

# Параметризация уходящего излучения для быстрой атмосферной коррекции гиперспектральных изображений

Л.В. Катковский\*

НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета  
220045, г. Минск, ул. Курчатова, 7, Беларусь

Поступила в редакцию 18.05.2016 г.

Предложена аналитическая аппроксимация спектров уходящего излучения на верхней границе безоблачной атмосферы в видимой и ближней ИК-области спектра и основанная на ней быстрая методика атмосферной коррекции. Для получения аналитических формул используется параметризация вкладов отдельных составляющих излучения и достаточно простая оптическая модель атмосферы, включающая небольшое число параметров (5–7), существенных с точки зрения влияния на перенос излучения. При этом в методике не требуется использования априорной информации о параметрах атмосферы или земной поверхности. Для определения неизвестных параметров модели путем решения обратной задачи с аналитической целевой функцией используются только сами корректируемые данные (изображения) с числом спектральных каналов, не меньшим числа неизвестных параметров. Разработанная методика предназначена в первую очередь для коррекции гиперспектральных изображений либо спектральноналичных и мультиспектральных изображений, съемка которых сопровождается измерением спектров отдельных пространственных зон на изображениях (спектрометр, работающий параллельно с системой съемки изображений).

Предложенная аппроксимация отличается достаточно высокой точностью, что проверено на большом количестве вариантов расчетов спектров уходящего излучения с использованием программ решения прямой задачи переноса излучения.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, гиперспектральные изображения, спектр уходящего излучения, параметризация, оптическая модель атмосферы, атмосферная коррекция; remote sensing, hyperspectral images, spectrum of outgoing radiation, parameterization, optical model of atmosphere, atmospheric correction.

## Введение

Атмосферная коррекция изображений и спектров, регистрируемых с борта авиакосмических носителей, является необходимым звеном обработки данных в первую очередь видимого и ближнего ИК-диапазона спектра, если задачей обработки является получение количественной (или даже качественной) информации об объектах земной поверхности и параметрах их состояния.

Методы атмосферной коррекции могут быть разделены на две категории [1]: эмпирические методы и методы, основанные на моделях переноса излучения. Последние являются более точными, но, в свою очередь, требуют более сложных вычислений, а также для них необходимо знание большего числа параметров атмосферы. Например, в работе [2] подробно описана методика коррекции данных AVIRIS путем обращения результатов расчета параметров атмосферы, выполненных в программе 5S, а в работе [3] представлены результаты сравнения коррекции с помощью программ 5S и LOWTRAN-7 на примере данных AVIRIS. Эмпи-

рические методы используют некоторые априорные данные об объекте, с помощью которых можно провести атмосферную коррекцию дистанционных данных без непосредственного моделирования атмосферы.

Существует ряд специализированных программ для атмосферной коррекции [4]: ACORN (Atmospheric CORrection Now) [5], основана на MODTRAN-4; ATCOR (ATmospheric CORrection) [6], используется в программе ERDAS Imagine; ATREM (ATmospheric REMoval) [7]; FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) [8, 9], используется в программе ENVI; HATCH (High-accuracy ATmospheric Correction for Hyperspectral data) [10, 11]; Tafkaa [12], основана на ATREM. Большинство из них разработаны для конкретных спутниковых съемочных систем, определенного спектрального диапазона, набора каналов, спектрального и пространственного разрешений. Недостатками многих методик является использование сложных программ решения прямой задачи переноса излучения и алгоритмов решения обратной задачи, что требует значительных временных затрат, а также привлечения априорных данных о параметрах атмосферы. Поэтому разработка быстрых методик атмосферной коррекции, не

\* Леонид Владимирович Катковский (katkovskyl@gmail.com, katkovskyl@bsu.by, katkovskyl@yahoo.com, remsens@mail.ru).

требующих проведения объемных расчетов, привлечения априорных данных и обладающих необходимой точностью восстановления спектра отражения подстилающей поверхности, не теряет своей актуальности.

Методы, основанные на расчетах переноса излучения, используют определенные модели атмосферы, в которых учитываются главные атмосферные эффекты для рассматриваемого диапазона длин волн 0,35–1,1 мкм: аэрозольное ослабление, молекулярное рассеяние, поглощение водяным паром, кислородом, озоном. Основными входными параметрами для этих моделей служат: геометрия расположения Солнца и датчика, атмосферная модель для газообразных компонентов, модель аэрозоля (тип, концентрация и высотные профили), спектральные каналы, альbedo земной поверхности [13, 14].

