

УДК 551.501: 629.195.1

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ ПО
ДАНЫМ КОСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

Доктор техн. наук А.Х. Ахмеджанов
 Т.К. Караданов

Разработана методика применения данных дистанционного зондирования для восстановления оптических параметров атмосферы в момент космической съемки.

Серьезные изменения экологической обстановки на Земле (глобальное потепление, поднятие уровня моря, обезлесение, разрушение озонового слоя, кислотные дожди, обеднение биологического разнообразия) обусловили все возрастающий в последние годы интерес к экологической обстановке на нашей планете. 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 [2, 3, 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. При изучении земной поверхности с космических аппаратов полезной информацией являются регистрируемые со спутников интенсивности солнечной радиации, отраженной от естественных образований на земной поверхности. Актуальной задачей является их максимальное использование для получения параметров состояния атмосферы и земной поверхности, дополняющие результаты наземных исследований оптических параметров атмосферы.

С учетом этих требований с начала 1980-х годов в Национальном Управлении по Аэронавтике и Космонавтике (NASA) США разрабатывалась программа EOS (Earth Observing System). Ее основные составляющие: 1) серии искусственных спутников Земли, предназначенных для изучения глобальных изменений во всей их сложности; 2) передовая компьютерная сеть для обработки, хранения и распространения данных (EOSDIS); 3) научные коллективы по всему миру для анализа этих данных.

В рамках программы EOS в 1999 году был запущен спутник EOS-AM1 (под названием Terra) и EOS-PM1 (Aqua) в 2002. Спутники имеют солнечно-синхронные полярные орбиты (высота – 705 км, период обращения – 99 мин, наклонение – 98,2 °; EOS-AM1 пересекает экватор, двигаясь с севера на юг в 10:30 по местному времени, а EOS-PM1 – с юга на север – в 13:30). Срок службы каждого спутника 5 лет, по его истечении планируются дальнейшие запуски. Вся программа рассчитана на 15 лет.

Съемочные системы на борту Terra.

Аппаратура спутника Terra – это пять съемочных систем, предназначенных для одновременного согласованного сбора информации о радиационном балансе Земли, атмосферной циркуляции, взаимодействии суши и океанов, биопродуктивности, свойствах поверхности суши:

ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) – гиперспектральная 14-канальная съемка в диапазоне от 0,52 до 11,65 мкм с разрешением 15...90 м и стереосъемка в диапазоне 0,76...0,86 мкм.

MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer) – гиперспектральная 36-канальная съемка в диапазоне от 0,45 до 14,36 мкм с разрешением 250...1000 м.

MISR (Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer) – четырехзонная съемка под 9 углами наклона в диапазоне от 0,42 до 0,87 мкм с разрешением от 250×275 до 1100×1100 м.

CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System) – съемка в трех широких спектральных зонах в диапазоне от 0,3 до более 100 мкм с разрешением от 20 км (в надире).

MOPITT (Measurements of Pollution in the Troposphere) – двухзонная съемка (4,7 и 2,2...2,4 мкм) с разрешением 22 км.

Основные характеристики: 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. Функция прозрачности атмосферы из документации MODIS для среднеширотных условий представлена на рис. 1.

Радиометрическое разрешение исходных снимков весьма высоко: 12 бит. Пиковая скорость передачи данных составляет 10,6 Мбит/с. Траек-

тория движения носителя и угол обзора системы 110° (ширина полосы обзора 2330 км) позволяют MODIS за сутки получать изображение почти всей поверхности Земли, за исключением узких промежутков между полосами сканирования в низких широтах.

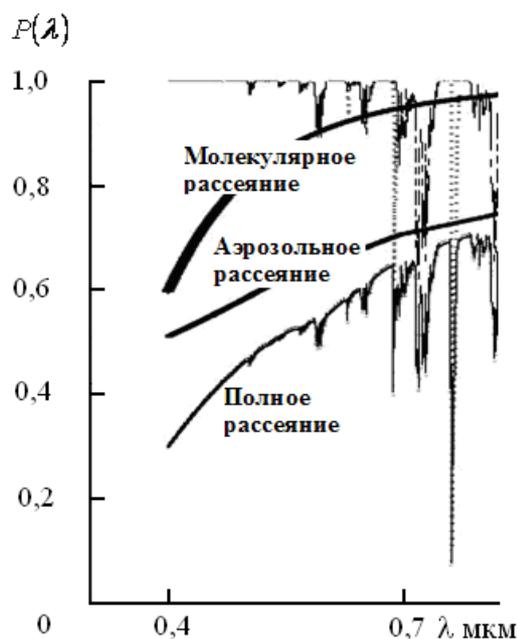


Рис. 1. Функция прозрачности в оптическом диапазоне солнечного спектра.

