётом спектральной чувствительности каждого канала (здесь и далее для краткости вместо двойного индекса (i, j) используется один индекс для номера пикселя изображения):

$$B_{\text{АЦП}}^{R,G,B}(l) = S^{R,G,B} \int_{R,G,B} B_l(\lambda, \mu, \mu_0, \varphi) \cdot \bar{S}_{\text{отн}}^{R,G,B}(\lambda) d\lambda. \quad (3)$$

Для перехода к эффективным значениям СПЭЯ в каждом канале МРИ ФСС в абсолютных единицах яркости, $B_{\text{эф}}^{R,G,B}$, поделим обе части в выражении (3) на $S^{R,G,B}$ и получим слева калиброванные (в единицах Вт/(см²·мкм·ср)) значения эффективной СПЭЯ в канале МРИ:

$$B_{\text{эф}}^{R,G,B}(l) [\text{Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{мкм} \cdot \text{ср})] \equiv \frac{B_{\text{АЦП}}^{R,G,B}(l)}{S^{R,G,B}} = \int_{R,G,B} B_l(\lambda, \mu, \mu_0, \varphi) \cdot \bar{S}_{\text{отн}}^{R,G,B}(\lambda) d(\lambda). \quad (4)$$

В выражении (4) $B_l(\lambda, \mu, \mu_0, \varphi)$ — яркость пикселя l , согласно теоретической модели определяющаяся через альbedo этого пикселя $\rho_l(\lambda)$ по формуле (13) (Часть I), которую для удобства перепишем здесь снова:

$$B_l(\lambda, \mu, \mu_0, \varphi) = \left\{ B_{\text{атм}} \left(T_{\text{H}_2\text{O}\lambda}^0 \right)^{m_{11}} + \frac{\rho_l(\lambda) E_{\lambda}(\rho_l(\lambda))}{\pi} \cdot T_{\lambda} \left(T_{\text{H}_2\text{O}\lambda}^0 \right)^{m_{12}} \right\} \cdot \left(T_{\text{O}_2\lambda}^0 \right)^{m_2} \left(T_{\text{O}_3\lambda}^0 \right)^{m_3}. \quad (5)$$

Подставим выражение (5) в равенство (4), перейдя к интегральным суммам (для дискретных каналов), и будем считать неизвестное альbedo пикселя $\rho_l(\lambda)$ постоянным в пределах каждого канала R, G, B : $\rho_l(\lambda) = \rho_l^{R,G,B} = \text{const}$:

$$B_{\text{эф}}^{R,G,B}(l) = \sum_{\lambda_i \in R,G,B} B_{\text{атм}}(\lambda_i) \left(T_{\text{H}_2\text{O}\lambda_i}^0 \right)^{m_{11}} \left(T_{\text{O}_2\lambda_i}^0 \right)^{m_2} \left(T_{\text{O}_3\lambda_i}^0 \right)^{m_3} \bar{S}_{\text{отн}}^{R,G,B}(\lambda_i) + \frac{\rho_l^{R,G,B}}{\pi} \sum_{\lambda_i \in R,G,B} E\left(\rho_{\lambda_i}^{(0)}\right) T_{\lambda_i} \left(T_{\text{H}_2\text{O}\lambda_i}^0 \right)^{m_{12}} \left(T_{\text{O}_2\lambda_i}^0 \right)^{m_2} \left(T_{\text{O}_3\lambda_i}^0 \right)^{m_3} \bar{S}_{\text{отн}}^{R,G,B}(\lambda_i). \quad (6)$$

Здесь освещённость $E\left(\rho_{\lambda_i}^{(0)}\right)$ вычисляется с использованием альbedo нулевого приближения $\rho_{\lambda_i}^{(0)}$ при проведении атмосферной коррекции для спектра данного изображения. После преобразований из уравнения (6) получим выражения для среднего альbedo в каждом канале R, G, B и для каждого пикселя $\rho_l^{R,G,B}$ изображения:

$$\rho_l^{R,G,B} = \frac{\pi B_{\text{эф}}^{R,G,B}(l) - \pi \sum_{\lambda_i \in R,G,B} B_{\text{атм}}(\lambda_i) \left(T_{\text{H}_2\text{O}\lambda_i}^0 \right)^{m_{11}} \left(T_{\text{O}_2\lambda_i}^0 \right)^{m_2} \left(T_{\text{O}_3\lambda_i}^0 \right)^{m_3} \bar{S}_{\text{отн}}^{R,G,B}(\lambda_i)}{\sum_{\lambda_i \in R,G,B} E\left(\rho_{\lambda_i}^{(0)}\right) T_{\lambda_i} \left(T_{\text{H}_2\text{O}\lambda_i}^0 \right)^{m_{12}} \left(T_{\text{O}_2\lambda_i}^0 \right)^{m_2} \left(T_{\text{O}_3\lambda_i}^0 \right)^{m_3} \bar{S}_{\text{отн}}^{R,G,B}(\lambda_i)}.$$



Рис. 11. Изображение ФСС: *а* — исходное; *б* — после атмосферной коррекции

В итоге получим цветное RGB-изображение из найденных альбедо $\rho_i^{R,G,B}$ (рис. 11).

Заключение

Разработанная методика атмосферной коррекции протестирована на спектрах уходящего излучения, рассчитанных программой LibRadTran. С высокой точностью восстановлены исходные спектры альбедо, заложенные в решение прямой задачи. Представлены примеры результатов применения методики к спектрам ФСС.