За последние десятилетия разработан ряд компьютерных программ для решения прямой задачи оптики и определения оптических параметров атмосферы. Среди них наиболее известными являются программы LOWTRAN, MODTRAN и FASCODE [15], предназначенные для расчетов нисходящего и восходящего излучения в атмосфере на вертикальной и наклонных трассах с учетом молекулярного рассеяния, аэрозольного ослабления и газового поглощения (с использованием базы данных HITRAN, содержащей информацию о газовых компонентах атмосферы). Однако эти программы, ориентированные, главным образом, на расчет пропускания атмосферы в молекулярных полосах поглощения, недостаточно хорошо описывают многократное рассеяние и, соответственно, диффузную компоненту восходящего излучения, существенную для излучения, регистрируемого спутниковым сенсором, и атмосферной коррекции. Корректный расчет яркости многократно рассеянного излучения вне полос поглощения атмосферных газов выполняется в программе COART (Coupled Ocean and Atmosphere Radiative Transfer) [16, 17], основанной на коде DISORT, использующем метод дискретных ординат. Программа COART позволяет выполнять расчеты переноса излучения в системе атмосфера–океан и, как вариант, в системе атмосфера – подстилающая поверхность, однако в последнем случае – с постоянным по спектру альbedo. Именно эта программа (и в ряде случаев LibRadTran) использована нами для расчетов уходящего излучения с целью построения аналитических аппроксимаций спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) излучения на верхней границе атмосферы.

## Модель атмосферы

Предлагаемая аппроксимация обеспечивает расчет значений СПЭЯ уходящего излучения на основе простой модели безоблачной атмосферы по аналитическим формулам, которые используются затем для решения обратной задачи. Построение той или иной оптической модели атмосферы является необходимым этапом при решении обратной задачи. Развитие компьютерной техники способст-

вовало усложнению моделей атмосферы с детализацией вертикальных профилей по слоям. При этом все чаще применяются численные алгоритмы расчета радиационных характеристик, обеспечивающие постоянное уменьшение погрешности. Построены компьютерные коды, включающие табличное задание характеристик атмосферы и сложные схемы расчета оптических параметров для широтных зон и разных сезонов, которые полезны для решения прикладных задач [18]. Однако в задачах исследования влияния отдельных факторов на радиационные характеристики, в моделях климата либо при необходимости выделить отдельные компоненты излучения простые модели атмосферы дают возможность оперативно варьировать параметры атмосферы, получать результаты, ненамного уступающие в точности результатам сложных моделей, и эффективно выявлять взаимосвязи параметров атмосферы и спектров излучения [19].

Анализ проведенных многочисленных расчетов СПЭЯ уходящего излучения для различных углов Солнца и наблюдения показал, что спектр уходящего излучения [20] слабо зависит от вертикальной стратификации атмосферы, вертикальных профилей оптических параметров и может быть достаточно точно описан с использованием интегральных (в некотором смысле, эффективных) по толщине атмосферы значений параметров, существенных с точки зрения теории переноса излучения. Такими параметрами являются (в дополнение к угловым переменным, описывающим геометрию задачи): спектральные оптические толщины (по молекулярному рассеянию и аэрозольному ослаблению), параметр индикатрисы рассеяния (средний косинус), альbedo однократного рассеяния, спектральное альbedo поверхности, интегральное (в столбе атмосферы) содержание водяного пара. Причем наиболее чувствителен спектр уходящего излучения к изменениям среднего косинуса индикатрисы, оптической толщины аэрозоля и альbedo поверхности.

Используемая нами оптическая модель атмосферы включает процессы молекулярного рассеяния, аэрозольного рассеяния и поглощения [21], газового поглощения в полосах кислорода, водяного пара и озона и описывается интегральными по высоте спектральными оптическими толщинами атмосферы. Индикатриса рассеяния представляется в приближении Хеньи–Гринштейна с независимым от высоты рассеивающего слоя в атмосфере и длины волны значением среднего косинуса  $g$ . Таким образом, определим следующие параметры оптической модели безоблачной атмосферы.

1. Полная вертикальная оптическая толщина на длине волны  $\lambda$  без учета оптической толщины по газовому поглощению:

$$\tau(\lambda) = \tau_m(\lambda) + \tau_a(\lambda) + \tau_e(\lambda), \quad (1)$$

где  $\tau_m(\lambda)$  – оптическая толщина по молекулярному (рэлеевскому) рассеянию,  $\tau_a(\lambda)$  – оптическая толщина по аэрозольному рассеянию,  $\tau_e(\lambda)$  – оптическая толщина по аэрозольному поглощению.

