

УДК 551.501: 629.195.1

РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ АТМОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Доктор техн. наук	А.Х. Ахмеджанов
Канд. физ.-мат. наук	В.Н. Глушко
Канд. техн. наук	Т.К. Караданов

В данной работе представлены алгоритмы расчетов интенсивности уходящего излучения, альbedo земной поверхности и оптической толщины атмосферы для видимого диапазона по данным спутникового зондирования.

Моделирование природных процессов требует регулярного получения и анализа объективных данных о разных компонентах окружающей среды. Такие данные должны покрывать всю поверхность Земли, накапливаться в течение длительного периода и охватывать широкий спектр излучения. Эти свойства присущи данным спутникового зондирования [1-4]. Применение космических данных в решении различных задач оценки состояния природной среды имеют решающее значение. Ранее были разработаны методы улучшения их качества, методы распознавания земных объектов. Актуальной задачей является их максимальное использование для получения параметров состояния атмосферы и земной поверхности, дополняющие результаты наземных исследований оптических параметров атмосферы.

В данной работе представлены алгоритмы расчетов интенсивности уходящего излучения, альbedo земной поверхности и оптической толщины атмосферы для видимого диапазона по данным спутникового зондирования. Оптическая толщина среды τ_{λ} , характеризует ослабление оптического излучения в среде, за счёт совместного действия поглощения и рассеяния излучения, обусловленного многократным рассеянием излучения в атмосфере.

Радиометр MODIS состоит из двух сканирующих спектрометров, один из которых (MODIS-N) снимает в надир, а ось съемки другого (MODIS-T) может быть отклонена. 36 спектральных зон MODIS охватывают диапазон с длинами волн от 0,4 до 14,4 мкм. Съемка в двух зонах (620...670 и 841...876 нм) ведется с разрешением 250 м, в пяти зонах видимого и ближнего инфракрасного диапазона – с разрешением 500 м, а в

остальных (диапазон от 0,4 до 14,4 мкм) – 1000 м. Измеряемые на спутнике величины: интенсивность поступающего на сканер излучения $\text{вт/м}^2 \cdot \text{мкм} \cdot \text{ср}$ (radians), отношение поступающего на сканер излучения к спектральной солнечной постоянной, а также материалы NASA для сканера MODIS дают возможность определения количественных значений физических параметров атмосферы.

Для расчета оптической толщины атмосферы применялась спектральная функция прозрачности атмосферы из документации MODIS для среднеширотных условий. В настоящее время экспериментально, используя метод Бугера-Лэнгли, можно измерить только общую оптическую толщину атмосферы $\tau(\lambda)$. Были проведены более 200 измерений оптической толщины атмосферы на экспериментальной площадке (Каменском плато Алматинской области) в течение летних месяцев в 2001...2006 годах по 6 значениям длин волн: 0,421; 0,478; 0,540; 0,668; 0,796 и 1,280 мкм. Зависимость оптической толщины атмосферы от длины волны на основе функции прозрачности атмосферы по документации MODIS для среднеширотных условий удовлетворяет средним значениям наземных измерений. Первым этапом является расчет интенсивности уходящего излучения, фиксируемого на спутнике. Космическое изображение, восстановленное с применением программного пакета ENVI – 4 конвертируется в ASCII таблицу и с помощью калибровочных коэффициентов пересчитывается в матрицу. В этой матрице каждому пикселю соответствует значение интенсивности уходящего излучения с соответствующей размерностью ($\text{вт/м}^2 \text{ мкм ср}$).

Вторым этапом является определение альbedo подстилающей поверхности. В настоящее время применяется параметр A_λ , характеризующий отражательную способность подстилающей поверхности и определяемый как отношение поступившего сигнала на спутник к спектральной солнечной постоянной. Вычисления проводились последовательно с использованием семи вычислительных комплексов: IMAPP и PGE 03, 11-13, 22, 23 четвертой версии.

Следующим этапом является расчет оптической толщины атмосферы. Оптическая толщина (оптическая толща) среды τ_λ , безразмерная величина, характеризующая ослабление оптического излучения в среде за счёт совместного действия поглощения света и рассеяния света (но без учёта эффектов усиления излучения, обусловленного многократным рассеянием). Учитывая различие в рассеянии прямой и рассеянной радиации, удобно разделить последние члены в уравнениях переноса излучения в

