

Атмосферная коррекция данных, регистрируемых с борта МКС. Часть I. Методика для спектров

М. Ю. Беляев¹, Б. И. Беляев², Д. А. Иванов², Л. В. Катковский²,
А. О. Мартинов², В. В. Рязанцев¹, Э. Э. Сармин¹, О. О. Силук², 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 работе описана быстрая и достаточно точная 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». Предложена и описана оптическая модель безоблачной атмосферы, учитывающая наиболее существенные с точки зрения теории переноса излучения процессы трансформации излучения в системе «подстилающая поверхность – атмосфера» и введены соответствующие оптико-физические параметры. В основе предлагаемой атмосферной коррекции лежит определение неизвестных оптических параметров атмосферы и поверхности с использованием зарегистрированных ФСС или ВСС спектров высокого разрешения путём решения обратной задачи атмосферной оптики. Методика основана на предложенных аналитических формулах, с высокой точностью описывающих спектр уходящего излучения системы «атмосфера – подстилающая поверхность» и использующих параметры предложенной оптической модели атмосферы. Решение обратной задачи выполняется методом наименьших квадратов (алгоритм Левенберга – Марквордта) путём фитирования аналитическими формулами. По спектрам излучения, измеренным с борта МКС, находятся параметры атмосферы и спектр альbedo спектротрируемой области. При этом не используется дополнительная априорная информация о состоянии атмосферы, кроме геометрии, времени и сезона съёмки. Предложенная методика применима практически без изменений к атмосферной коррекции гиперспектральных данных.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, спектры, атмосферная коррекция, альbedo поверхности

Одобрена к печати: 06.10.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-213-222

Введение

Дистанционное зондирование Земли, включая мониторинг катастрофических явлений в рамках космического эксперимента «Ураган» (экспериментальная отработка наземно-космической системы мониторинга и прогноза развития природных и техногенных катастроф) на борту российского сегмента Международной космической станции (МКС), проводится в том числе с использованием ручных видеоспектральных приборов: научной аппаратуры «Фотоспектральная система» (ФСС, с 2010 г.) (Беляев и др., 2014а) и «Видеоспектральная система» (ВСС, с 2014 г.) (Беляев и др., 2016).

Системы ФСС и ВСС предназначены для совместной регистрации спектров и изображений земной поверхности с борта МКС. Оба прибора состоят из относительно независимых модулей регистрации изображения (МРИ у ФСС) и модулей спектрорадиометра (МС: один — у ФСС и три — у ВСС).

Данные МРИ ФСС представляют собой изображения в формате RAW в трёх цветовых каналах *R*, *G*, *B* с разрядностью 16 бит (Беляев и др., 2013, 2014а).

Для повышения информативности и качества интерпретации получаемых указанной аппаратурой спектров и изображений в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра обязательным элементом предварительной обработки является атмосферная коррекция данных.

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.

Задача атмосферной коррекции состоит в нахождении коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) или спектрального альbedo поверхности, используя измеренную из космоса СПЭЯ на верхней границе атмосферы. Полученные в результате спектральные функции отражения подстилающих поверхностей (альbedo) позволяют проводить наиболее точное и достоверное распознавание и классификацию объектов земной поверхности по зарегистрированным из космоса изображениям (спектрам), используя в качестве обучающих выборок как библиотечные спектры отражения, так и квазисинхронные наземные измерения.

Недостатком существующих методик атмосферной коррекции является использование сложных программ решения прямой задачи переноса излучения (Leprieur et al., 1995) или заранее рассчитанных таблиц с вариантами решения прямой задачи (Look Up Tables) с последующей интерполяцией (Adler-Golden et al., 1999), что либо требует значительных временных затрат, либо неудовлетворительно по точности. При этом, как правило, необходимо наличие определённых априорных данных о параметрах атмосферы либо присутствие в обрабатываемых данных вполне определённых узких спектральных каналов (например, для использования известных корреляционных связей между ними, для определения содержания водяного пара, других газовых компонентов). Кроме того, методики атмосферной коррекции гиперспектральных данных имеют дело, как правило, с отдельными однородными пикселями (при высоком пространственном разрешении), тогда как специфика данных ФСС и ВСС состоит в том, что спектры относятся к протяжённым (неоднородным) областям поверхности, содержащим большое число пикселей связанного с ними изображения.

Описываемая методика является дальнейшим развитием и уточнением методики, описанной в работе (Беляев и др., 2014б). В данной методике не используется априорная информация об атмосфере, и она является исключительно быстрой (выполняется «на лету»), поскольку решение прямой задачи представлено аналитическими формулами. При этом точность методики достаточно высока (несколько процентов), что проверено с использованием спектров уходящего излучения на верхней границе атмосферы, полученных точными численными расчётами в известной программе LibRadTran.