2. Альbedo однократного рассеяния (вероятность выживания кванта) вычисляется через введенные оптические толщины:

$$\Lambda_\lambda = [\tau_m(\lambda) + \tau_a(\lambda)] / [\tau_m(\lambda) + \tau_a(\lambda) + \tau_e(\lambda)]. \quad (2)$$

Спектральные оптические толщины атмосферы аппроксимируются в рамках нашей модели степенными функциями:

$$\begin{cases} \tau_m(\lambda) = \tau_{m0}(\lambda_0/\lambda)^4; \\ \tau_a(\lambda) = \tau_{a0}(\lambda_0/\lambda)^n, \quad 0 < n \leq 4, \quad \tau_e(\lambda) = \text{const}, \end{cases} \quad (3)$$

$\tau_{m0}$ ,  $\tau_{a0}$  — значения соответствующих оптических толщин на опорной длине волны  $\lambda_0$  — неизвестные параметры модели при решении обратной задачи.

3. Спектральное альbedo подстилающей поверхности  $A_\lambda$ , отражение считается ламбертовским.

4. Суммарная индикатриса рассеяния Хенби–Гринштейна

$$\begin{aligned} x(\gamma) &= (1 - g^2) / (1 + g^2 - 2g\gamma)^{3/2}; \\ \gamma &= -\mu_0 + \sqrt{(1 - \mu^2)(1 - \mu_0^2)} \cos\varphi \end{aligned} \quad (4)$$

со средним косинусом  $g$ , не зависящим от длины волны;  $\gamma$  — косинус угла рассеяния; зенитный угол Солнца  $\theta_0 = \arccos\mu_0$ ;  $\mu$  — косинус зенитного угла наблюдения  $\theta$ ;  $\varphi$  — азимутальный угол направления распространения излучения относительно плоскости солнечного вертикала.

Учет поглощения излучения в полосах основных газовых составляющих атмосферы (водяного пара, озона и кислорода) осуществляется фильтровым способом, т.е. общее выражение для СПЭЯ на верхней границе атмосферы, записанное без учета поглощения газовыми компонентами атмосферы, умножается на произведение пропусканий трех газовых компонент:

$$T_g(\lambda) = T_\lambda(\text{H}_2\text{O})T_\lambda(\text{O}_2)T_\lambda(\text{O}_3). \quad (5)$$

Для учета пропускания в полосах поглощения указанных газов были рассчитаны пропускания атмосферы для стандартных значений поглощающих масс (среднестатистической стандартной атмосферы) каждой из указанных компонент со спектральным разрешением 2 нм при расположении Солнца в зените, при наблюдении в надир, при двукратном прохождении излучения (к Земле и обратно) и среднем альbedo поверхности 0,2. Указанные пропускания приведены на рис. 1. Для пропускания с поглощающей массой, отличающейся в  $m$  раз от стандартной, и других углов Солнца и наблюдения необходимо воспользоваться следующим выражением для пропускания каждого из газов:

$$T_g(\lambda) = [T_g^0(\lambda)]^{m\left(\frac{1}{\mu_0} + \mu\right)}, \quad (6)$$

где  $T_g^0(\lambda)$  — стандартное пропускание газа для указанных выше условий.

Однако, так как вариации озона незначительны и, как правило, оказывают небольшое влияние, в методике используется фиксированное значение концентрации озона, равное 330 е.Д. на уровне моря, представляющее средние условия. Функция пропускания кислорода  $T_\lambda(\text{O}_2)$  также фиксирована (не содержит неизвестных параметров), обе функции (для озона и кислорода) зависят только от зенитных углов Солнца и наблюдения. В свою очередь, ввиду значительной изменчивости, функция пропускания водяного пара зависит (кроме указанных углов) от дополнительного неизвестного параметра — коэффициента  $m$  отличия поглощающей массы от стандартной, который является подгоночным параметром (эффективной величиной), учитываемым в том числе то, что при умножении вклада атмосферной дымки на пропускание эффективный путь прохождения излучения меньше, чем двойная толщина атмосферы.

