

УДК 551.501: 629.195.1

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ СПЕКТРАЛЬНОГО АЛЬБЕДО
ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ
СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Доктор техн. наук	А.Ф. Мухамедгалиев
Доктор техн. наук	А.Х. Ахмеджанов
	А.Н. Искаков
	Т.К. Караданов

На основе решения обратной задачи переноса коротковолнового излучения получены алгоритмы атмосферной коррекции космических изображений и расчета спектрального альбеда земной поверхности по спутниковым измерениям.

При изучении земной поверхности с космических аппаратов полезной информацией являются регистрируемые со спутников характеристики солнечной радиации, отраженной от естественных образований на земной поверхности, или характеристики их собственного излучения [1]. Актуальной задачей является их максимальное использование для получения параметров состояния атмосферы и земной поверхности.

Учитывая различие в рассеянии прямой и рассеянной радиации, удобно разделить последние члены в уравнениях переноса излучения в атмосфере на две части – на первичное и многократное рассеяние. Окончательно уравнения примут вид:

$$\frac{dJ_{\lambda}^{\uparrow}}{dz} = -\frac{1}{\cos\theta}(\rho_{\Pi}a_{\lambda} + \rho_p\sigma_{\lambda})J_{\lambda}^{\uparrow} + \frac{\rho_p\sigma_{\lambda}}{\cos\theta}\chi_{\lambda}(\theta, \psi, \theta_{\odot}, \psi_{\odot})S_{\lambda}(\theta_{\odot}, \psi_{\odot}) + \frac{\rho_p\sigma_{\lambda}}{\cos\theta} \int_0^{2\pi} d\psi' \int_0^{\pi} \chi_{\lambda}(\theta, \psi, \theta', \psi')J_{\lambda}(\theta', \psi')d\theta', \quad (1)$$

$$\frac{dJ_{\lambda}^{\downarrow}}{dz} = \frac{1}{\cos\theta}(\rho_{\Pi}a_{\lambda} + \rho_p\sigma_{\lambda})J_{\lambda}^{\downarrow} - \frac{\rho_p\sigma_{\lambda}}{\cos\theta}\chi_{\lambda}(\theta, \psi, \theta_{\odot}, \psi_{\odot})S_{\lambda}(\theta_{\odot}, \psi_{\odot}) - \frac{\rho_p\sigma_{\lambda}}{\cos\theta} \int_0^{2\pi} d\psi' \int_0^{\pi} \chi_{\lambda}(\theta, \psi, \theta', \psi')J_{\lambda}(\theta', \psi')d\theta'. \quad (2)$$

В формуле (2) J_{λ}^{\uparrow} и J_{λ}^{\downarrow} – интенсивности отраженного и падающего излучений, ρ_{Π} , ρ_p – плотности поглощающих и рассеивающих газов в атмосфере, a_{λ} , σ_{λ} – коэффициенты поглощения и рассеяния, θ , ψ – углы зондирования со спутника и азимута, θ_{\odot} и ψ_{\odot} – угол и азимут Солнца, λ – длина волны, z – координата по высоте, S_{λ} – интенсивность прямой солнечной радиации.

Для различных конкретных задач уравнения (1) и (2) могут быть еще более упрощены. Сформулируем граничные условия. На верхней границе атмосферы нисходящая рассеянная радиация отсутствует, так как рассеяние возможно только в атмосфере. Но, как уже говорилось, в коротковолновой области спектра главную роль играет прямая солнечная радиация, которая максимальна именно за пределами атмосферы. Таким образом, при $z \rightarrow \infty$

$$J_{\lambda}^{\downarrow}(z) = \begin{cases} 0 & \text{при } \vartheta \neq \vartheta_{\odot}, \psi \neq \psi_{\odot} \\ S_{\lambda 0} & \text{при } \vartheta = \vartheta_{\odot}, \psi = \psi_{\odot} \end{cases}. \quad (3)$$

На земной поверхности восходящая радиация представляет собой нисходящую суммарную радиацию (т. е. сумму прямой и рассеянной радиации), отраженную от земной поверхности,

$$J_{\lambda}^{\uparrow}(0, \vartheta, \psi) = S_{\lambda}(0, \vartheta_{\odot}, \psi_{\odot}) r_{\lambda}(\vartheta, \psi, \vartheta_{\odot}, \psi_{\odot}) \cos \vartheta_{\odot} + \int_0^{2\pi} d\psi' \int_0^{\pi/2} J_{\lambda}^{\downarrow}(0, \vartheta', \psi') r_{\lambda}(\vartheta, \psi, \vartheta', \psi') \cos \vartheta' \sin \vartheta' d\vartheta'. \quad (4)$$

