



DOI: 10.36023/ujrs.2020.25.170

УДК 528.8

Атмосферная коррекция многоспектральных спутниковых изображений

Л. В. Катковский *

Научно-исследовательское учреждение “Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко”
Белорусского государственного университета, ул. Курчатова 7, Минск 220045, Республика Беларусь

Атмосферная коррекция является необходимым этапом обработки изображений, регистрируемых с борта авиакосмических носителей, в первую очередь, в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра.

В статье описывается разработанный метод атмосферной коррекции для многоспектральных спутниковых данных с небольшим количеством относительно широких спектральных каналов (не гиперспектральных), основанный на предложенных аналитических соотношениях, описывающих с достаточно высокой точностью спектр уходящего излучения на верхней границе безоблачной атмосферы. Метод включает модель атмосферы и ее оптико-физические параметры, которые существенны с точки зрения переноса излучения, атмосфера считается однородной в пределах кадра. Для решения системы уравнений, содержащих измеренные значения яркостей уходящего излучения в каналах спутникового сенсора, число которых меньше числа неизвестных модели, предложено использовать различные дополнительные соотношения, в том числе, регрессионные соотношения между оптическими параметрами атмосферы. Для отдельного выбранного специальным образом пикселя изображения находятся неизвестные параметры атмосферы, которые затем используются для расчета альбедо для всех остальных пикселей. Тестирование предложенной методики на данных сенсора OLI спутника Landsat 8 показало более высокую ее точность в сравнении с методами FLAASH и QUAC, реализованными в известном пакете обработки изображений ENVI. Методика относится к классу быстрых и не использующих дополнительной информации об атмосфере или поверхности кроме самих корректируемых изображений.

Ключевые слова: спутниковая съемка, “широкие” спектральные каналы, многоспектральное изображение, модель атмосферы, аналитические соотношения, альбедо, регрессионные уравнения

© Л. В. Катковский. 2020

Введение

Большинство методов атмосферной коррекции основано на первичных физических принципах (решении уравнения переноса излучения в атмосфере) и, как правило, предполагают, что поверхность Земли является плоской и отражает по закону Ламберта (изотропно), в результате чего коэффициент спектральной яркости поверхности совпадает с альбедо.

Большая группа методов атмосферной коррекции использует предварительно рассчитанные на основе различных решений уравнения переноса (программ численно моделирования переноса излучения) таблицы излучения LUT (Look Up Tables). Для расчета таблиц чаще всего используется программа переноса излучения MODTRAN (Berk et al., 2014), либо код по модели 6S (Kotchenova, 2007). Подготовка LUT требует больших затрат машинного времени, памяти для их хранения, а их использование совсем не тривиально и не всегда дает хорошую точность. Фактически, для эффективного использования каждый набор LUT должен быть рассчитан для конкретного сенсора, с его спектральными каналами и аппаратными функциями.

Поскольку конкретные атмосферные условия во время съемки спутниковых изображений известны редко, и часто пользователь должен делать оценки на основе свойств изображения, это может оказать существенное влияние на точность коррекции. Поэтому более выигрышными являются

алгоритмы, не требующие априорного знания параметров атмосферы и поверхности на момент съемки. Таким, в частности, является алгоритм атмосферной коррекции Quick Atmospheric Correction (QUAC) (Bernstein et al., 2012), который означает быструю атмосферную коррекцию и доступен в ENVI через модуль атмосферной коррекции. Он не требует наличия LUT, ввода данных об атмосфере и основан на эмпирическом выводе о том, что средняя отражательная способность спектров различных поверхностей не зависит от сцены, что, однако, не всегда соответствует действительности. В дополнение к быстрому времени обработки, преимуществом QUAC является то, что он работает на изображениях всех сенсоров, даже если сенсор не имеет надлежащих калибровочных данных. Недостаток QUAC заключается в том, что он не настолько точен, как другие алгоритмы атмосферной коррекции, и обычно генерирует спектры отражения с погрешностью в пределах примерно 15% в сравнении с методами, основанных на физических принципах. Еще один алгоритм, реализованный в ENVI, Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes, FLAASH (Adler-Golden et al., 1998), основан на LUT, рассчитанных по программе MODTRAN. Он требует преобразования входных изображений в специфический формат, ручного ввода характеристик изображения и знания атмосферных условий, но является более точным, чем QUAC. В работе (Smith, 2015) проведено сравнение трех алгоритмов атмосферной коррекции применительно к данным со спутника WorldView-2: QUAC, FLAASH и DigitalGlobe Atmospheric Compensation (DG AComp), который основан на расчетах по MODTRAN и ав-

* E-mail: katkovskyl@bsu.by. <https://orcid.org/0000-0002-0307-9362>.
Тел.: +375 17 396 44 09, +375 29 615 77 20

томатически определяет параметры атмосферной модели с использованием итерационного процесса. Отмечено, что DG AComp является более точным алгоритмом, чем FLAASH, тогда как QUAC имеет наихудшую точность из трех методов. Однако DG AComp в настоящее время поддерживается для ограниченного числа датчиков.

Атмосферная коррекция, применяемая QUAC и FLAASH (при отсутствии специальных гиперспектральных каналов в изображении), является глобальной, что означает, что одна и та же коррекция применяется ко всему изображению независимо от изменяющихся атмосферных условий в пределах сцены.

При обработке спутниковых изображений с небольшим числом относительно широких спектральных каналов проведение процедуры атмосферной коррекции позволяет восстанавливать средние значения коэффициентов спектральной яркости (альbedo) в пределах спектральной ширины каждого канала спутникового сенсора.

Для предоставляемых пользователю изображений сенсора OLI спутника Landsat 8 атмосферная коррекция выполняется по методике LaSRC (Land Surface Reflectance Code), разработанной в Геологической службе США (USGS) (Vermote et al., 2018). Валидация этого алгоритма, проведенная в указанной работе, показала его значительно улучшенные характеристики в сравнении с предшествующими версиями как для OLI, так и для сенсоров MODIS, Sentinel 2 и VIIRS.