Модель атмосферы

В задачах атмосферной коррекции в видимом и ближнем ИК-диапазоне спектра учитываются, как правило, следующие физические процессы, определяющие формирование спектра яркости излучения: аэрозольное поглощение и рассеяние, молекулярное рассеяние, поглощение водяным паром, кислородом и озоном.

Решение обратной задачи оптики, являющееся основным этапом алгоритма атмосферной коррекции, опирается на задание определённой модели атмосферы, описание которой включает соответствующий набор оптико-физических параметров, которые необходимо извлечь из измеряемых (корректируемых) данных. Анализ проведённых многочисленных расчётов СПЭЯ уходящего излучения для различных углов Солнца, наблюдения и моделей атмосферы показал, что спектр уходящего излучения (Катковский, 2016) слабо зависит от вертикальной стратификации атмосферы и может быть с высокой точностью описан с использованием интегральных (эффективных) по высоте атмосферы значений параметров, существенных с точки зрения теории переноса излучения (Гинзбург и др., 2016; Katsev et al., 2010). Аналогичный вывод сделан и в работе (Васильев и др., 2008) по отношению к стратификации нижнего слоя тропосферы, где указывалось, что пренебрежение стратификацией этого слоя приводит к погрешности не более чем 0,2 % в величине уходящего излучения в рассматриваемом диапазоне. Существенными для описания спектра уходящего излучения параметрами являются

(кроме угловых переменных, описывающих геометрию измерений): вертикальные спектральные оптические толщины по молекулярному рассеянию и аэрозольному ослаблению, средний косинус индикатрисы рассеяния, альbedo однократного рассеяния (вероятность выживания кванта), спектральное альbedo поверхности, интегральные (в столбе атмосферы) содержания водяного пара, кислорода и озона. Причём наиболее чувствителен спектр уходящего излучения (вне полос поглощения атмосферных газов) к изменениям (в порядке убывания влияния) альbedo поверхности, оптической толщины аэрозоля и среднего косинуса индикатрисы рассеяния.

Используемая здесь параметрическая модель атмосферы является уточнением модели, описанной нами в работе (Беляев и др., 2014б).

Основываясь на указанных результатах, введём параметры оптической модели безоблачной атмосферы.

Спектральная суммарная вертикальная оптическая толщина атмосферы (без учёта оптической толщины по газовому поглощению): $\tau(\lambda) = \tau_m(\lambda) + \tau_a(\lambda) + \tau_e(\lambda)$, где $\tau_m(\lambda)$ — оптическая толщина по молекулярному рассеянию; $\tau_a(\lambda)$ — оптическая толщина по аэрозольному рассеянию; $\tau_e(\lambda)$ — оптическая толщина по аэрозольному поглощению.

Альbedo однократного рассеяния (вероятность выживания кванта) вычисляется через введённые оптические толщины: $\omega_\lambda = [\tau_m(\lambda) + \tau_a(\lambda)] / [\tau_m(\lambda) + \tau_a(\lambda) + \tau_e(\lambda)]$.

Оптическая толщина по молекулярному рассеянию определяется атмосферной моделью (сезоном и местом съёмки) и считается известной величиной, вычисляемой в соответствии с аппроксимацией (Bucholtz, 1995): $\tau_m(\lambda) = A(P_0, T_0) \lambda^{-(B+C\lambda+D/\lambda)}$. Известная константа $A(P_0, T_0)$ зависит от выбранной атмосферной модели (например, среднеширотное лето), давления P_0 и температуры T_0 у поверхности Земли; известные константы B, C, D одинаковы для всех моделей атмосферы.

Спектральные зависимости введённых аэрозольных оптических толщин аппроксимируются в рамках модели следующими функциями:

$$\begin{cases} \tau_a(\lambda) = \tau_{a0} (\lambda_0 / \lambda)^\beta, \\ \tau_e = \text{const}, \end{cases}$$

где τ_{a0} — значение соответствующей оптической толщины на опорной длине волны λ_0 , являющееся неизвестным параметром модели; β — также неизвестный параметр модели (показатель Ангстрема); оптическая толщина по поглощению τ_e считается не зависящей от длины волны, поскольку она обычно мала в сравнении с $\tau_a(\lambda)$ и её спектральная изменчивость не существенна.

Спектральное альbedo подстилающей поверхности — ρ_λ , отражение считается ламбертовским (изотропным), при этом КСЯ совпадает с альbedo.