При проектировании системы MODIS была сделана ставка на специализированные виды продукции, представляющие результаты специальной обработки данных в определенных зонах, предусматривающей получение вторичных изображений, обеспечивающих изучение избранных объектов и явлений. Например, к таким тематическим продуктам относятся изображения LAI – индекса зеленой листовой площади растительного покрова, FPAR – индекса фотосинтетической активной радиации, поглощаемой растительностью. Всего на настоящий момент предлагается 44 вида производных изображений ([полный список приведен на сайте MODIS](#)). Для их разработки были созданы четыре тематических группы, специализирующихся на калибровке данных и их использовании для исследования суши, атмосферы, и океана. На сайтах этих групп приводится новейшая информация о качестве различных производных продуктов, не всегда доступная через основной портал заказа [EOS Data Gateway](#).

Изображения MODIS, предназначенные для изучения атмосферы и океанов хранятся в [GSFC Earth Sciences Distributed Active Archive Center](#) (Ар-

хив для наук о Земле Годдардовского центра полетов); для изучения суши – в [USGS-NASA Land Processes DAAC](#) (Архив Геологической съемки и NASA для изучения процессов на суше); для изучения снега и льда – в [National Snow and Ice Data Center](#) (Национальный центр данных по снегу и льду).

Ослабление солнечных лучей в атмосфере происходит за счет двух процессов: поглощения и рассеяния. Поглощенная солнечная радиация переходит в другие виды энергии, в основном в тепловую, т.е. расходуется на нагревание воздуха. Поглощение солнечной радиации газами атмосферы носит избирательный, или селективный, характер, т.е. поглощаются определенные длины или участки длин волн. Главными поглотителями солнечной радиации являются озон, водяной пар и углекислый газ. Основное поглощение происходит в УФ- и ИК-областях солнечного спектра. В видимой части спектра поглощение играет малую роль в сравнении с рассеянием. Именно за счет рассеяния происходит главное ослабление световых солнечных лучей. 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). Оптическая толщина слоя среды связана с его прозрачностью p соотношением $\tau_\lambda = -\ln p_\lambda$. Согласно [1] коэффициент рассеяния может определяться по обратно пропорциональной зависимости от прозрачности атмосферы p_λ .

Индикатриса при релеевском рассеянии описывается формулой:

$$g(\gamma) = \frac{3}{4} (1 + \cos^2 \gamma),$$

где γ – угол рассеяния излучения.

Индикатриса при аэрозольном и релеевском рассеянии представляется по формуле, предложенной В.Г. Фесенковым [4],

$$g(\gamma) = 1 + a \cos \gamma + b \cos^2 \gamma + c \cos^3 \gamma.$$

Угол рассеяния γ связан с углом визирования ϑ и азимутом φ соотношением:

$$\cos \gamma = \cos \vartheta \cos \vartheta_0 + \sin \vartheta \sin \vartheta_0 \cos \varphi$$

где ϑ_0 – зенитное расстояние Солнца.

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 сол-

нечного 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

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

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

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

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 вышележащими 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 оптическая толщина атмосферы τ_λ может быть определена из рис. 1 и 2, можно рассчитать средневзвешенное значение индикатрисы $\bar{\chi}_{\lambda ep}$

$$\bar{\chi}_{\lambda ep} = \frac{j_{\lambda ep}^\uparrow - \frac{A_\lambda}{\pi} S_{\lambda 0} \cos \vartheta_0 e^{-\tau_\lambda \sec \vartheta_0}}{2A_\lambda S_{\lambda 0} \left(1 - e^{-\tau_\lambda \sec \vartheta_0}\right) \left(\cos \vartheta_0 + \cos^2 \vartheta_0 \ln \left| \frac{\cos \vartheta_0}{1 - \cos \vartheta_0} \right| \right) + P},$$

$$P = \frac{S_{\lambda 0} \sec \vartheta}{\sec \vartheta + \sec \vartheta_0} \left(1 - e^{-\tau_\lambda (\sec \vartheta_0 - \sec \vartheta)}\right).$$