Ранее нами была разработана быстрая методика атмосферной коррекции для спутниковых гиперспектральных изображений и спектров, которая дает хорошие по точности результаты восстановления альbedo поверхности при очень малом времени счета (Katkovsky et al., 2018 a; Katkovsky et al., 2018 б). В настоящей статье представлена модификация методики для многоспектральных изображений с относительно широкими каналами, в основу которой положены та же модель атмосферы и уравнения для уходящего излучения. Как указывалось выше, использование основанной на физике переноса излучения атмосферной коррекции с получаемыми автоматически параметрами модели может приводить к очень высокой точности. В основе предложенной нами методики лежит проверенная оптико-физическая модель атмосферы, включающая протестированные аналитические формулы для спектра уходящего излучения на верхней границе атмосферы, а параметры атмосферы извлекаются из корректируемых изображений.

Основные уравнения

В предлагаемой методике решение обратной задачи оптики атмосферы по определению неизвестных параметров атмосферы и альbedo подстилающей поверхности строится на основе использования совокупности аналитических выражений, описывающих спектральное распределение яркости уходящего излучения на верхней границе безоблачной атмосферы (Katkovsky, 2016). В моделях атмосферы, используемых для атмосферной коррекции в рассматриваемом нами диапазоне длин волн 0.35–1.1 мкм, учитываются следующие наиболее существенные в переносе излучения этого диапазона физические процессы: молекулярное рассеяние, аэрозольное поглощение и рассеяние, поглощение водяным паром, кислородом и озоном.

При формулировке методики для широких спектральных каналов спутникового сенсора учитываются спектральные чувствительности каждого канала изображения путем соответствующего вычисления эффективной спектральной плот-

ности энергетической яркости (СПЭЯ) — в абсолютных физических единицах, после радиометрической коррекции), $B^{(i)}$, регистрируемой в i -ом канале многоспектрального сенсора:

$$B^{(i)} = \int_0^\infty S_\lambda^{(i)} B_\lambda d\lambda / \int_0^\infty S_\lambda^{(i)} d\lambda = \int_0^\infty S_{\lambda, \text{отн}}^{(i)} B_\lambda d\lambda, \quad (1)$$

где λ — длина волны излучения, $S_\lambda^{(i)}$ — функция спектральной чувствительности канала, $S_{\lambda, \text{отн}}^{(i)}$ — относительная спектральная чувствительность, интеграл по спектру от которой нормирован на единицу, B_λ — спектр уходящего излучения на верхней границе атмосферы, который можно представить как (Katkovsky et al., 2018 б):

$$B_\lambda = \left[B_{\text{атм}, \lambda}(\mu, \mu_0, \varphi) + \frac{\rho_\lambda}{\pi} E_\lambda(\mu_0, \rho_\lambda) T_g^\lambda \right] T_g^\lambda. \quad (2)$$

Здесь $B_{\text{атм}, \lambda}(\mu, \mu_0, \varphi)$ — яркость атмосферной дымки, ρ_λ — искомое в рамках задачи атмосферной коррекции спектральное альbedo поверхности в пределах области спектрометрирования (элемента разрешения, пикселя), $E_\lambda(\mu_0, \rho_\lambda)$ — спектральная освещенность поверхности Земли, T_g^λ — полное (прямое плюс диффузное) пропускание атмосферы от поверхности к космическому сенсору без учета пропускания атмосферных газов, T_g^λ — пропускание учитываемых газовых компонентов атмосферы (в данной работе учитываются три газовые компоненты: вода, кислород и озон), $\mu_0 = \cos \theta_0$ — косинус зенитного угла Солнца (берется из метаданных), $\mu = \cos \theta$ — косинус зенитного угла наблюдения (берется из метаданных, при съемке в надир $\mu = 1$), φ — относительный азимутальный угол (разница между азимутом Солнца и азимутом наблюдения).

После подстановки (2) в (1) введем отдельные обозначения для каждого из двух слагаемых:

$$B_1^{(i)} = \int_0^\infty B_{\text{атм}, \lambda}(\mu, \mu_0, \varphi) T_g^\lambda S_{\lambda, \text{отн}}^{(i)} d\lambda, \quad (3)$$

$$B_2^{(i)} = \int_0^\infty \frac{\rho_\lambda}{\pi} E_\lambda(\mu_0, \rho_\lambda) T_g^\lambda S_{\lambda, \text{отн}}^{(i)} d\lambda. \quad (4)$$

Слагаемое $B_1^{(i)}$ соответствует учету вклада в регистрируемое излучение атмосферной дымки (часть излучения, не взаимодействующая с поверхностью) в пределах i -го канала аппаратуры. Слагаемое $B_2^{(i)}$ соответствует расчету вклада на верхней границе атмосферы прямого излучения, отраженного пикселем, с учетом пропускания атмосферы снизу вверх.

Яркость атмосферной дымки $B_{\text{атм}, \lambda}(\mu, \mu_0, \varphi)$ в (3) согласно предложенной нами ранее аппроксимации (Katkovsky, 2016) с высокой точностью можно выразить как:

$$B_{\text{атм}, \lambda}(\mu, \mu_0, \varphi) = \frac{\omega_\lambda B_\lambda^* x(\mu, \mu_0, \varphi, g)}{4(\mu + \mu_0)} \left\{ 1 - \exp \left[-\tau_\lambda \left(\frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu} \right) \right] \right\} [1 + q(\omega_\lambda \tau_\lambda)^p]. \quad (5)$$