Индикатриса рассеяния задаётся как средневзвешенная функция рэлеевской индикатрисы $x_m(\gamma)$ и индикатрисы аэрозольного рассеяния $x_a(\gamma)$ следующим образом:

$$x(\gamma) = x_m(\gamma) \frac{\tau_m(\lambda)}{[\tau_m(\lambda) + \tau_a(\lambda)]} + x_a(\gamma) \frac{\tau_a(\lambda)}{[\tau_m(\lambda) + \tau_a(\lambda)]}. \quad (1)$$

Аэрозольная индикатриса $x_a(\gamma)$ аппроксимируется функцией Хеньи — Гринштейна со средним косинусом аэрозольного рассеяния g_a , не зависящим от длины волны:

$$\left. \begin{aligned} x_m(\gamma) &= \frac{3}{4}(1 + \gamma^2), \\ x_a(\gamma) &= \frac{1 - g_a^2}{(1 + g_a^2 - 2g_a\gamma)^{3/2}}, \\ \gamma &= -\mu\mu_0 + \sqrt{(1 - \mu^2) \cdot (1 - \mu_0^2)} \cdot \cos \varphi, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где γ — косинус угла рассеяния; зенитный угол Солнца $\theta_0 = \arccos \mu_0$; μ — косинус зенитного угла наблюдения θ ; φ — азимутальный угол направления распространения излучения относительно плоскости солнечного вертикала.

Учёт поглощения излучения в полосах основных газовых составляющих (водяного пара, озона и кислорода) осуществляется фильтровым способом, т. е. общее выражение для СПЭЯ на верхней границе атмосферы, записанное без учёта поглощения газовыми компонентами, умножается на произведение пропусканий трёх газовых компонент: $T_{g\lambda} = T_{H_2O\lambda} T_{O_2\lambda} T_{O_3\lambda}$.

Для учёта пропускания в полосах поглощения указанных газов заранее рассчитываются пропускания атмосферы для стандартных значений поглощающих масс каждой из приведённых компонент со спектральным разрешением 2 нм при расположении Солнца в зените, при наблюдении в надир и среднем альбедо поверхности 0,2. Они описаны в работе (Беляев и др., 2014б). Стандартные значения параметров, использованные для расчёта пропусканий: температура у поверхности — 293 К; давление у поверхности — 101 325 Па; стандартное содержание водяного пара в столбе атмосферы — 4,20 г/см²; стандартное содержание озона — 0,330 атм см (1 атм см = 1000 единиц Добсона).

Для пропускания с поглощающей массой, отличающейся от стандартной, и других углов Солнца и наблюдения используются следующие выражения с введением параметров m_1 , m_2 , m_3 для каждого из газов:

$$T_{H_2O\lambda} = \left(T_{H_2O\lambda}^0\right)^{m_1}, \quad T_{O_2\lambda} = \left(T_{O_2\lambda}^0\right)^{m_2}, \quad T_{O_3\lambda} = \left(T_{O_3\lambda}^0\right)^{m_3}, \quad (3)$$

где $T_{H_2O\lambda}^0$, $T_{O_2\lambda}^0$, $T_{O_3\lambda}^0$ — стандартные пропускания соответствующих газов для указанных выше условий. Заметим, что неизвестные параметры m_1 , m_2 , m_3 включают в себя произведение воздушной массы (геометрического пути) и содержания соответствующего компонента.

Вариации озона обычно незначительны и имеют небольшое влияние, поэтому используется фиксированное значение его концентрации 330 DU (в единицах Добсона) на уровне моря, представляющее средние условия. Функция пропускания кислорода $T_{O_2\lambda}$ также фиксирована (не содержит неизвестных параметров); обе функции (для озона и кислорода) зависят только от зенитных углов Солнца и наблюдения. В отличие от этого функция пропускания водяного пара, ввиду значительной изменчивости, зависит (кроме указанных углов) от дополнительного неизвестного параметра — коэффициента отличия поглощающей массы от стандартной. Таким образом, параметры m_2 , m_3 являются известными, тогда как параметр m_1 — неизвестным, включающим как концентрацию водяного пара, так и эффективный путь прохождения излучения.

Основные уравнения задачи атмосферной коррекции на основе измеренных спектров яркости

Обычно используемое выражение для СПЭЯ излучения на пикселе спутникового сенсора $B_\lambda(\mu, \mu_0, \varphi)$ над ламбертовской поверхностью имеет вид (Perkins et al., 2012; Vermote et al., 1994):

$$B_\lambda(\mu, \mu_0, \varphi) = B_{атм\lambda}(\mu, \mu_0, \varphi) + \frac{a_\lambda \rho_\lambda}{1 - \rho_{e\lambda} s} + \frac{b_\lambda \rho_{e\lambda}}{1 - \rho_{e\lambda} s}, \quad (4)$$