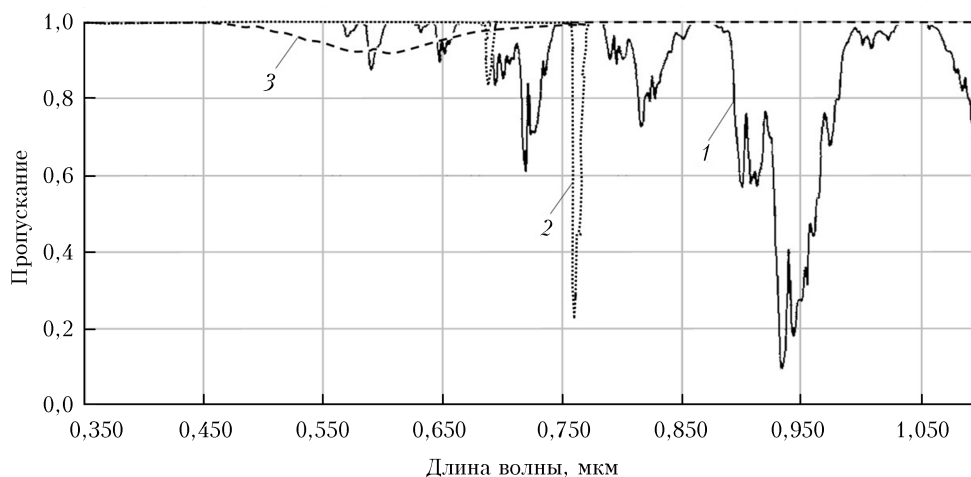


Рис. 1. Спектральные пропускания водяного пара (1), молекулярного кислорода (2) и озона (3)

## Аналитическое представление СПЭЯ на верхней границе атмосферы

В рамках рассматриваемых допущений СПЭЯ на верхней границе атмосферы может быть представлена в виде [20]:

$$B(\lambda, \mu, \mu_0, \varphi) = T_g(\lambda) \left[ B_{\text{атм}}(\lambda, \mu, \mu_0, \varphi) + \frac{A_\lambda}{\pi} E(\lambda, \mu_0) T_A(\lambda, \mu) \right], \quad (7)$$

где  $B_{\text{атм}}(\lambda, \mu, \mu_0, \varphi)$  является яркостью атмосферной дымки (соответствует  $A_\lambda = 0$ ), второе слагаемое описывает яркость излучения, отраженного от исследуемой поверхности с учетом полного пропускания атмосферы до ее верхней границы (далее в тексте это слагаемое будем называть «прямое излучение пикселя»), а  $A_\lambda$  — среднее по мгновенному полю зрения прибора альbedo поверхности (определение этой функции и является задачей атмосферной коррекции);  $E(\lambda, \mu_0)$  — освещенность исследуемого участка поверхности;  $T_A(\lambda, \mu)$  — полное (прямое плюс диффузное) пропускание молекулярной и аэрозольной атмосферы (без газовых компонент) вверх (от поверхности к спутнику):

$$T_A(\lambda, \mu) = \exp(-\tau(\lambda) / \mu) + t^{\text{диф}}(\lambda, \mu). \quad (8)$$

В выражении (7) освещенность поверхности Земли Солнцем предлагается рассчитывать в приближении Эддингтона [22], являющегося разновидностью двухпоточковых приближений для решения уравнения переноса, для случая вероятности

выживания кванта  $\Lambda = 1$ , с поправкой Минина [23, 24] на случай, если  $\Lambda \neq 1$ :

$$E(\lambda, \mu_0) = \Lambda_\lambda E_{\text{Эд}}(\lambda, \mu_0) + (1 - \Lambda_\lambda) \pi S_\lambda \mu_0 \exp(-\tau(\lambda) / \mu_0);$$

$$E_{\text{Эд}}(\lambda, \mu_0) \equiv \frac{4\pi S_\lambda \mu_0}{4 + 3(1 - g)(1 - A_\lambda)\tau(\lambda)} \times \left[ \left( \frac{1}{2} + \frac{3}{4}\mu_0 \right) + \left( \frac{1}{2} - \frac{3}{4}\mu_0 \right) \exp\left(-\frac{\tau(\lambda)}{\mu_0}\right) \right]. \quad (9)$$

Здесь  $S_\lambda = \mu_0 E_{\lambda,0} / \pi$  — спектральная яркость солнечного излучения на верхней границе атмосферы,  $E_{\lambda,0}$  — спектральная освещенность площадки, перпендикулярной солнечным лучам, на верхней границе атмосферы. Погрешность приближения (9) для расчета потоков (освещенностей) и притоков солнечной радиации составляет 1–2% [22], что также было подтверждено сравнениями проведенных нами точных расчетов освещенности по программе COART и формулам (9) в спектральном диапазоне 0,35–1,1 мкм (рис. 2).

Для функции полного пропускания (без учета поглощений в полосах газов)  $T_A(\lambda, \mu)$  вверх предлагается использовать достаточно точную аналитическую аппроксимацию из работы [25], которая получена для значений параметров  $0 < g < 0,9$ ;  $0,2 < \mu < 1,0$ ;  $0 < \tau_\lambda < 2$  с максимальной погрешностью около 8% для  $g \in [0; 0,9]$ ,  $\tau \in [0; 2]$ ,  $\mu \in [0,2; 1,0]$  и погрешностью менее 4% для  $\tau \leq 1,6$ ,  $g \leq 0,8$  и  $\mu \in [0,2; 1,0]$ .