атмосфере на две части – на однократное и многократное рассеяние. Наземные экспериментальные работы показали, что в полном рассеянии солнечного излучения большую часть составляет однократное рассеяние (свыше 80 %). При условии однократного рассеяния излучения в атмосфере введем средневзвешенную индикатрису, учитывающую релеевское и аэрозольное рассеяние. Средневзвешенная индикатриса в нижних слоях атмосферы в основном определяется аэрозольной составляющей, которая оказывается намного больше релеевской. С ростом высоты концентрация аэрозолей в атмосфере убывает и увеличивается роль релеевского рассеяния. Однако данные наблюдений показывают, что и в верхних слоях атмосферы встречаются замутненные слои, в которых индикатриса рассеяния сильно вытянута вперед. Вообще изменчивость индикатрисы и оптических толщин наряду с чисто математическими трудностями приводит к практической невозможности корректного решения уравнений переноса рассеянной радиации. Изменение индикатрисы с высотой не очень сильно влияет на поток рассеянной радиации (в отличие от интенсивности). Поэтому реальную средневзвешенную индикатрису можно заменить осредненным по высоте значением $\bar{\chi}_{\lambda cp}$. В таком случае обыкновенное неоднородное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами решается методом Лагранжа. Его решение имеет вид

$$J_{\lambda}^{\uparrow} = \frac{A_{\lambda}}{\pi} \left[S_{\lambda 0} \cos \vartheta_0 e^{-\tau_{\lambda} \sec \vartheta_0} + D_{\lambda}(0) \right] e^{-\tau_{\lambda} \sec \vartheta} + \frac{S_{\lambda 0} \bar{\chi}_{\lambda cp} \sec \vartheta}{\sec \vartheta + \sec \vartheta_0} \left[1 - e^{-\tau_{\lambda} (\sec \vartheta_0 - \sec \vartheta)} \right],$$

$$J_{\lambda}^{\downarrow} = \frac{S_{\lambda 0} \bar{\chi}_{\lambda cp} \sec \vartheta}{\sec \vartheta_0 - \sec \vartheta} \left[1 - e^{-\tau_{\lambda} \sec \vartheta_0} \right],$$

$$D_{\lambda}(0) = 2\pi S_{\lambda 0} \bar{\chi}_{\lambda cp} \left[1 - e^{-\tau_{\lambda} \sec \vartheta_0} \right] \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin \vartheta}{\sec \vartheta_0 - \sec \vartheta} d\vartheta,$$

где J_{λ}^{\uparrow} и J_{λ}^{\downarrow} – восходящее и нисходящее излучения, A_{λ} – альbedo земной поверхности, $S_{\lambda 0}$ – спектральная солнечная постоянная, ϑ_0 – угол Солнца, τ_{λ} – оптическая толщина атмосферы, ϑ – угол зондирования.

Эти соотношения дают спектральную интенсивность восходящей и нисходящей рассеянной радиации на произвольном уровне $\tau_{\lambda}(z)$ в безоблачной атмосфере. Интенсивность рассеянной радиации на рассматриваемом уровне складывается из интенсивности лучей, рассеянных всеми вы-

шележащими или нижележащими слоями. Полагая, что J_{λ}^{\uparrow} – измеряемая на спутнике интенсивность отраженного излучения с выбранного участка земной поверхности с известным значением альбедо A_{λ} , а χ_{κ} – усредненное значение индикатрисы для однократного рассеяния можно определить оптическую толщину атмосферы:

$$\tau_{\lambda} = \left(\left(\sqrt{b^2 - 4ac} \right) - b \right) / 2a,$$

$$\text{где } a = A_{\lambda} \left[\frac{1}{\pi} - \chi_{\lambda} (1 + \cos \vartheta_o \ln(\cos \vartheta - \cos \vartheta_o)) \right],$$

$$b = \chi_{\kappa} \left\{ \frac{\sec \vartheta_o - \sec \vartheta}{\sec \vartheta_o + \sec \vartheta} \sec \vartheta_o + A_{\lambda} \left[\frac{1}{\pi} - 2 \cos \vartheta_o (1 + \cos \vartheta_o \ln(\cos \vartheta - \cos \vartheta_o)) \right] \right\}.$$

При многократном рассеянии излучения в атмосфере поступивший сигнал на спутник $J_{cn\lambda}^{\uparrow}$ формируется за счет отраженного от земной поверхности сигнала и рассеянного в атмосфере излучения.

$$J_{cn\lambda}^{\uparrow} = \frac{A_{\lambda}}{\pi} \left(S_{\lambda}^{\downarrow} \cos \vartheta_o + J_{амм\lambda}^{\downarrow} \right) \cdot e^{-\frac{\tau_{\lambda}}{\cos \vartheta}} + J_{амм\lambda}^{\uparrow},$$

где S_{λ}^{\downarrow} – спектральная солнечная постоянная, $J_{амм\lambda}^{\downarrow}$ – рассеянное вниз излучение, $J_{амм\lambda}^{\uparrow}$ – рассеянное вверх излучение.

Если подобрать такой участок водной поверхности, где альбедо стремиться к нулю, то можно определить $J_{амм\lambda}^{\uparrow}$. Для нахождения значения $J_{амм\lambda}^{\downarrow}$ рассмотрим соотношения прямого и рассеянного излучений, попадающих на земную поверхность.