Здесь B_λ^* — спектральная яркость Солнца на верхней границе атмосферы; τ_λ — спектральная оптическая толщина всей атмосферы по вертикали, которая включает в себя оптическую толщину по молекулярному (рэлеевскому) рассеянию $\tau_{m\lambda}$, по аэрозольному рассеянию $\tau_{a\lambda}$ и аэрозольному поглощению $\tau_{e\lambda}$, и рассчитывается следующим образом:

$$\tau_\lambda = \tau_{m\lambda} + \tau_{a\lambda} + \tau_{e\lambda} = \tau_{m0} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^4 + \tau_{a0} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^\beta + \tau_{e\lambda}, \quad (6)$$

где β — коэффициент Ангстрема, λ_0 — некоторая опорная длина волны, τ_{m0} , τ_{a0} — соответствующие оптические толщины на опорной длине волны; ω_λ — альbedo однократного рассеяния (вероятность выживания кванта) вычисляется через введенные оптические толщины:

$$\omega_\lambda = (\tau_{m\lambda} + \tau_{a\lambda}) / (\tau_{m\lambda} + \tau_{a\lambda} + \tau_{e\lambda}). \quad (7)$$

Суммарная индикатриса рассеяния $x(\mu, \mu_0, \varphi, g)$ задается как средневзвешенная функция Рэлееской индикатрисы $x_m(\gamma)$ и индикатрисы аэрозольного рассеяния $x_a(\gamma)$ следующим образом:

$$x(\mu, \mu_0, \varphi, g) = x(\gamma) = x_m(\gamma) \tau_{m\lambda} / (\tau_{m\lambda} + \tau_{a\lambda}) + x_a(\gamma) \tau_{a\lambda} / (\tau_{m\lambda} + \tau_{a\lambda}), \quad (8)$$

где:

$$x_m(\gamma) = \frac{3}{4}(1 + \gamma^2), \quad (9)$$

$x_a(\gamma)$ аппроксимируемая функцией Хенни-Гринштейна:

$$x(\mu, \mu_0, \varphi, g) \equiv x(\gamma, g) = (1 - g^2) / (1 + g^2 - 2g\gamma)^{3/2} \quad (10)$$

со средним косинусом аэрозольного рассеяния g , не зависящим от длины волны. Однако посредством формулы (8) вводится спектральная зависимость суммарной индикатрисы от длины волны. В формулах (8)–(11) γ — косинус угла рассеяния (между направлением наблюдения и солнечным излучением):

$$\gamma = -\mu\mu_0 + \sqrt{(1 - \mu_0^2)(1 - \mu^2)} \cos\varphi. \quad (11)$$

В формуле (5) учет вклада многократного рассеяния в спектральную яркость атмосферной дымки осуществляется в виде квазилинейной поправки к приближению однократного рассеяния (вторая фигурная скобка в (5)). Приближение, подобное (5), предложено и исследовано в работе (Васильев и др., 2015) для суммарного излучения атмосферы, мы же используем это приближение только для вклада атмосферной дымки (случай $\rho_\lambda = 0$), причем константа q является неизвестным (подгоночным параметром модели) при решении обратной задачи, также как и p , для которого найдено значение $p = \text{const} = 1.25$. Физически q характеризует относительную величину вклада многократного рассеяния (двукратного и выше) по сравнению с вкладом однократного рассеяния в величину излучения атмосферной дымки. Подобная аппроксимация также была использована нами в работах (Беяев и др., 2014; Katkovsky et al., 2018 б).

В выражении для $B_2^{(i)}$ (4) спектральная освещенность поверхности Земли $E_\lambda(\mu_0, \rho_\lambda)$ рассчитывается в приближении Эддингтона с поправкой на отличие вероятности выживания кванта ω_λ от единицы, обладающего высокой точностью (Katkovsky et al., 2018 б):

$$E_\lambda(\mu_0, \rho_\lambda) = \frac{4\pi\omega_\lambda B_\lambda^* \mu_0}{[4 + 3(1 - g_\lambda)(1 - \rho_\lambda)\tau_\lambda]} \left[\left(\frac{1}{2} + \frac{3}{4}\mu_0 \right) + \left(\frac{1}{2} - \frac{3}{4}\mu_0 \right) e^{-\frac{\tau_\lambda}{\mu_0}} \right] + (1 - \omega_\lambda) \pi B_\lambda^* \mu_0 e^{-\frac{\tau_\lambda}{\mu}}. \quad (12)$$

В этом выражении средний косинус общей индикатрисы рассеяния элементарного объема g_λ , в соответствии с выра-

жением (8) для индикатрисы (и с учетом того, что средний косинус молекулярной индикатрисы (9) равен 0) выражается следующим образом:

$$g_\lambda = g \tau_{a\lambda} / (\tau_{m\lambda} + \tau_{a\lambda}). \quad (13)$$

Для пропускания T_λ используем аналитические аппроксимации, предложенные в работе (Kokhanovsky et al., 2005) в следующем виде:

$$T_\lambda(\mu) = e^{-\frac{\tau_\lambda}{\mu}} + T_\lambda^{diff}(\mu),$$

$$T_\lambda^{diff}(\mu) = \tau_\lambda \exp[-u(\mu, g_\lambda) - v(\mu, g_\lambda)\tau_\lambda - w(\mu, g_\lambda)\tau_\lambda^2],$$

$$u(\mu, g) = \sum_{m=0}^3 h_m \mu^m, \quad h_m = \sum_{s=0}^3 h_{ms} g_\lambda^s,$$

$$v(\mu, g) = p_0 + p_1 \exp(-p_2 \mu),$$

$$w(\mu, g) = q_0 + q_1 \exp(-q_2 \mu), \quad q_m = \sum_{s=0}^3 q_{ms} g_\lambda^s, \quad (14)$$

где h_{ms} , p_{ms} , q_{ms} — заданные константы, полученные в результате массовых расчетов для регрессионных уравнений (14). Используемая аппроксимация получена для значений параметров $0 < g_\lambda < 0.9$; $0.2 < \mu < 1.0$; $0 < \tau_\lambda < 2$ с максимальной погрешностью около 8% для $g_\lambda \in [0 \dots 0.9]$, $\tau_\lambda \in [0 \dots 2]$, $\mu \in [0.2 \dots 1.0]$, и погрешностью менее 4% для $\tau_\lambda \leq 1.6$, $g_\lambda \leq 0.8$ и $\mu \in [0.2 \dots 1.0]$. Достоинством указанной аппроксимации функции полного пропускания атмосферы вверх $T_\lambda(\mu)$ кроме достаточно высокой точности является то, что она не содержит новых неизвестных параметров и зависит только от τ_λ , косинуса угла наблюдения μ и среднего косинуса индикатрисы рассеяния g_λ .