Расчетные формулы для полного пропускания  $T_A(\lambda, \mu)$  от поверхности до спутника имеют следующий вид:

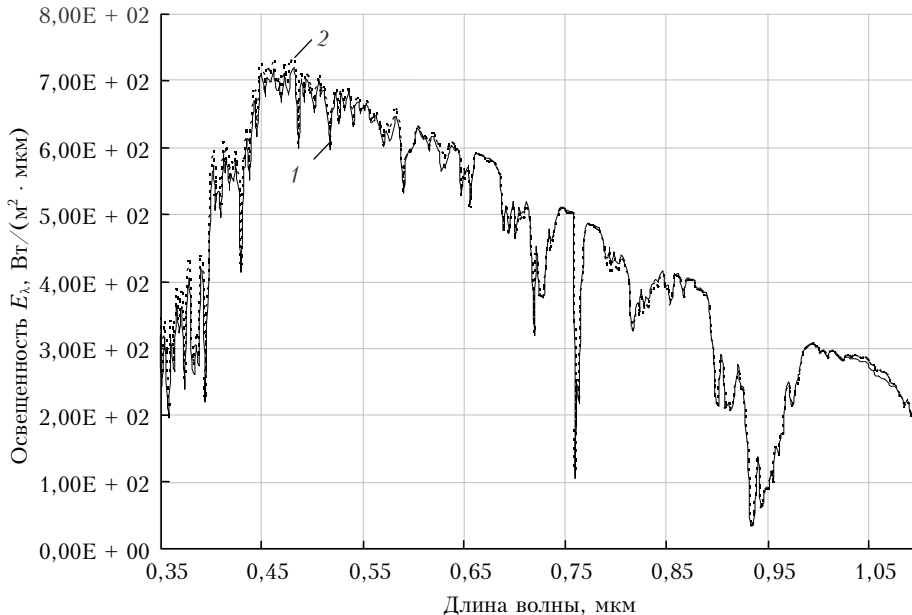


Рис. 2. Расчет освещенности поверхности Земли по программе COART (1) и по аналитическим формулам (9) (2). Основные параметры расчета: зенитный угол Солнца  $60^\circ$ ; модель атмосферы Mid-Latitude Summer; модель аэрозоля в слое смешения — MODTRAN Tropospheric; вертикальная оптическая толщина по аэрозольному ослаблению на длине волны 0,55 мкм 0,29 (полная 0,43); средний косинус индикатрисы 0,3; содержание воды в столбе 2,5 г/см<sup>2</sup>

$$T_A(\lambda, \mu) = \exp(-\tau_\lambda/\mu) + \tau_\lambda \exp[-u(\mu, g) - v(\mu, g)\tau_\lambda - w(\mu, g)\tau_\lambda^2], \quad (10)$$

где

$$u(\mu, g) = \sum_{m=0}^3 h_m \mu^m = \quad (11)$$

$$= h_0 + h_1 \mu + h_2 \mu^2 + h_3 \mu^3, h_m = \sum_{s=0}^3 h_{ms} g^s; \quad (12)$$

$$v(\mu, g) = p_0 + p_1 \exp(-p_2 \mu), p_m = \sum_{s=0}^3 p_{ms} g^s; \quad (12)$$

$$w(\mu, g) = q_0 + q_1 \exp(-q_2 \mu), q_m = \sum_{s=0}^3 q_{ms} g^s. \quad (13)$$

В формулах (11)–(13)  $h_{ms}$ ,  $p_{ms}$ ,  $q_{ms}$  – известные числовые коэффициенты, рассчитанные в работе [25] для уравнений регрессии в (11)–(13) путем численного моделирования переноса излучения. Достоинством аппроксимация (10)–(13) функции полного пропускания атмосферы вверх  $T_A(\lambda, \mu)$ , кроме достаточно высокой точности, является то, что она не содержит новых неизвестных параметров и зависит только от  $\tau_\lambda$ , угла наблюдения  $\mu$  и среднего косинуса индикатрисы  $g$ .

Для расчета спектральной яркости атмосферной дымки  $B_{\text{атм}}(\lambda, \mu, \mu_0, \varphi)$  в (7) предлагается следующая аппроксимационная формула:

$$B_{\text{атм}}(\lambda, \mu, \mu_0, \varphi) = B_{\text{атм}}^{\text{одн}}(\lambda) \left[ 1 + \alpha (\Lambda_\lambda \tau_A(\lambda))^{1,25} \right], \quad (14)$$

в которой учет вклада многократного рассеяния в излучение атмосферной дымки осуществляется в виде поправки к однократному,  $B_{\text{атм}}^{\text{одн}}(\lambda)$  – СПЭЯ дымки в приближении однократного рассеяния. Приближение (14) предложено и исследовано в работе [26] для суммарного излучения атмосферы, мы же используем это приближение только для вклада атмосферной дымки (случай  $A_\lambda = 0$ ), причем константа  $\alpha$  является неизвестной (подгоночным параметром модели). Подобная аппроксимация также была предложена нами в работе [20]. Учет вклада атмосферной дымки в однократном приближении, как показывают расчеты, совершенно неудовлетворителен даже для очень чистой атмосферы, тогда как представление (14) обеспечивает высокую точность, как показано ниже.