где $B_{атм\lambda}(\mu, \mu_0, \varphi)$ является яркостью атмосферной дымки (соответствует нулевому альбедо поверхности); $\rho_{e\lambda}$ — среднее альбедо поверхности вокруг пикселя с альбедо ρ_λ ; s — сферическое альбедо атмосферы при освещении снизу; a_λ , b_λ — коэффициенты, рассчитываемые из уравнения переноса излучения. В такой форме записи не виден явно физический смысл коэффициентов a_λ , b_λ , что затрудняет получение для них аппроксимаций. Мы используем следующее выражение для СПЭЯ на верхней границе атмосферы (Катковский, 2016), которое эквивалентно равенству (4), но все величины в нём имеют ясный физический смысл, что позволяет строить аппроксимации для их вычисления:

$$B_{\lambda}(\mu, \mu_0, \varphi) = \left[B_{\text{атм } \lambda}(\mu, \mu_0, \varphi) + \frac{\rho_{\lambda}}{\pi} E_{\lambda}(\mu_0, \rho_{e\lambda}) T_{\lambda}^{\text{пр}}(\mu) + \frac{\rho_{e\lambda}}{\pi} E_{\lambda}(\mu_0, \rho_{e\lambda}) T_{\lambda}^{\text{диф}}(\mu) \right] T_{g\lambda}. \quad (5)$$

Здесь $E_{\lambda}(\mu_0, \rho_{e\lambda})$ — спектральная освещённость поверхности Земли, зависящая от среднего альбедо поверхности $\rho_{e\lambda}$ и зенитного угла Солнца; $T_{\lambda}^{\text{пр}}(\mu)$, $T_{\lambda}^{\text{диф}}(\mu)$ — прямое и диффузное пропускания атмосферы соответственно от поверхности к космическому сенсору без учёта пропускания в полосах поглощения газов, зависящие от зенитного угла наблюдения. Полное пропускание является суммой прямого и диффузного пропусканий:

$$T_{\lambda}(\mu) = T_{\lambda}^{\text{пр}}(\mu) + T_{\lambda}^{\text{диф}}(\mu) = \exp(-\tau_{\lambda}/\mu) + T_{\lambda}^{\text{диф}}(\mu). \quad (6)$$

Основу аппроксимации спектра уходящего излучения $B_{\lambda}(\mu, \mu_0, \varphi)$ в формуле (5) составляют аналитические выражения для трёх входящих в неё функций: спектральной освещённости $E_{\lambda}(\mu_0, \rho_{e\lambda})$, диффузного (и полного) пропускания атмосферы $T_{\lambda}^{\text{диф}}(\mu)$ и спектральной яркости атмосферной дымки $B_{\text{атм } \lambda}(\mu, \mu_0, \varphi)$. Погрешность аппроксимации каждой из указанных функций и всей формулы (5) в целом не превышает нескольких процентов, что и обеспечивает высокую точность методики.

Освещённость поверхности Земли солнцем в выражении (5) рассчитываем в приближении Эддингтона $E_{\text{ед } \lambda}(\mu_0, \rho_{\lambda})$ (Васильев и др., 2008) с поправкой Минина (Минин, 1984) на учёт вероятности выживания кванта ω_{λ} , отличной от 1:

$$E_{\lambda}(\mu_0, \rho_{\lambda}) = \omega_{\lambda} E_{\text{ед } \lambda}(\mu_0, \rho_{\lambda}) + (1 - \omega_{\lambda}) \cdot \exp(-\tau_{\lambda}/\mu_0), \quad (7)$$

$$E_{\text{ед } \lambda}(\mu_0, \rho_{\lambda}) \equiv \frac{4\pi S_{\lambda} \mu_0}{4 + 3(1 - g_{\lambda})(1 - \rho_{\lambda})\tau_{\lambda}} \left[\left(\frac{1}{2} + \frac{3}{4}\mu_0 \right) + \left(\frac{1}{2} - \frac{3}{4}\mu_0 \right) \cdot \exp\left(-\frac{\tau_{\lambda}}{\mu_0}\right) \right]. \quad (8)$$

Здесь $S_{\lambda} = \mu_0 E_{0\lambda}/\pi$ — яркость солнечного излучения на верхней границе атмосферы ($E_{0\lambda}$ — соответствующая ей освещённость). Входящий в формулу (8) средний косинус индикатрисы рассеяния g_{λ} должен вычисляться в соответствии с определением суммарной индикатрисы рассеяния элементарного объёма (1). Поскольку средний косинус рэлеевской индикатрисы $x_m(\gamma)$ равен нулю, для g_{λ} получаем из (1) выражение:

$$g_{\lambda} = g_a \frac{\tau_a(\lambda)}{\tau_m(\lambda) + \tau_a(\lambda)}, \quad (9)$$

где g_a — средний косинус аэрозольной индикатрисы, фигурирующий в выражении (2). Погрешность приближения (7)–(8) для расчёта освещённости составляет 1–2 % (Васильев и др., 2008), что также было подтверждено проведёнными нами численными расчётами освещённости по пакету прикладных программ LibRadTran и по формулам (7)–(8) в диапазоне 0,4–1,1 мкм (Катковский, 2016).