Алгоритм атмосферной коррекции для многоспектральных изображений

Атмосферная коррекция многоспектральных спутниковых изображений осуществляется путем решения системы уравнений, количество которых в системе равно числу каналов сенсора, что принципиально отличает ее от методики для гиперспектральных данных (спектров или изображений), у которых количество спектральных каналов намного превышает количество неизвестных параметров модели, что позволяет получить методом наименьших квадратов систему нелинейных уравнений, число которых равно числу неизвестных.

Для многоспектрального сенсора, который содержит N каналов, можно только записать систему из N уравнений:

$$\begin{cases} B_{sat}^{(i)} = B_{1i} + B_{2i} \\ i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (15)$$

где $B_{sat}^{(i)}$ — значения пикселя в i -ом канале изображения спутникового сенсора, B_{1i} и B_{2i} выражаются уравнениями (3) и (4) соответственно. Например, сенсор OLI спутника Landsat 8 содержит семь каналов, и, таким образом, допускается наличие не более семи неизвестных параметров в системе (15). Однако, для большинства многоспектральных изображений количество неизвестных параметров модели чаще всего будет превышать количество уравнений (каналов). В таком случае встает задача уменьшения количества неизвестных.

В представленной выше модели атмосферы (которая считается однородной в пределах всего изображения) и поверхности содержатся следующие неизвестные параметры (при

условии, что альbedo поверхности ρ_λ полагается постоянным в пределах каждого канала спутникового сенсора, $\rho_\lambda = \rho_i$: ρ_i ($i = 1, \dots, N$), g , q , τ_{a0} , $\tau_{e\lambda}$, β , τ_e , количество которых все еще велико (равно $(N + 6)$, если $\tau_{e\lambda}$ не зависит от λ). Для уменьшения количества неизвестных параметров считаем, что вертикальная оптическая толщина всей атмосферы по молекулярному рассеянию на опорной длине волны τ_{a0} , определяется атмосферной моделью (сезоном и местом съемки) и считается известной величиной, вычисляемой в соответствии с аппроксимацией (Bucholtz, 1995) в зависимости от значений приземной температуры и давления (метеоданные) в момент съемки. Кроме того, оптическая толщина атмосферы по аэрозольному поглощению $\tau_{e\lambda}$, полагается независимой от длины волны неизвестной константой $\tau_{e\lambda} = \tau_e$, поскольку она обычно мала в сравнении с оптической толщиной по рассеянию.

С учетом сделанных допущений мы имеем неизвестные значения альbedo поверхности ρ_i ($i = 1, \dots, N$) и еще пять параметров, относящихся к атмосфере: g , q , τ_{a0} , β , τ_e . Для уменьшения количества параметров ρ_i на первом этапе алгоритма, когда ищутся параметры атмосферы, необходимо выбрать подходящий пиксель на изображении и задать спектральную функцию его альbedo, заменив N значений ρ_i одним неизвестным. С этой целью возможны два варианта выбора пикселя для обработки: в первом варианте — на изображении находится пиксель (или группа пикселей) с приблизительно постоянным по спектру альbedo (например, почва, песок) и полагается $\rho_i = \rho_0 = \text{const}$, $i = 1, \dots, N$; во втором варианте — выбирается пиксель с идентифицируемой подстилающей поверхностью (например: растительность, вода, почва, песок и т. д., либо их смесь), что устанавливается как по выведенному на экран RGB-изображению, сформированному из соответствующих каналов сенсора, так и по виду спектра СПЭЯ пикселя. В этом случае спектр альbedo для выбранного пикселя задается в виде

$$\rho_{\lambda_0} = \rho_0 \rho_\lambda^{db}, \quad (16)$$

где ρ_0 — неизвестная положительная константа, ρ_λ^{db} — типовая спектральная функция альbedo идентифицированного типа поверхности выбранного пикселя из базы спектральных данных. Функция (16) подставляется в (12) и затем в (4) и выполняется интегрирование по длинам волн.

Таким образом, в обоих случаях задания альbedo выбранного пикселя имеем следующий набор из шести неизвестных параметров-констант:

$$\rho_0, g, q, \tau_{a0}, \beta, \tau_e. \quad (17)$$

Если число каналов сенсора равно, например, 3 или 4 (как у российского спутника “Канопус-В” или БКА (Белорусский космический аппарат)), то дальнейшее уменьшение числа неизвестных параметров может осуществляться на основе использования регрессионных соотношений между параметрами атмосферы. В частности, в работе (She et al., 2017) установлены следующие регрессионные соотношения альbedo однократного рассеяния на опорной длине волны ω_{λ_0} и показателя Ангстрема β с аэрозольной оптической толщиной атмосферы на опорной длине волны τ_{a0} :

$$\omega_0 = a_{\omega_0} + a_{\omega_1} \tau_{a0} + a_{\omega_2} \tau_{a0}^2, \quad (18)$$

$$\beta = a_{\beta_0} + a_{\beta_1} \tau_{a0} + a_{\beta_2} \tau_{a0}^2. \quad (19)$$

Используя уравнение (18) и (7) для $\lambda = \lambda_0$ можно найти оптическую толщину по поглощению аэрозоля, константу τ_e и исключить ее из неизвестных. Уравнения (18), (19) позволяют сократить набор неизвестных параметров (17) до четырех — ρ_0 , g , q , τ_{a0} и применять предлагаемую методику уже для многоспектральных систем изображений с четырьмя каналами.