Совокупность формул (7)–(14) дает аналитическое представление спектра уходящего излучения, зависящее от следующих семи параметров оптической модели атмосферы:

$$\tau_e, \tau_{m0}, \tau_{a0}, n, g, A_\lambda, m. \quad (15)$$

Заметим при этом, что спектральное альbedo может быть задано в виде не более чем двух-параметрической функции (например, линейной по  $\lambda$  для почвы, воды и пр.). На данном этапе исследований считалось  $A_\lambda = \text{const}$  (для атмосферной коррекции выбираются пиксели на изображении с почти постоянным альbedo в некоторой спектральной области). Кроме того, для улучшения точности решения и устойчивости обратной задачи параметры  $\tau_{m0}$  (рэлеевская оптическая толщина на длине волны  $\lambda_0 = 0,55$  мкм) и  $m$  (количество водяного пара в столбе атмосферы) могут вначале быть взяты из средних региональных моделей (или метеоданных в районе измерений). Таким образом, число неизвестных параметров модели может быть сокращено до пяти.

## Результаты тестирования аналитической аппроксимации СПЭЯ

Точность приближения (8)–(14) исследовалась сравнениями с расчетами в программе COART, в которой имеется возможность задавать собственные спектральные профили для оптической толщины атмосферы, альbedo однократного рассеяния и среднего косинуса индикатрисы. Они рассчитывались по формулам (1)–(3) и  $g = \text{const}$ . При этом высотные профили атмосферных параметров в COART подставляются в соответствии с выбранной пользователем стандартной моделью атмосферы и типом аэрозоля (например, Atmospheric profile: MLS – Mid-Latitude Summer, Boundary layer aerosol model: MODTRAN Tropospheric). В проведенных расчетах, как указывалось выше, альbedo подстилающей поверхности выбиралось постоянным по спектру (что связано с особенностью задания его в программе COART), однако это не ограничивает общности рассмотрения, поскольку (7) представляет собой совокупность монохроматических уравнений (каждая длина волны независима от других).

Были проведены массовые расчеты для различных комбинаций параметров оптической модели атмосферы и геометрии задачи (углов Солнца и наблюдения), диапазоны изменений которых приведены в таблице.

Диапазоны изменений основных параметров при проведении расчетов

Солнце	Наблюдение		Аэрозоль (на $\lambda_0 = 0,55$ мкм)				Альbedo поверхности $A$	Содержание воды $m(\text{H}_2\text{O})$ , г/см <sup>2</sup>
	Зенитный угол, град	Азимут, град	Оптическая толщина $\tau_{a0}$	Показатель степени $n$	Средний косинус индикатрисы $g$	Оптическая толщина аэрозольного поглощения $\tau_e$		
15–60	0–30	0–180	0,14–0,35	0,9–3,7	0,3–0,75	0,04	0,03–0,25	1,2–4,2