В среднем для оптического диапазона (около 500 нм) было принято следующее соотношение

$$J_{амм\lambda}^{\downarrow} = 0,2 \cdot E_{\lambda}^{\downarrow}.$$

В результате получено следующее выражение для приближенного расчета оптической толщины атмосферы

$$\tau_{\lambda} = -\cos \vartheta \ln \left[\frac{J_{cn\lambda}^{\uparrow} - J_{амм\lambda}^{\uparrow}}{\frac{A_{\lambda}}{\pi} E_{\lambda}^{\downarrow} (0,2 + \cos \vartheta_o)} \right].$$

Для расчетов интенсивности уходящего излучения, альбедо земной поверхности и оптической толщины был выбрано побережье Каспийского моря (рис. 1а).

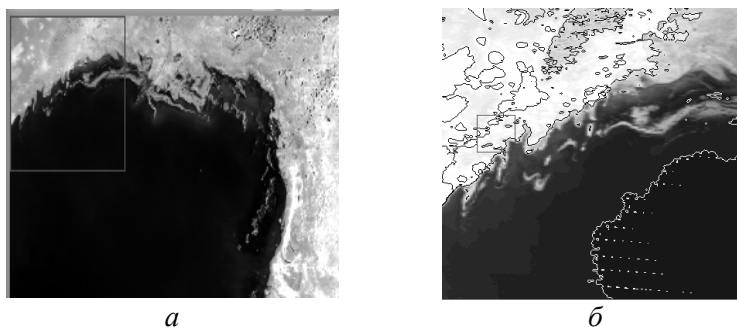


Рис. 1. а – Космический снимок побережья Каспийского моря с расчетной территорией, б – расчетное распределение значений оптической толщины атмосферы с выделенным участком.

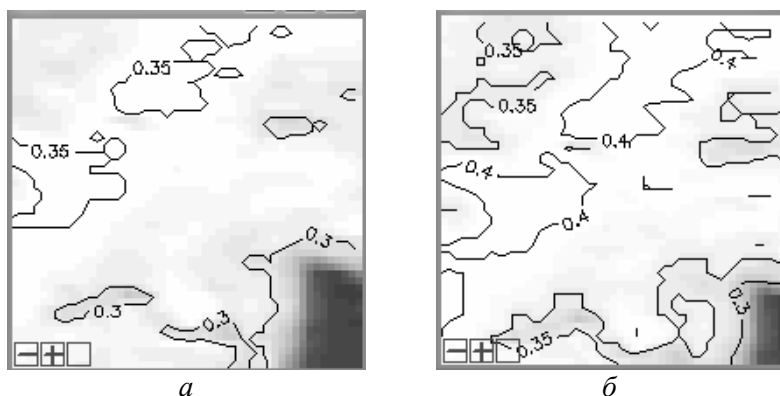


Рис. 2. Распределение значений оптической толщины атмосферы на выделенном участке в увеличенном виде (а – однократное рассеяние, б – многократное рассеяние).

Выделенный квадрат является расчетным участком. Результаты расчетов оптической толщины атмосферы приведены на рис. 1б и 2а, 2б.

Применение спутниковой информации при расчетах оптической толщины атмосферы дает возможность исследования территориального распределения этого физического параметра, что может позволить не только проводить атмосферную коррекцию космических изображений, но и изучать физические процессы поглощения и рассеяния солнечного излучения в атмосфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поляков А.В., Тимофеев Ю.М. Предельные точности восстановления вертикальных профилей атмосферных параметров (спутниковый метод прозрачности). // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2003. – Т. 39. – № 2. – С. 262-268.

2. Elterman L. Atmospheric attenuation model, in the ultraviolet, the visible, and the infrared windows for altitudes to 50 km // Environ. Res. Paper N46. U.S. Air Force Cambridge Research Laboratory. – Bedford, Mass, 1964. – 57 p.
3. Elterman L. UV, visible, and IR-attenuation for altitudes to 50 km // Environ. Res. Paper N285. (U.S. Air Force Cambridge Research Laboratory), 1968. – 59 p.
4. Penndorf R. Tables of the refractive index for standard air and the Rayleigh scattering coefficient for the spectral region between 0,2 and 20,0 μ and their application to atmospheric optics // J. Opt. Soc. Am.. – 1957. – V. 47. – P. 176-182

Институт космических исследований, г. Алматы

АТМОСФЕРАНЫҢ ОПТИКАЛЫҚ ҚАЛЫҢДЫҒЫН СПУТНИКТІК БАРЛАУ МӘЛІМЕТТЕРІМЕН ЕСЕПТЕУ

Техн. ғылымд. докторы	А.Х. Ахмеджанов
Физ.-мат. ғылымд. канд.	В.Н. Глушко
Техн. ғылымд. канд.	Т.К. Караданов

Берілген жұмыста кетіп бара жатқан сәулелену қарқындылығын есептеу алгоритмдері, жер бетінің альбедосы және спутниктік барлау мәліметтерімен көру шегіндегі атмосфераның оптикалық қалыңдығы көрсетілген.