Система (15) вначале решается для отдельного пикселя изображения, выбранного как описано выше. После нахождения ρ_0 и параметров атмосферы (17) искомое значение альbedo по каждому каналу ρ_i для всех пикселей изображения находится решением каждого из уравнений системы (15) относительно неизвестного ρ_i , причем в каждое уравнение системы подставляются найденные параметры атмосферы g , q , τ_{a0} , β , τ_e .

Результаты атмосферной коррекции для изображений OLI Landsat 8

Атмосферная коррекция по описанной выше методике была протестирована на изображениях Landsat 8, так как его сенсор видимого, ближнего и среднего ИК диапазона, OLI, относится к многоспектральным сенсорам с относительно широкими каналами, данные находятся в открытом доступе, и пользователю доступны также данные с атмосферной коррекцией по методике LaSRC, разработанной в Геологической службе США (USGS) (Vermote et al., 2018). Тестирование проведено с использованием пяти каналов Landsat 8, находящихся в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра. Здесь мы ограничились видимым и ближним ИК спектральным диапазоном (первыми пятью каналами), поскольку для среднего ИК диапазона используемая аналитическая модель (формулы) недостаточно полно протестирована.

Был выбран участок изображения, покрывающего регион Нижнего Новгорода, на котором присутствуют различные типы подстилающей поверхности: вода, почва, зеленая растительность, городская застройка.



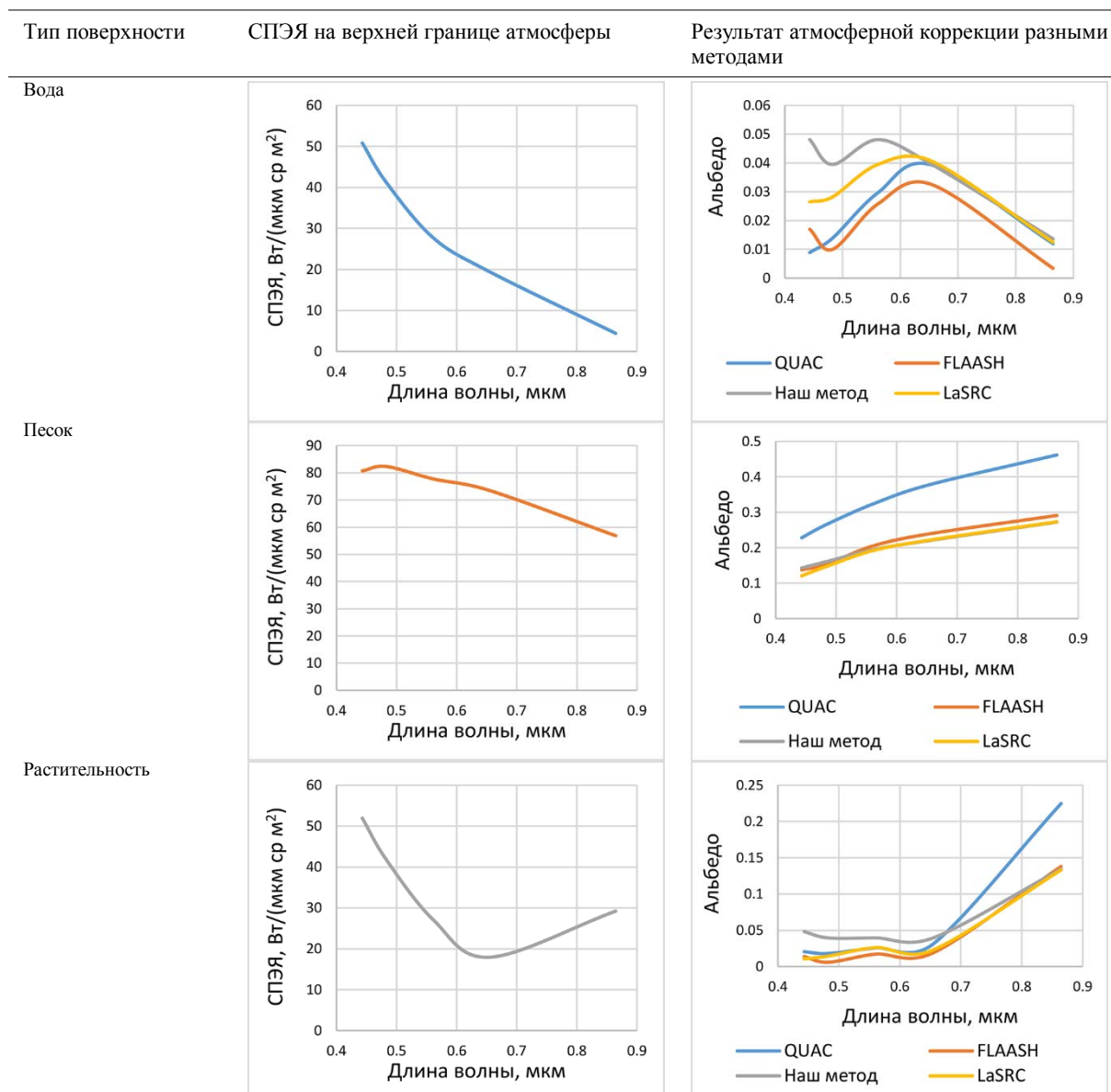
Участок изображения, покрывающего регион Нижнего Новгорода, для которого проводилась атмосферная коррекция

Система уравнений (15) решалась с пятью неизвестными параметрами: ρ_0 , g , q , τ_{a0} , β , где ρ_0 — альbedo нулевого приближения выбранного пикселя на изображении, которое на этом этапе полагалось одинаковым во всех пяти каналах (регрессионное соотношение (19) в данном случае не использовалось).