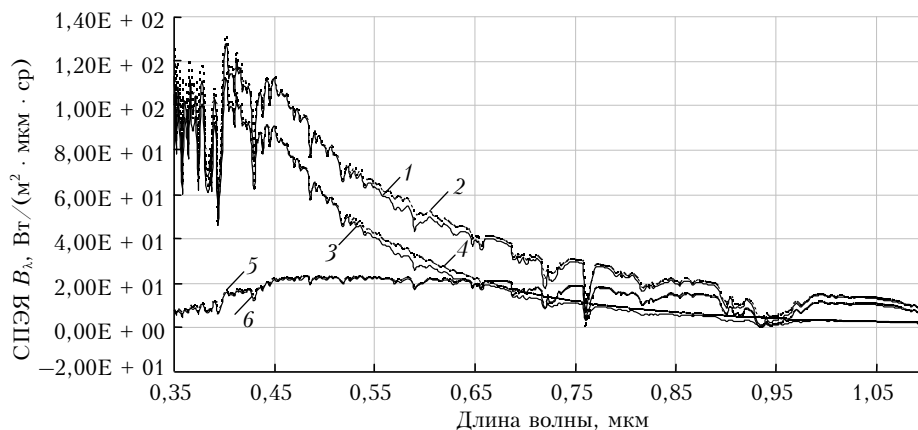


Рис. 3. Расчет полной СПЭЯ (1, 2), вклада атмосферной дымки (3, 4) и прямого излучения от поверхности Земли (полное минус дымка) (5, 6) по программе COART (1, 3, 5) и по аналитическим формулам (2, 4, 6) для следующих значений параметров: зенитный угол Солнца  $\theta_0 = 35^\circ$ , зенитный угол наблюдения  $\theta = 15^\circ$ , азимут наблюдения  $\varphi = 180^\circ$ ,  $\tau_{m0}(0,55) = 0,101$ ,  $\tau_{a0}(0,55) = 0,35$ ,  $n = 2$ ,  $g = 0,45$ ,  $\tau_c(\lambda) = \text{const} = 0,04$ ,  $A_\lambda = \text{const} = 0,07$ ,  $m(\text{H}_2\text{O}) = 4,2 \text{ г/см}^2$

Один из вариантов типичного результата таких расчетов показан на рис. 3, где приведены три пары спектров (точные спектры уходящего излучения (COART) и рассчитанные по предложенной аналитической аппроксимации): прямое излучение пикселя, вклад атмосферной дымки и их сумма (полное СПЭЯ).

### Заключение

По всем вариантам расчетов минимальная погрешность аналитического представления имеет место для спектрального профиля прямого излучения пикселя, максимальная погрешность которого в спектральном диапазоне 0,4–0,65 мкм менее 4%, а в диапазоне 0,35–1,1 мкм – до 10%. Причем наибольшие погрешности наблюдаются в полосах поглощения газов, что говорит о необходимости использования более точных профилей пропускания. Указанный факт позволяет использовать для атмосферной коррекции в первую очередь спектр прямого излучения, который можно получить методом вычитания темного объекта, если таковой имеется на изображении. В этом же диапазоне спектра максимальная погрешность атмосферной дымки (и полного СПЭЯ) в узких спектральных областях может достигать 8–10%, что связано опять же с недостаточным точным представлением профилей поглощения газовых полос в формулах для атмосферной дымки. Наибольшие погрешности наблюдаются в районе полос поглощения водяного пара и кислорода, более точный учет которых будет предметом следующей статьи. Однако поглощающие массы водяного пара и кислорода могут быть оценены предварительно в рамках отдельной процедуры, как это делается, например, в ATCOR [6], на основе значений спектра внутри каждой из полос поглощения и соседних точках вне полосы. Кроме того, для решения обратной задачи на основе аналитического представления можно использовать только видимую область спектра 0,4–0,7 мкм, где полосы воды слабые (см. рис. 1), погрешности

аналитического представления минимальные, а искажающее влияние атмосферы (из-за сильного рассеяния) наибольшее.

На основе предложенной аппроксимации разработана инженерная методика атмосферной коррекции спектров и гиперспектральных изображений.

1. Eismann M. Hyperspectral Remote Sensing. SPIE Press, 2012. 725 p.
2. Zagolski F., Gastellu-Etchegorry J.P. Atmospheric corrections of AVIRIS images with a procedure based on the inversion of the 5S model // Int. J. Remote Sens. 1995. V. 16, N 16. P. 3115–3146.
3. Leprieux C., Carrere V., Gu X.F. Atmospheric corrections and ground reflectance recovery for Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) data: MAC Europe'91 // Photogram. Eng. Remote Sens. 1995. V. 61, N 10. P. 1233–1238.
4. Шюенцерт P.A. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
5. Miller C.J. Performance assessment of ACORN atmospheric correction algorithm // SPIE. 2002. V. 4725. P. 438–449.
6. Richter R., Schlapfer D. Geo-atmospheric processing of airborne imaging spectrometry data. Part 2: Atmospheric/topographic correction // Int. J. Remote Sens. 2002. V. 23, N 13. P. 2631–2649.
7. Gao B.-C., Heidebrecht K.B., Goetz A.F.H. Derivation of scaled surface reflectances from AVIRIS data // Remote Sens. Environ. 1993. N 44. P. 165–178.
8. Adler-Golden S.M., Matthew M.W., Bernstein L.S., Levine R.Y., Berk A., Richtsmeier S.C., Acharya P.K., Anderson G.P., Felde G., Gardner J., Hokeb M., Jeong L.S., Pukall B., Mello J., Ratkowski A., Burke H.H. Atmospheric correction for short-wave spectral imagery based on MODTRAN4 // SPIE. 1999. V. 3753. P. 61–69.
9. Matthew M.W., Adler-Golden S.M., Berk A., Richtsmeier S.C., Levine R.Y., Bernstein L.S., Acharya P.K., Anderson G.P., Felde G.W., Hoke M.P., Ratkowski A., Burke H.-H., Kaiser R.D., Miller D.P. Status of atmospheric correction using a MODTRAN4-based algorithm // SPIE. 2000. V. 4049. P. 199–207.

