

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  $110^\circ$  (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.

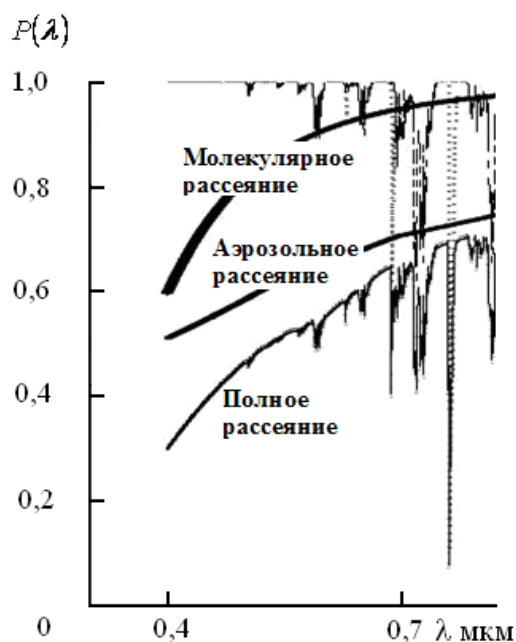


Рис. 1. Функция прозрачности в оптическом диапазоне солнечного спектра.

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  $\tau_\lambda$ , 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  $p_\lambda$ .

Индикатриса при релеевском рассеянии описывается формулой:

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

где  $\gamma$  – 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  $\gamma$  связан с углом визирования  $\vartheta$  и азимутом  $\varphi$  соотношением:

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

где  $\vartheta_0$  – 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

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

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

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

где  $J_{\lambda}^{\uparrow}$  и  $J_{\lambda}^{\downarrow}$  – восходящее и нисходящее излучения,  $A_{\lambda}$  – альbedo земной поверхности,  $S_{\lambda 0}$  – спектральная солнечная постоянная,  $\vartheta_0$  – угол Солнца,  $\tau_{\lambda}$  – оптическая толщина атмосферы,  $\vartheta$  – 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  $J_{\lambda}^{\uparrow}$  – измеряемая на спутнике интенсивность отраженного излучения с выбранного участка

земной поверхности с известным значением альбедо  $A_\lambda$ , а оптическая толщина атмосферы  $\tau_\lambda$  может быть определена из рис. 1 и 2, можно рассчитать средневзвешенное значение индикатрисы  $\bar{\chi}_{\lambda ep}$

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

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

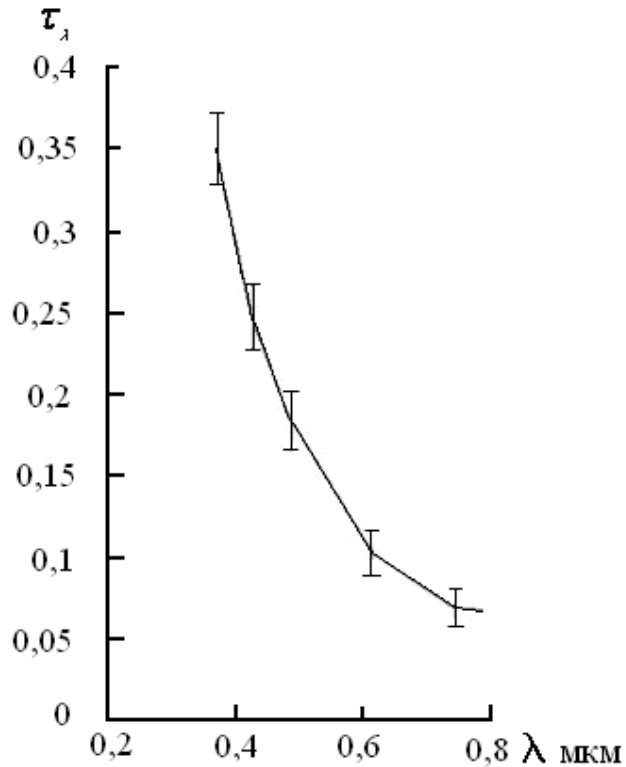


Рис. 2. График зависимости оптической толщины атмосферы от длины волны.

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  $\gamma$  показаны на рис. 3 при  $\lambda = 0,488$  мкм, что соответствует 10 каналу сканера MODIS.

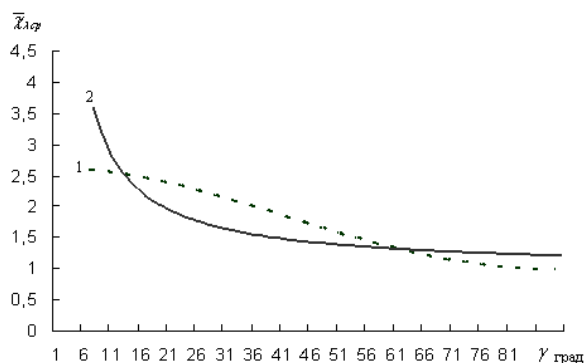


Рис. 3. Индикатрисы рассеяния света при  $\lambda = 0,488$  мкм (1 – по формуле В.Г. Фесенкова, 2 – по спутниковым данным).

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.*