В Таблице 1 представлены спектры СПЭЯ на верхней границе атмосферы пикселей, соответствующих различным типам подстилающих поверхностей (вода, песок, раститель-

Таблица 1.

Сравнение результатов атмосферной коррекции по спектрам различных подстилающих поверхностей



ность), а также альbedo этих пикселей после атмосферной коррекции четырьмя разными методами (все кривые построены по пяти точкам, по числу использованных каналов).

Далее проводилось попиксельное сравнение изображений альbedo после атмосферной коррекции различными методами, при этом рассчитывался модуль относительной погрешности пар методов:

$$\Delta_i = \left| 1 - \frac{ALB_{\text{метод},i}}{ALB_{\text{USGS},i}} \right| \cdot 100\%, \quad (20)$$

где $ALB_{\text{метод},i}$ — значения альbedo пикселей i -го канала изображения с атмосферной коррекцией по разработанному методу, $ALB_{\text{USGS},i}$ — значения альbedo пикселей i -го канала изображения с атмосферной коррекцией по методу LaSRC.

Полученные по (20) значения Δ_i представлены в виде «тепловых карт» в Таблице 2, где цветовая шкала (справа от изображений) сопоставляется значениям относительных погрешностей.

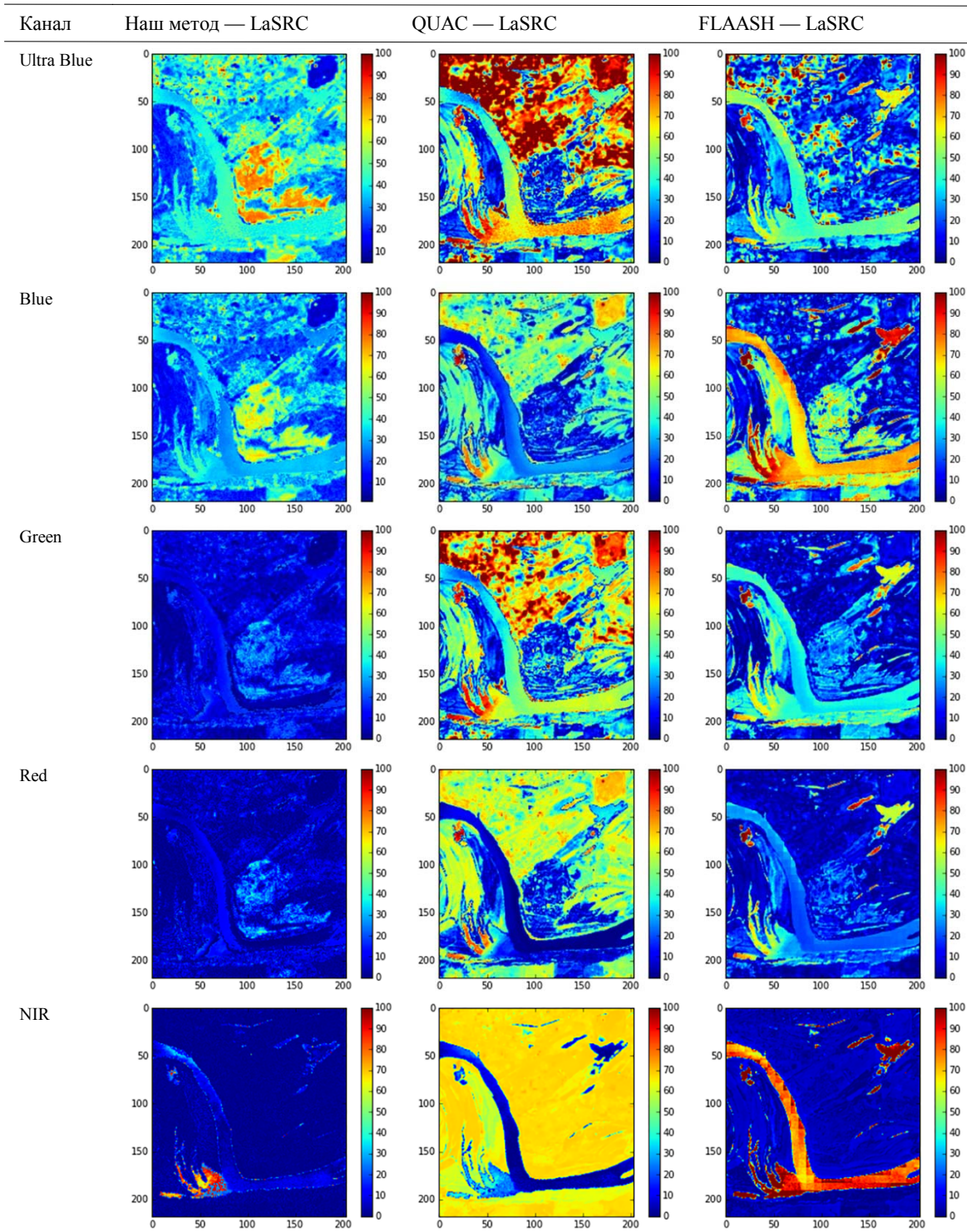
Как видно из Таблицы 2, погрешности альbedo, рассчитанного по нашему методу, в сравнении с собственными данными Landsat 8 (условно принятыми за истинные) почти везде меньше (за исключением отдельных областей изображения в «голубых» каналах) в сравнении с результатами обоих методов, реализованных в пакете ENVI, а именно: FLAASH и QUAC.

Заключение

Разработан быстрый метод атмосферной коррекции для многоспектральных изображений с небольшим количеством относительно широких каналов. Метод основан на использовании аналитических аппроксимаций для спектра уходящего излучения на верхней границе атмосферы, которые были ранее апробированы и использованы для атмосферной коррекции гиперспектральных изображений. В случае, когда число спектральных каналов многоспектрального сенсора меньше числа неизвестных параметров модели атмосферы,

Таблиця 2.