10. Goetz A.F.H., Kindel B.C., Ferri M., Qu Z. HATCH: Results from simulated radiances, AVIRIS and Hyperion // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003. V. 6. N 41. P. 1215–1222.
  11. Qu Z., Kindel B.C., Goetz A.F.H. The high accuracy atmospheric correction for hyperspectral data (HATCH) model // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003. V. 6, N 41. P. 1223–1231.
  12. Montes M.J., Gao B.-C., Davis C.O. Tafkaa atmospheric correction of hyperspectral data // SPIE. 2003. V. 5159. P. 188–197.
  13. Shunlin L., Hongliang F., Mingzhen C. Atmospheric Correction of Landsat ETM+ Land Surface Imagery – Part I: Methods // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2001. V. 39, N 11. P. 2490–2498.
  14. Richter R., Schläpfer D., Müller A. An automatic atmospheric correction algorithm for visible/NIR imagery // Int. J. Remote Sen. 2006. V. 27, N 10. P. 2077–2085.
  15. Handbook of Optics. Volume 5. Atmospheric Optics, Modulators, Fiber Optics, X-Ray and Neutron Optic / 3rd ed., ed. by M. Bass et al. N. Y. 2010. 1280 p.
  16. URL: <http://cloudsgate2.larc.nasa.gov/jin/coart.html> (дата обращения 6.04.2016).
  17. Jin Z., Charlock Thomas P., Rutledge K., Stannes K., Wang Y. Analytical solution of radiative transfer in the coupled atmosphere–ocean system with a rough surface // Appl. Opt. 2006. V. 45, N 28. P. 7443–7455.
  18. Гинзбург А.С., Романов С.В., Фомин Б.А. Использование радиационно-конвективной модели для оценки температурного потенциала парниковых газов // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2008. Т. 44, № 3. С. 324–331.
  19. 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 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/290993526/> (дата обращения 6.04.2016).
  20. Беляев Б.И., Беляев М.Ю., Десинов Л.В., Катковский Л.В., Сармин Э.Э. Обработка спектров и изображений с фотоспектральной системы в космическом эксперименте «Ураган» на МКС // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 6. С. 54–65.
  21. Беляев Б.И., Катковский Л.В. Оптическое дистанционное зондирование. Минск: БГУ, 2006. 455 с.
  22. Васильев А.В., Кузнецов А.Д., Мельникова И.Н. Дистанционное зондирование окружающей среды из космоса: Практикум, СПб.: Балт. гос. техн. ун-т., 2008. 133 с.
  23. Минин И.Н. Приближенные формулы для расчетов поглощения коротковолнового излучения в безоблачной атмосфере // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1984. Т. 20, № 10. С. 999–1001.
  24. Беляев Б.И., Беляев М.Ю., Десинов Л.В., Катковский Л.В., Крот Ю.А., Сармин Э.Э. Результаты испытаний фотоспектральной системы на МКС // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 6. С. 27–39.
  25. Kokhanovsky A.A., Mayer B., Rozanov V.V. A parameterization of the diffuse transmittance and reflectance for aerosol remote sensing problems // Atmos. Res. 2005. N 73. P. 37–43.
- Васильев А.В., Кузнецов А.Д., Мельникова И.Н. Аппроксимация многократно рассеянного солнечного излучения в рамках приближения однократного рассеяния // Int. Symp. «Atmospheric Radiation and Dynamics» (ISARD 2015), Saint-Petersburg-Petrodvorets, June 23–26, 2015. P. 131.

**L.V. Katkovsky. Parameterization of outgoing radiation for quick atmospheric correction of hyperspectral images.**

An analytical approximation of outgoing radiation spectra at the top of the cloudless atmosphere in the visible and near infrared spectral regions and a method for atmospheric correction, which is based on the former, are suggested. The parameterization of the contributions of individual radiation components and a quite simple optical model of the atmosphere are used for derivation of analytical formulas. The optical model of the atmosphere includes several (5–7) parameters that are essential in terms of the effect on the radiation transfer. There is no need in a priori information about atmosphere or Earth's surface parameters in this method. In order to determine unknown parameters of the model by solving an inverse problem with an analytical objective function, only the data to be corrected (images) with the number of spectral channels no less than the number of unknown parameters are used. The method developed is primarily intended for the correction of hyperspectral or multispectral images, which are made along with measurements of the spectra of individual spatial zones in the images (a spectrometer which operates simultaneously with the imaging system). The approximation suggested is highly accurate, which was checked in numerous calculations of outgoing radiation spectra with the use of software for the solution of the direct problem of radiation transfer.