Для функции полного пропускания (без учёта поглощений в полосах газов) $T_{\lambda}(\mu)$ нами использована достаточно точная аналитическая аппроксимация из работы (Kokhanovsky et al., 2005), которая получена для значений параметров $0 < g_{\lambda} < 0,9$; $0,2 < \mu < 1,0$; $0 < \tau_{\lambda} < 2$ с максимальной погрешностью менее 4 % для $\tau \leq 1,6$, $g_{\lambda} \leq 0,8$ и $\mu \in [0,2-1,0]$. Достоинством указанной аппроксимации $T_{\lambda}(\mu)$, кроме достаточно высокой точности, является факт, что она не содержит новых неизвестных параметров и зависит только от τ_{λ} , косинуса угла наблюдения μ и среднего косинуса индикатрисы рассеяния g_{λ} .

Для расчёта яркости атмосферной дымки $B_{\text{атм } \lambda}(\mu, \mu_0, \varphi)$ в выражении (5) используется аппроксимация, ставшая уточнением формулы, предложенной в работе (Беляев и др., 2014б):

$$\left. \begin{aligned} B_{\text{атм } \lambda}(\mu, \mu_0, \varphi) &= B_{\text{атм } \lambda}^{\text{одн}} \left[1 + q(\omega_{\lambda} \tau_{\lambda})^{1,25} \right], \\ B_{\text{атм } \lambda}^{\text{одн}} &= S_{\lambda} \frac{\omega_{\lambda}}{4} \cdot \frac{x(\gamma)}{\mu + \mu_0} \left[1 - \exp\left[-\tau_{\lambda} \left(\frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu} \right) \right] \right] \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

в которой учёт вклада многократного рассеяния в излучение атмосферной дымки осуществляется в виде квазилинейной поправки (квадратная скобка в первой формуле (10)) к приближению однократного рассеяния $B_{\text{атм } \lambda}^{\text{одн}}$. Приближение, подобное (10), предложено в работе (Васильев и др., 2015) для суммарного излучения атмосферы; мы же используем это приближение только для вклада атмосферной дымки, причём константа q является неизвестным (подгоночным) параметром модели при решении обратной задачи. Учёт вклада атмосферной дымки в однократном приближении неудовлетворителен даже для очень чистой атмосферы, тогда как представление (10) обеспечивает достаточно высокую точность (Катковский, 2016).

Совокупность выражений (5)–(10) вместе с формулами для полного пропускания $T_{\lambda}(\mu)$ (Kokhanovsky et al., 2005) даёт аналитическое представление спектра уходящего излучения, зависящее от следующих семи параметров оптической модели атмосферы и поверхности:

$$\tau_{a0}, \tau_e, \beta, g_a, m_1, q, \rho_{\lambda}. \quad (11)$$

При нахождении параметров атмосферы начальное приближение для спектрального альбедо поверхности ρ_{λ} выбирается в виде однопараметрической функции с библиотечными профилями (см. ниже), поскольку при этом можно найти только спектрально независимые параметры.

Результаты тестирования аппроксимации СПЭЯ (5)–(10) путём расчётов для различных комбинаций параметров атмосферы и геометрии задачи приведены в работе (Катковский, 2016). Максимальная погрешность аналитического представления во всём спектральном диапазоне 0,4–1,1 мкм составляет менее 4 %, за исключением полос поглощения атмосферных газов (в основном водяного пара), где погрешности в отдельных узких спектральных интервалах могут достигать до 10 %. Как показали исследования, лучшего описания спектра в полосах водяного пара можно достичь, если вместо одного параметра m_1 ввести два показателя содержания водяного пара m_{11} и m_{12} в слагаемых излучения для атмосферной дымки и для излучения, отражённого от поверхности, и вместо выражения (5) записать с учётом равенств (3) (далее для краткости везде опущены угловые переменные):

$$B_{\lambda} = \left[B_{\text{атм } \lambda} \left(T_{\text{H}_2\text{O } \lambda}^0 \right)^{m_{11}} + \frac{E_{\lambda}(\rho_{e\lambda})}{\pi} \left(T_{\lambda}^{\text{пр}} \rho_{\lambda} + \rho_{e\lambda} T_{\lambda}^{\text{диф}} \right) \cdot \left(T_{\text{H}_2\text{O } \lambda}^0 \right)^{m_{12}} \right] \left(T_{\text{O}_2 }^0 \right)^{m_2} \left(T_{\text{O}_3 }^0 \right)^{m_3}. \quad (12)$$