Попарніе сравнения результатов атмосферной коррекции трех методов (разработанного, QUAC и FLAASH) с данными альbedo первых пяти каналов Landsat 8 (метод LaSRC)



ры, предлагается дополнительно использовать регрессионные соотношения между атмосферными параметрами. Предложенный метод не требует априорного задания параметров атмосферы или поверхности, используется только само корректируемое изображение, что выгодно отличает его от методов, использующих как дополнительные данные, так и от методов, основанных на использовании LUT.

Сравнение результатов применения метода к изображению Landsat с тремя известными методами атмосферной коррекции — QUAC, FLAASH и LaSRC, последний из которых, (применяемый оператором спутниковой системы Landsat) условно считался истинным, показало более высокую точность предложенного метода в сравнении с QUAC и FLAASH.

Дальнейшие исследования по развитию данного подхода к атмосферной коррекции многоспектральных изображений должны включать, по нашему мнению, следующие вопросы:

1. Учет рельефа местности для расчетов локальных значений освещенности поверхности Земли в зависимости от углов наклона элемента поверхности, что делается относительно просто с использованием карт рельефа.

2. Учет неоднородности атмосферы (хотя бы по значению интегрального содержания водяного пара в столбе атмосферы), например, в рамках отдельных подобластей (окоп), что важно для изображений с широкой полосой охвата.

3. Уточнение используемой оптико-физической модели атмосферы, в частности, что касается учета вклада атмосферной дымки, и соответствующих аналитических соотношений.

4. Получение возможных новых регрессионных соотношений между различными параметрами атмосферы. Кроме того, могут использоваться данные по аэрозольным оптическим толщинам (АОТ), получаемые как наземно, так и специализированными спутниковыми системами, т. е. глобальные суточные карты АОТ.

В последующей работе стоит также задача проведения более широкой верификации данного метода атмосферной коррекции как с использованием изображений других спутниковых сенсоров, так и с другими методами атмосферной коррекции.

Литература

- Васильев А. В., Кузнецов А. Д., Мельникова И. Н. Аппроксимация многократно рассеянного солнечного излучения в рамках приближения однократного рассеяния. *Международный симпозиум "Атмосферная радиация и динамика"*: сборник тезисов, июнь, 2015. Санкт-Петербург–Петродворец, 2015.
- Катковский Л. В. Параметризация уходящего излучения для быстрой атмосферной коррекции гиперспектральных изображений. *Оптика атмосферы и океана*. 2016. Т. 29, № 9. С. 778–784.
- Обработка спектров и изображений с фотоспектральной системы в космическом эксперименте "Ураган" на МКС / Беляев Б. И. и др. *Исследование Земли из космоса*. 2014. № 6. С. 54–65.
- Fast Atmospheric Correction Method for Hyperspectral Data / Katkovsky L. V. et al. *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10. № 1698. URL: <https://doi.org/10.3390/rs10111698>.
- FLAASH, a MODTRAN4 atmospheric correction package for hyperspectral data retrievals and simulations / Adler-Golden S. et al. *Propulsion Laboratory*. 1988. № 1. P. 9–14.
- Kokhanovsky A. A., Mayer B., Rozanov V. V. A parameterization of the diffuse transmittance and reflectance for aerosol remote sensing problems. *Atmospheric Research*. 2005. № 73. P. 37–43.
- Kotchenova S. Y., Vermote E. F. A vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data: an Overview. 29-th Review of Atmospheric Transmission Models Meeting, Lexington, Massachusetts, 2007.
- LaSRC (Land Surface Reflectance Code): Overview, application and validation using MODIS, VIIRS, LANDSAT and Sentinel 2 data's / Vermote E. et al. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 8173-8176: Valencia, 2018.
- MODTRAN6: a major upgrade of the MODTRAN radiative transfer code / Berk A. et al. Proc. SPIE 9088, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XX, 2014. 90880H. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2050433>.
- Quick Atmospheric Correction Code: Algorithm Description and Recent Upgrades / Bernstein L. S., Jin X., Gregor B., Adler-Golden S. *Optical Engineering*. 2012. V. 51, № 11. 111719-1-111719-11. URL: <https://doi.org/10.1117/1.OE.51.11.111719>.
- SAHARA: A Simplified Atmospheric Correction Algorithm for Chinese gAofen Data: 1. Aerosol Algorithm / She L. et al. *Remote Sensing*. 2017. V. 9. № 3. P. 253. URL: <https://doi.org/10.3390/rs9030253>.
- SHARC method for fast atmospheric correction of hyperspectral data / Katkovsky L. V., Martinov A.O., Siliuk V.A., Ivanov D.A. Proc. SPIE 10786, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXIII, 2018. 1078609 (9). URL: <https://doi.org/10.1117/12.2323455>.
- Smith M. J. A Comparison of DG AComp, FLAASH and QUAC Atmospheric Compensation Algorithms Using WorldView-2 Imager. Department of Civil Engineering Master's Report. 2015.