Радиометрическая коррекция (энергетическая калибровка) и атмосферная коррекция RGB-изображений ФСС выполняется путём пространственной «привязки» пикселей и их значений к соответствующим областям спектрометрирования и значениям спектров. Для этой цели разработана корреляционная методика их уточнённой пространственной «привязки». В результате последующей атмосферной коррекции изображений ФСС получены средние значения альбедо по каждому из *R*, *G*, *B* каналов, что, в свою очередь, важно для тематической обработки изображений с использованием квазисинхронных наземных измерений или спектров различных объектов из спектральных баз данных.

Литература

1. Беляев Б. И., Беляев Ю. В., Залетный В. М., Катковский Л. В., Нестерович Э. И. Метрологический комплекс для аттестации спектрометрической и видеоспектральной аппаратуры «Камелия-М» // Приборы для научных исследований: каталог приборов, комплексов и установок, разработанных по ГНТП «Приборы для научных исследований» / под ред. Буракова В. С. Минск, 2006. С. 13–16.
2. Беляев Б. И., Катковский Л. В., Роговец А. В. Восстановление спектров земной поверхности с использованием цветных изображений высокого разрешения // Журн. прикладной спектроскопии. 2013. Т. 80. № 1. С. 70–77.
3. Беляев Б. И., Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Катковский Л. В., Крот Ю. А., Сармин Э. Э. Результаты испытаний фотоспектральной системы на МКС // Исследование Земли из космоса. 2014. № 6. С. 27–39.
4. Беляев Б. И., Беляев М. Ю., Сармин Э. Э., Гусев В. Ф., Десинов Л. В., Иванов В. А., Крот Ю. А., Мартинов А. О., Рязанцев В. В., Сосенко В. А. Устройство и летные испытания научной аппаратуры «Видеоспектральная система» на борту российского сегмента МКС // Космическая техника и технологии. 2016. № 2(13). С. 70–79.
5. Katsev I. L., Prikhach A. S., Zege E. P., Grudo J. O., Kokhanovsky A. A. Speeding up the aerosol optical thickness retrieval using analytical solutions of radiative transfer theory // Atmospheric Measurement Techniques. 2010. No. 3. DOI: 10.5194/amt-3-1403-2010.

Atmospheric correction of data registered on board the ISS. Part II. Methodology for images and application results

M. Yu. Belyaev¹, B. I. Belyaev², D. A. Ivanov¹, L. V. Katkovsky²,
A. O. Martinov², V. V. Riazantsev¹, E. E. Sarmin¹, V. A. Siliuk², V. G. Shukajlo²

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

Part I describes a method of atmospheric correction of spectra in the visible and near infrared spectral range registered by the photospectral (PhSS) and videospectral (VSS) systems on board the International Space Station (ISS) during the Uragan space experiment. Part II shows the results of testing this atmospheric correction method using the calculated spectra of the outgoing radiation at the top of atmosphere based on the LibRadtran code. Atmospheric correction of PhSS spectra is performed. Atmospheric correction of images (finding the average albedo of the surface in each band) is presented. To do this radiometric correction of images using measured PhSS spectra is carried out first. Fields of view of PhSS spectral module and PhSS image shooting module are co-registered by correlation method. Next, atmospheric correction proceeds by analytical calculations of various radiation components in the equation for radiance using the parameters received by solving the inverse problem of atmospheric optics for PhSS (VSS) spectra.

Keywords: remote sensing, spectra, spectral images, atmospheric correction, surface albedo

Accepted: 06.10.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-223-234

References

1. Belyaev B. I., Belyaev Yu. V., Zaletnyi V. M., Katkovskii L. V., Nesterovich E. I., Metrologicheskii kompleks dlya attestatsii spektrometricheskoi i videospektral'noi apparatury "Kameliya-M" (Metrological complex for certification of spectrometric and video spectral equipment "Kameliya-M"), *Pribory dlya nauchnykh issledovaniy: katalog priborov, kompleksov i ustanovok, razrabotannykh po GNTP "Pribory dlya nauchnykh issledovaniy"*, Minsk, 2006, pp. 13–16.
2. Belyaev B. I., Katkovskii L. V., Rogovets A. V., Vosstanovlenie spektrov zemnoi poverkhnosti s ispol'zovaniem tsvetnykh izobrazhenii vysokogo razresheniya (Surface spectra retrieval using high-resolution color images), *Zhurnal prikladnoi spektroskopii*, 2013, Vol. 80, No. 1, pp. 70–77.
3. Belyaev B. I., Belyaev M. Yu., Desinov L. V., Katkovskii L. V., Krot Yu. A., Sarmin E. E., Rezul'taty ispytaniy fotospektral'noi sistemy na MKS (Photospectral system test results on ISS), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 6, pp. 27–39.
4. Belyaev B. I., Belyaev M. Yu., Sarmin E. E., Gysev V. F., Desinov L. V., Ivanov V. A., Krot Yu. A., Martinov A. O., Ryazantsev V. V., Sosenko V. A., Ustroistvo i letnye ispytaniya nauchnoi apparatury "Videospektral'naya sistema" na bortu rossiiskogo segmenta MKS (Design and flight tests of science hardware "Videospectral system" on board the Russian segment of the ISS), *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2016, No. 2(13), pp. 70–79.
5. Katsev I. L., Prikhach A. S., Zege E. P., Grudo J. O., Kokhanovsky A. A., Speeding up the aerosol optical thickness retrieval using analytical solutions of radiative transfer theory, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2010, No. 3, DOI: 10.5194/amt-3-1403-2010.