Алгоритм атмосферной коррекции спектров ФСС и ВСС

Для реализации процедуры атмосферной коррекции в качестве входных данных необходимы следующие функции и параметры: спектры СПЭЯ, измеренные ФСС (ВСС) с борта МКС; углы, характеризующие геометрию съёмки (зенитный угол Солнца θ_0 , определяемый географическими координатами (положением станции) и временем съёмки, зенитный угол съёмки θ , азимутальный угол съёмки φ (определяются ориентацией станции и оптической оси ФСС (ВСС), содержатся в служебных файлах съёмки); функция яркости Солнца на верхней границе атмосферы S_{λ} [Вт/м²/мкм/ср] (входит в формулы (8), (10)); безразмерные спектральные функции пропускания кислорода $T_{\text{O}_2 \lambda}$, озона $T_{\text{O}_3 \lambda}$, водяного пара $T_{\text{H}_2\text{O } \lambda}$ и диффузного пропускания атмосферы (без учёта полос) $T_{\lambda}^{\text{диф}}(\mu)$ в выражении (6). Диапазон и шаг по спектру всех спектральных функций должен соответствовать спектральному разрешению каналов спектрометра ФСС (ВСС).

При обращении спектральных измерений ФСС (ВСС) с борта МКС мы не учитываем помеху бокового подсвета, которая заключается в различных альбедо мгновенного поля зрения прибора (щели спектрометра), ρ_{λ} и соседних пикселей, $\rho_{e\lambda}$ в равенствах (5) и (12). Это связано с тем, что при съёмке с МКС область спектрометрирования, определяемая проекцией входной щели спектрометра на поверхности Земли, является достаточно протяжённой (сотни метров поперёк нескольких километров вдоль щели) и доля площади помехи бокового подсвета будет мала в сравнении с областью спектрометрирования. Поэтому для нашего случая, полагая $\rho_{e\lambda} = \rho_{\lambda}$, вместо выражения (12) получим уравнение:

$$B_{\lambda} = \left[B_{\text{атм } \lambda} \left(T_{\text{H}_2\text{O } \lambda}^0 \right)^{m_{11}} + \frac{\rho_{\lambda} E_{\lambda}(\rho_{\lambda})}{\pi} \cdot T_{\lambda} \left(T_{\text{H}_2\text{O } \lambda}^0 \right)^{m_{12}} \right] \left(T_{\text{O}_2 }^0 \right)^{m_2} \left(T_{\text{O}_3 }^0 \right)^{m_3}. \quad (13)$$

Алгоритм атмосферной коррекции состоит из следующих основных этапов:

1. На первом шаге в качестве нулевого приближения для альbedo поверхности $\rho_{\lambda} = \rho_{\lambda}^{(0)}$ (см. набор параметров (11)) возможен выбор из трёх вариантов:
 - 1.1. Если область спектрометрирования достаточно «тёмная» (значение альbedo невелико во всем спектральном диапазоне), например вода или хвойный лес, то нулевое приближение для альbedo задаётся в виде неизвестной константы:

$$\rho_{\lambda} = \rho_{\lambda}^{(0)} = c = \text{const}. \quad (14)$$

- 1.2. Если область спектрометрирования достаточно однородная, то в качестве нулевого приближения для альbedo берётся типовой (из базы данных) спектр того типа поверхности, который можно идентифицировать на сопутствующем изображении ФСС или ВСС (например, вода, почва, растительность и т. д.), умноженный на неизвестную положительную константу c :

$$\rho_{\lambda}^{(0)} = c \rho_{\lambda}^{db}. \quad (15)$$

- 1.3. Если область спектрометрирования ФСС (ВСС) неоднородная, то берётся линейная комбинация альbedo двух идентифицированных доминирующих типов поверхностей с одной неизвестной константой $0 \leq c \leq 1$:

$$\rho_{\lambda}^{(0)} = c \rho_{\lambda}^{db1} + (1 - c) \rho_{\lambda}^{db2}, \quad (16)$$

где ρ_{λ}^{db} , ρ_{λ}^{db1} , ρ_{λ}^{db2} — спектры альbedo из базы данных.