References

- Adler-Golden, S., Berk, A., Bernstein, L. S., Richtsmeier, S., Acharya, P. K., Matthew, M. W., Anderson, G. P., Allred, C. L., Jeong, L. S., Chetwynd, J. H. (1998). FLAASH, a MODTRAN4 atmospheric correction package for hyperspectral data retrievals and simulations. *Jet Propulsion Laboratory*, 1, 9–14.
- Belyaev, B.I., Belyaev, M. Yu., Desinov, L. V., Katkovsky, L. V., Sarmin, E. E. (2014). Spectra and images processing from Photospectral system in space experiment Hurricane on the ISS. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 6, 54–65. (in Russian).
- Berk, A., Conforti, P., Kennett, R., Perkins, T., Hawes, F., Bosch, J. (2014). MODTRAN6: a major upgrade of the MODTRAN radiative transfer code. Proc. SPIE 9088, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XX, 90880H. <https://doi.org/10.1117/12.2050433>.
- Bernstein, L. S., Jin, X., Gregor, B., Adler-Golden, S. (2012). Quick Atmospheric Correction Code: Algorithm Description and Recent Upgrades. *Optical Engineering*, 51(11), 111719-1-111719-11. <https://doi.org/10.1117/1.OE.51.11.111719>.
- Katkovsky, L.V. (2016). The parameterization of the outgoing radiation for rapid atmospheric correction of hyperspectral images. *Optika atmosfery i okeana*, 29(9), 778–784. (in Russian).
- Katkovsky, L.V., Martinov, A.O., Siliuk, V.A., Ivanov, D.A. (2018). SHARC method for fast atmospheric correction of hyperspectral data. Proc. SPIE 10786, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXIII, 1078609 (9). <https://doi.org/10.1117/12.2323455>.
- Katkovsky, L.V., Martinov, A. O., Siliuk, V. A., Ivanov, D. A., Kokhanovsky, A. A. (2018). Fast Atmospheric Correction Method for Hyperspectral Data. *Remote Sensing*, 10(1698). <https://doi.org/10.3390/rs10111698>.
- Kokhanovsky, A. A., Mayer, B., Rozanov, V. V. (2005). A parameterization of the diffuse transmittance and reflectance for aerosol remote sensing problems. *Atmospheric Research*, 73, 37–43.
- Kotchenova, S. Y., Vermote, E. F. (2007). A vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data: an Overview. 29-th Review of Atmospheric Transmission Models Meeting, Lexington, Massachusetts, USA.
- She, L., Mei, L., Xue, Y., Che, Y., Guang, J. (2017). SAHARA: A Simplified Atmospheric Correction Algorithm for Chinese gAofen Data: 1. Aerosol Algorithm. *Remote Sensing*, 9(3), 253. <https://doi.org/10.3390/rs9030253>.
- Smith, M. J. (2015). A Comparison of DG AComp, FLAASH and QUAC Atmospheric Compensation Algorithms Using WorldView-2 Imager. Department of Civil Engineering Master's Report.
- Vasilev, A. V., Melnikova, I. N., Kuznetsov, A. D. (2015). Approximation of multiply scattered solar radiation in the framework of a single scattering. International Symposium Atmospheric Radiation and Dynamics, Book of Abstracts, 131, Saint-Petersburg–Petrodvorets. (in Russian).
- Vermote, E., Roger, J. C., Franch B., Skakun, S. (2018). LaSRC (Land Surface Reflectance Code): Overview, application and validation using MODIS, VIIRS, LANDSAT and Sentinel 2 data's. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 8173-8176, Valencia.

АТМОСФЕРНА КОРЕКЦІЯ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ СУПУТНИКОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Л. В. Катковський

Науково-дослідна установа “Інститут прикладних фізичних проблем імені А. Н. Севченка”, вул. Курчатова 7, Мінськ 220045, Республіка Білорусь.

Атмосферна корекція є необхідним етапом обробки зображень, що реєструються з борта авіакосмічних носіїв, в першу чергу, в видимому і ближньому ІЧ діапазонах спектра.

У статті описується розроблена методика атмосферної корекції для багатоспектральних супутникових даних з невеликою кількістю відносно широких спектральних каналів (не гіперспектральних), заснована на запропонованих аналітичних співвідношеннях, що описують з досить високою точністю спектр випромінювання на верхній межі безхмарної атмосфери. Методика включає модель атмосфери та її оптико-фізичні параметри, які істотно з точки зору перенесення випромінювання, атмосфера вважається однорідною в межах кадру. Для вирішення системи рівнянь, що містять виміряні значення яркостей випромінювання в каналах супутникового сенсора, число яких менше числа невідомих моделі, запропоновано використовувати різні додаткові співвідношення, в тому числі, регресійні співвідношення між оптичними параметрами атмосфери. Для окремого обраного спеціальним чином пікселя зображення знаходяться невідомі параметри атмосфери, які потім використовуються для розрахунку альбедо для всіх інших пікселів. Тестування запропонованої методики на даних сенсора OLI супутника Landsat 8 показало більш високу її точність в порівнянні з методами FLAASH і QUAC, реалізованими у відомому пакеті обробки зображень ENVI. Методика відноситься до класу швидких і не використовують додаткової інформації про атмосферу або поверхні окрім самих коректованих зображень.

Ключові слова: супутникова зйомка, “широкі” спектральні канали, багатоспектральне зображення, модель атмосфери, аналітичні співвідношення, альбедо, регресивні рівняння

ATMOSPHERIC CORRECTION OF MULTISPECTRAL SATELLITE IMAGERY

L. V. Katkovsky

A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University, 7 st. Kurchatova, Minsk 22004, Republic of Belarus.

Atmospheric correction is a necessary step in the processing of remote sensing data acquired in the visible and NIR spectral bands.

The paper describes the developed atmospheric correction technique for multispectral satellite data with a small number of relatively broad spectral bands (not hyperspectral). The technique is based on the proposed analytical formulae that expressed the spectrum of outgoing radiation at the top of a cloudless atmosphere with rather high accuracy. The technique uses a model of the atmosphere and its optical and physical parameters that are significant from the point of view of radiation transfer, the atmosphere is considered homogeneous within a satellite image. To solve the system of equations containing the measured radiance of the outgoing radiation in the bands of the satellite sensor, the number of which is less than the number of unknowns of the model, it is proposed to use various additional relations, including regression relations between the optical parameters of the atmosphere. For a particular image pixel selected in a special way, unknown atmospheric parameters are found, which are then used to calculate the reflectance for all other pixels.

Testing the proposed technique on OLI sensor data of Landsat 8 satellite showed higher accuracy in comparison with the FLAASH and QUAC methods implemented in the well-known ENVI image processing software. The technique is fast and there is using no additional information about the atmosphere or land surface except images under correction.

Keywords: satellite imagery, broadband sensor, multispectral image, atmospheric model, analytical formulae, reflectance, regression equations

Руккопис статті отримано 05.05. 2020