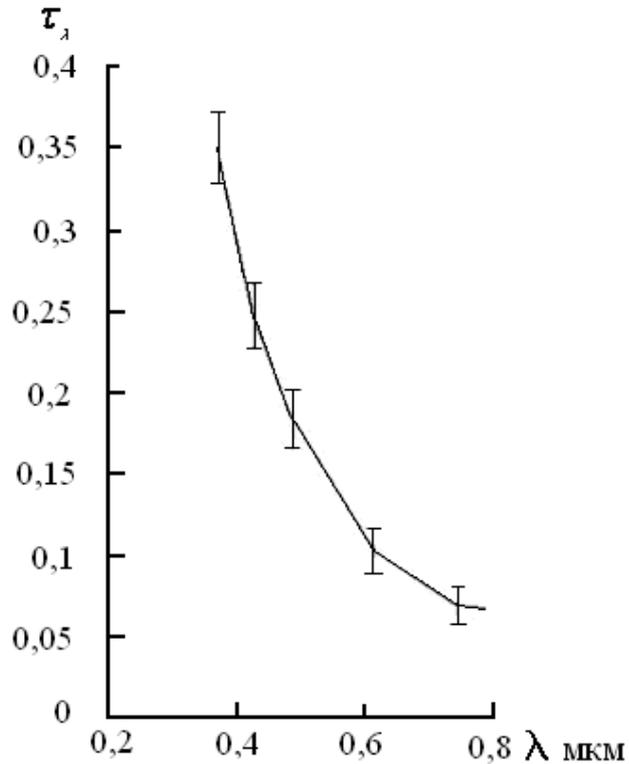


Рис. 2. График зависимости оптической толщины атмосферы от длины волны.

Результаты расчетов зависимости индикатрисы рассеяния яркости при $\lambda = 0,488$ мкм (1 – по формуле В.Г. Фесенкова [1], 2 – по спутниковым данным) от угла рассеивания γ показаны на рис. 3 при $\lambda = 0,488$ мкм, что соответствует 10 каналу сканера MODIS.

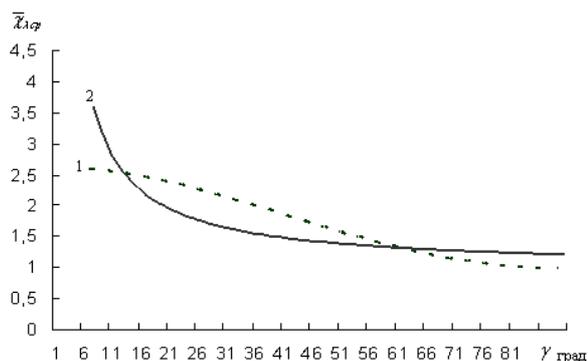


Рис. 3. Индикатрисы рассеяния света при $\lambda = 0,488$ мкм (1 – по формуле В.Г. Фесенкова, 2 – по спутниковым данным).

Измеряемые на спутнике величины radiances (интенсивность поступающего на сканер излучения $\text{Вт}/\text{м}^2\text{мкм ср}$), reflection (отношение поступающего на сканер излучения на спектральную солнечную постоянную), а также материалы NASA для сканера MODIS дают возможность определения количественных значений физических параметров атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратьев К.Я. Лучистая энергия Солнца–Л.:Гидрометиздат, 1954.
2. Поляков А.В., Тимофеев Ю.М. Предельные точности восстановления вертикальных профилей атмосферных параметров (спутниковый метод прозрачности). 2. Спектральный коэффициент аэрозольного ослабления // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2003. – Т. 39. – № 2. – С. 262–268.
3. Chu D.A., Kaufman Y.J., Ichoku C. Validation of MODIS aerosol optical depth retrieval over land // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29. № 12. P. MOD 2/1-MOD 2/4.
4. Ichoku C., Levy R., Kaufman Y.J. et al. Analysis of the performance characteristics of five-channel Microtops II Sun photometer for measuring aerosol optical thickness and precipitable water vapor // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107. № 13. P.5/1–5/17.

АО «Национальный центр космических исследований и технологий» НКА РК

ҒАРЫШТЫҚ ЗОНДЫЛАУ МӘЛІМЕТТЕРІ БОЙЫНША АТМОСФЕРАНЫҢ ОПТИКАЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРІН АНЫҚТАУ

Техн. ғылымд. докторы А.Х. Ахмеджанов
Т.К. Караданов

Ғарыштық түсіру кезінде атмосфераның оптикалық көрсеткіштерін қалпына келтіру үшін арақаштық зондылау мәліметтерін қолдану әдістемесі әзірленді.