2. Нахождение в первом приближении оптических параметров атмосферы (11) и константы c из равенств (14)–(16). Вначале осуществляется фитирование (подгонка) измеренной СПЭЯ ФСС (ВСС), заданной аналитической функцией (13), методом наименьших квадратов Левенберга – Марквордта с нахождением набора неизвестных оптико-физических параметров атмосферы: τ_{a0} , τ_e , β , g_a , q , c . При этом параметры m_{11} , m_{12} в выражении (13) полагаются равными единице (m_2 , m_3 рассчитываются).
3. Уточнение (нахождение) параметров m_{11} , m_{12} , m_2 и m_3 (при фиксированных остальных τ_{a0} , τ_e , β , g_a , q , c) путём повторного фитирования теоретической и экспериментальной кривых в области полос поглощения атмосферных газов.
4. Вычисление функции искомого спектрального альbedo ρ_{λ} среднего (по пространству) в пределах спектральной щели ФСС (ВСС) из квадратного уравнения, которое получается решением уравнения (13) относительно ρ_{λ} с учётом всех формул (5)–(10), в которые подставляются только параметры атмосферы, найденные на предыдущем шаге, τ_{a0} , τ_e , β , g_a , m_{11} , m_{12} , m_2 , m_3 , q (найденная константа c не используется) и вместо B_{λ} подставляется измеренный спектрометром ФСС спектр отражения.

Заключение

Разработана методика атмосферной коррекции спектров в видимой и ближней ИК-области спектра, получаемых в процессе съёмки земной поверхности с борта МКС фотоспектральной (ФСС) и видеоспектральной (ВСС) съёмочными системами в рамках космического эксперимента «Ураган». В основе методики лежит использование аналитической аппроксимации для спектров излучения на верхней границе атмосферы, погрешность которой для безоблачной атмосферы составляет 2–5 %, что позволяет быстро («на лету») и с высокой точностью восстанавливать спектры альbedo подстилающей поверхности.

Литература

1. 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.
2. 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 // Исследование Земли из космоса. 2014. № 6. С. 27–39.
3. 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 // Исследование Земли из космоса. 2014. № 6. С. 54–65.
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 «Видео-спектральная система» на борту российского сегмента МКС // Космическая техника и технологии. 2016. № 2(13). С. 70–79.
5. Васильев А. В., Кузнецов А. Д., Мельникова И. Н. Дистанционное зондирование окружающей среды из космоса: практикум. СПб.: Балтийский гос. техн. ун-т, 2008. 133 с.
6. Васильев А. В., Кузнецов А. Д., Мельникова И. Н. Аппроксимация многократно рассеянного солнечного излучения в рамках приближения однократного рассеяния // Международный симп. «Атмосферная радиация и динамика». Санкт-Петербург, 23–26 июня 2015. СПб.: Санкт-Петербургский гос. ун-т, 2015. С. 131.
7. Гинзбург А. С., Мельникова И. Н., Самуленков Д. А., Сапунов М. В., Катковский Л. В. Простая оптическая модель безоблачной и облачной атмосферы для расчета потоков солнечной радиации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 132–149.
8. Катковский Л. В. Параметризация уходящего излучения для быстрой атмосферной коррекции гиперспектральных изображений // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 9. С. 778–784.
9. Минин И. Н. Приближенные формулы для расчетов поглощения коротковолнового излучения в безоблачной атмосфере // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1984. Т. 20. № 10. С. 999–1001.
10. Adler-Golden S. M., Matthew M. W., Bernstein L. S., Levine R. Y., Berk A., Richtsmeier S. C., Acharya P. K., Anderson G. P., Feldeb G., Gardner J., Hokeb M., Jeong L. S., Pukall B., Mello J., Ratkowski A., Burke H. H. Atmospheric correction for shortwave spectral imagery based on MODTRAN4 // Proc. SPIE. 1999. V. 3753. DOI: 10.1117/12.366315.
11. Bucholtz A. Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere // Applied Optics. 1995. V. 34. No. 15. P. 2765–2773.
12. 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.
13. Kokhanovsky A. A., Mayer B., Rozanov V. V. A parameterization of the diffuse transmittance and reflectance for aerosol remote sensing problems // Atmospheric Research. 2005. No. 73. P. 37–43.
14. Leprieur C., Carrere V., Gu X. F. Atmospheric corrections and ground reflectance recovery for Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) data: MAC Europe'91 // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1995. V. 61. No. 10. P. 1233–1238.
15. Perkins T., Adler-Golden S., Matthew M. W., Berk A., Bernstein L. S., Lee J., Fox M. Speed and accuracy improvements in FLAASH atmospheric correction of hyperspectral imagery // Optical Engineering. 2012. V. 51(11). DOI: 10.1117/1.OE.51.11.111707.
16. Vermote E. F., Tanre D., Deuze J. L., Herman M., Morcrette J. J. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S). 6S User Guide Version 6.0. NASA-GSFC, 1994. P. 134.