Здесь $S_{\lambda}(0, \vartheta_{\odot}, \psi_{\odot})$ – прямая солнечная, а $J_{\lambda}^{\downarrow}(0, \vartheta', \psi')$ – рассеянная нисходящая радиация на уровне земной поверхности; r_{λ} – спектральный коэффициент яркости (или коэффициент направленного отражения) подстилающей поверхности. В большинстве случаев можно считать отражение изотропным. Тогда $r_{\lambda} = A_{\lambda}/\pi$ и выражение (4) значительно упрощается:

$$J_{\lambda}^{\uparrow}(0, \vartheta, \psi) = \frac{A_{\lambda}}{\pi} \left[S_{\lambda}(0, \vartheta_{\odot}, \psi_{\odot}) \cos \vartheta_{\odot} + D_{\lambda}^{\downarrow}(0) \right]. \quad (5)$$

Здесь $D_{\lambda}^{\downarrow}(0) = \int_0^{2\pi} d\psi' \int_0^{\pi/2} J_{\lambda}^{\downarrow}(0, \vartheta', \psi') \cos \vartheta' \sin \vartheta' d\vartheta'$ – нисходящий

спектральный поток рассеянной радиации на уровне земной поверхности.

Сформулированные выше уравнения переноса коротковолновой радиации (1) и (2) описывают всевозможные виды радиации – прямую солнечную, рассеянную вверх и вниз, отраженную от земной поверхности.

Интегрирование этих уравнений для самого общего случая представляет чрезвычайно сложную задачу. Более того, в тех случаях, когда существенную роль играет как поглощение, так и многократное рассеяние, возникают принципиальные трудности. Уравнения переноса справедливы для строго монохроматической радиации, т.е. для спек-

тральных интервалов, значительно меньших, чем ширина спектральной линии. Для того чтобы получить интегральные потоки рассеянной радиации, необходимо проинтегрировать и по всем телесным углам и длинам волн. Однако, учитывая сложную зависимость характеристик рассеяния от угла рассеяния и от длины волны, это интегрирование можно выполнить только численно.

Изучение закономерностей рассеяния в атмосфере имеет очень большое значение для ряда прикладных задач (не связанных с тепловыми эффектами), таких, как определение дальности видимости и естественной освещенности, определение характеристик аэрозоля и облачных капель по наблюдениям рассеянного света, интерпретация спутниковых наблюдений. Алгоритм решения задачи переноса коротковолнового излучения в атмосфере представлен на рис. 1. В блоке входных данных задаются солнечные параметры $S_{\lambda 0}, \vartheta_0$ – интенсивность монохроматического солнечного излучения по длине волны λ на верхней границе земной атмосферы и угол распространения солнечных лучей, а также J_{λ}^{\uparrow} – интенсивность излучения, измеряемая на спутнике, и τ_{λ} – оптическая толщина атмосферы. Последний параметр может вычисляться по коэффициенту прозрачности, который определяется по [2].

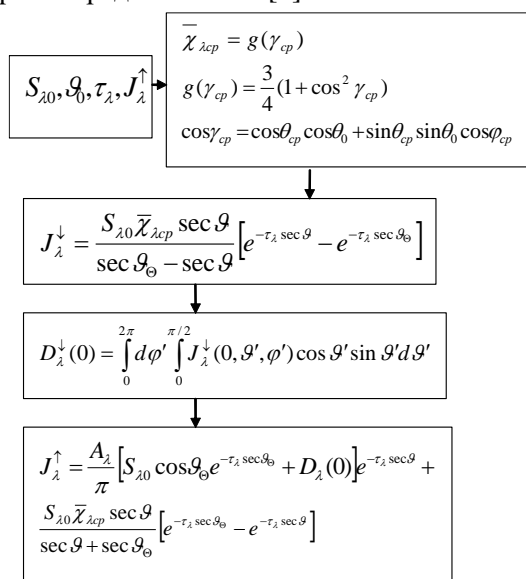


Рис. 1. Алгоритм решения задачи переноса коротковолнового излучения в атмосфере.