Atmospheric correction of data registered on board the ISS. Part I. Methodology for spectra

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

The paper describes a fast and fairly accurate method of atmospheric correction for spectra in the visible and near infrared spectral range registered by the photospectral (PhSS) and videospectral (VSS) systems from the International Space Station (ISS) during the Uragan space experiment. The model of the cloud free atmosphere that takes into account most significant processes of radiation transformation in the system underlying surface-atmosphere is described. The method is based on the determination of atmospheric parameters using the PhSS and VSS high resolution spectra by solving the inverse problem of atmospheric optics. Analytical formulas are given that describe outgoing radiation spectra of the atmosphere-surface system with high accuracy. The formulas are used in least squares method (the Levenberg-Marquardt algorithm) for fitting experimental spectra. The parameters of atmosphere and albedo of underlying surface are derived from spectra by ISS measurements. No additional a priori information on the condition of the atmosphere is required except imaging geometry, time and season. The proposed method is applicable practically unchanged to atmospheric correction of hyperspectral data.

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

Accepted: 06.10.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-213-222

References

1. 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.
2. 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.
3. Belyaev B. I., Belyaev M. Yu., Desinov L. V., Katkovskii L. V., Sarmin E. E., 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.
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., Ryzantsev V. V., Sosenko V. A., Ustroistvo i letnye ispytaniya nauchnoi apparatury “Videospektral'naya sistema” na borte 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. Vasil'ev A. V., Kuznetsov A. D., Mel'nikova I. N., *Distantionnoe zondirovanie okruzhayushchei sredy iz kosmosa: praktikum* (Remote sensing of the environment from space: a workshop), Saint-Petersburg: Baltiiskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet, 2008, 133 p.
6. Vasil'ev A. V., Kuznetsov A. D., Mel'nikova I. N., *Approksimatsiya mnogokratno rasseyannogo solnechnogo izlucheniya v ramkakh priblizheniya odnokratnogo rasseyaniya* (Approximation of multiply scattered solar radiation in the framework of a single scattering), *Mezhdunarodnyi simpozium “Atmosfernaya radiatsiya i dinamika”* (Intern. Symp. “Atmospheric Radiation And Dynamics”), Saint-Petersburg, 23–26 June 2015, Saint-Petersburg: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet, 2015, p. 131.

7. Ginzburg A. S., Mel'nikova I. N., Samulenkov D. A., Sapunov M. V., Katkovskii L. V., Prostaya opticheskaya model' bezoblachnoi i oblachnoi atmosfery dlya rascheta potokov solnechnoi radiatsii (Simple optical model of clear sky and cloudy atmosphere for calculation of solar irradiance), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 2, pp. 132–149.
8. Katkovskii L. V., Parametrizatsiya ukhodyashchego izlucheniya dlya bystroj atmosfernoj korrektsii giperspektral'nykh izobrazhenii (Parameterization of outgoing radiation for quick atmospheric correction of hyperspectral image), *Optika atmosfery i okeana*, 2016, Vol. 29, No. 9, pp. 778–784.
9. Minin I. N., Priblizhennyye formuly dlya raschetov pogloshcheniya korotkovolnovogo izlucheniya v bezoblachnoi atmosfere (Approximate formulas for calculating the absorption of short-wave radiation in a cloudless atmosphere), *Izvestiya AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1984, Vol. 20, No. 10, pp. 999–1001.
10. Adler-Golden S. M., Matthew M. W., Bernstein L. S., Levine R. Y., Berk A., Richtsmeier S. C., Acharya P. K., Anderson G. P., Feldeb G., Gardner J., Hokeb M., Jeong L. S., Pukall B., Mello J., Ratkowski A., Burke H. H., Atmospheric correction for shortwave spectral imagery based on MODTRAN4, *Proc. SPIE*, 1999, Vol. 3753, DOI: 10.1117/12.366315.
11. Bucholtz A., Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere, *Applied Optics*, 1995, Vol. 34, No. 15, pp. 2765–2773.
12. 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.
13. Kokhanovsky A. A., Mayer B., Rozanov V. V., A parameterization of the diffuse transmittance and reflectance for aerosol remote sensing problems, *Atmospheric Research*, 2005, No. 73, pp. 37–43.
14. Leprieur C., Carrere V., Gu X. F., Atmospheric corrections and ground reflectance recovery for Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) data: MAC Europe'91, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1995, Vol. 61, No. 10, pp. 1233–1238.
15. Perkins T., Adler-Golden S., Matthew M. W., Berk A., Bernstein L. S., Lee J., Fox M., Speed and accuracy improvements in FLAASH atmospheric correction of hyperspectral imagery, *Optical Engineering*, 2012, Vol. 51(11), DOI: 10.1117/1.OE.51.11.111707.
16. Vermote E. F., Tanre D., Deuze J. L., Herman M., Morcrette J. J., Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S), *6S User Guide Version 6.0*, NASA-GSFC, 1994, p. 134.