Спектральное альbedo участка земной поверхности можно будет вычислить из следующего выражения:

$$A_{\lambda} = \frac{\pi \left(J_{\lambda}^{\uparrow} - \frac{S_{\lambda 0} \bar{\chi}_{\lambda cp} \sec \vartheta}{\sec \vartheta + \sec \vartheta_{\theta}} \left[e^{-\tau_{\lambda} \sec \vartheta_{\theta}} - e^{-\tau_{\lambda} \sec \vartheta} \right] \right)}{\left[S_{\lambda 0} \cos \vartheta_{\theta} e^{-\tau_{\lambda} \sec \vartheta_{\theta}} + D_{\lambda}^{\downarrow}(0) \right] e^{-\tau_{\lambda} \sec \vartheta}}. \quad (6)$$

Для территории устьевой зоны реки Урал рассчитано спектральное альbedo (рис. 2) по данным спутниковых измерений, проведенных 7 апреля 2008 года. В этот период снежный покров уже сошел, а растительность еще не появилась. Согласно рис. 3 полученные значения альbedo удовлетворительно совпадают с табличными данными значений альbedo [3] для различных типов почв [4].

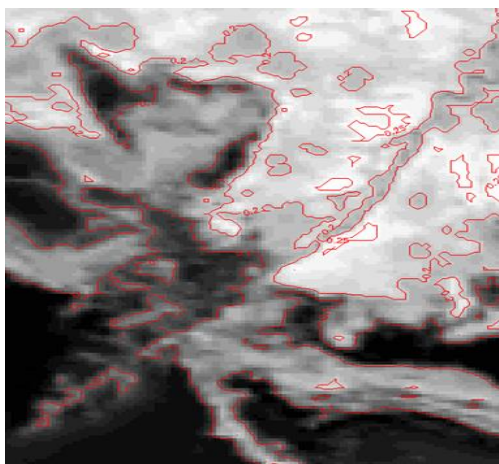


Рис. 2. Расчетные значения спектрального альbedo для устьевой зоны реки Урал.

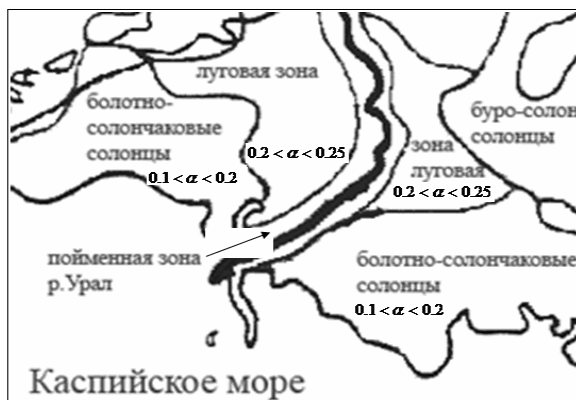


Рис. 3. Карта почв устья р. Урал с соответствующими значения альbedo.

Применение численной космической информации дает возможности для более детальной обработки космических изображений с определением значений спектрального альбедо, что позволяет оценивать состояние земной поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Казахской ССР // М.: Гидрометеиздат, 1982. – 1 том. – 81 с.
2. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы.– Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 640 с.
3. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики. – СПб.: Наука, 2003. – 474 с.
4. WAN Z. MODIS LST ATBD // Institute Computational Earth System Science, USA, Santa Barbara, 1999, 77 pp.

Институт космических исследований, г. Алматы

СПУТНИКТІК ӨЛШЕМДЕР НЕГІЗІНДЕ ЖЕР БЕТІНІҢ СПЕКТРЛІК АЛЬБЕДОСЫНЫҢ МӘНІН АНЫҚТАУ

Техн. ғылымд. док.	А.Ф. Мұхамедғалиев
Техн. ғылымд. док.	А.Х. Ахмеджанов
	А.Н. Ысқақов
	Т.К. Қараданов

Қысқа толқынды сәуленің тасымалдануының кері есебін шешу негізінде ғарыштық кескіндердің атмосфералық түзетулерінің және спутниктік өлшемдер бойынша жер бетінің спектрлік альбедосын есептеу алгоритмі алынды.