

УДК 551.501: 629.195.1

**ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ДЛЯ РАСЧЕТОВ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ И
ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

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

Разработаны алгоритмы применения данных дистанционного зондирования для восстановления оптических параметров атмосферы в момент космической съемки.

Изучение 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, 7, 8]. Применение космических данных в решении различных задач оценки состояния природной среды имеют решающее значение. Разработаны методы улучшения их качества космических изображений, методы распознавания земных объектов. 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). 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. 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. Радиометрическое разрешение исходных снимков весьма высоко: 12 бит. Пиковая скорость передачи данных составляет 10,6 Мбит/с. Траектория 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. 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.

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. Этой задаче посвящена данная работа, поскольку исследования физических параметров земной поверхности и атмосферы по данным космического зондирования могут быть объединяющими результаты ранее проведенных наземных и экспериментальных работ.

ENVI (Environment for Visualizing Images – среда для отображения снимков) является наиболее совершенным и в то же время очень простым в управлении программным обеспечением для работы с данными дистанционного зондирования. ENVI включает в себя функции обработки и глубокого анализа гиперспектральных снимков по исправлению геометрических и радиометрических искажений, поддержки объемных растровых и векторных форматов, по интерактивному улучшению изображений, по интерактивному дешифрированию и классификации, по анализу снимков в радиодиапазоне, оцифровки и многие другие возможности. В отличие от других пакетов по обработке снимков, в ENVI встроен удобный язык программирования IDL (Interactive Data Language), так что Вы можете расширить функциональные возможности ENVI или создать собственные под-

программы. Открытая архитектура ENVI обеспечивает удобство обработки данных, полученных со спутников Landsat, SPOT, RADARSAT, NASA, NIMA, NOAA, EROS Data Center, Space Imaging, Terra, ESA, а также предусматривается включение в этот список EartWatch и ORBIMAGE и других спутников.

Общая технологическая схема ввода, обработки и вывода данных в ГИС (рис.), поддерживаемая соответствующими программными средствами, представлена в виде набора функциональных блоков, среди которых принято выделять следующие: ввод и редактирование данных, поддержка математических моделей природных процессов с применением наземных и пространственных данных, хранение данных, проектирование и ведение баз данных (БД) атрибутивной информации ГИС, поддержка функций систем управления базами данных (СУБД), преобразование систем координат и трансформация картографических проекций, растрово-векторные операции, пространственное моделирование (геомоделирование), построение и использование моделей пространственных объектов, их взаимосвязей и динамики процессов средствами встроенных функций пространственного моделирования и создания интерфейса с моделями вне среды ГИС.



Рис. Алгоритм применения спутниковой информации для расчета физических параметров атмосферы.

В блок математического моделирования входят численные модели переноса излучения в атмосфере с учетом граничных условий поступления солнечного излучения в атмосферу, рассеяния в атмосфере и отражения от земной поверхности. Измеряемые на спутнике величины radians

(интенсивность поступающего на сканер излучения $\text{вт/м}^2 \cdot \text{мкм ср}$), reflection (отношение поступающего на сканер излучения на спектральную солнечную постоянную), а также материалы NASA для сканера MODIS дают возможность определения количественные значения физических параметров атмосферы.

Обратным задачам переноса излучения в атмосфере уделено много внимания. В работах [2-6, 9, 10] исследовались основные свойства радиационных потоков и рассмотрены математические проблемы их решения. Оптические параметры, заложенные в эти задачи, задавались либо априорно, либо по данным наземных измерений. Поэтому актуальной задачей является их максимальное использование для получения параметров состояния атмосферы и земной поверхности.

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. 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.

Ослабление солнечного излучения 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 $\tau_\lambda = -\ln P_\lambda$. Индикатриса при аэрозольном и релеевском рассеянии представляется по формуле предложенной В.Г. Фесенковым.

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).

В случае многократного рассеяния альбедо A_λ определяется следующим образом:

$$A_\lambda = \frac{\pi(I - I^{(0)})}{\psi \left(g(\mu_0, \varphi_0) E_\lambda e^{-\tau(h)/\mu_0} + \int_0^{2\pi} \int_0^1 I^{(0)} \mu d\mu d\varphi + (I - I^{(0)}) \right) \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^1 \psi \mu d\mu d\varphi},$$

где $I(z, \mu, \varphi)$ – сигнал со спутника, а $I^{(0)}(z, \mu, \varphi)$ и $\psi(z, \mu, \varphi)$ определяются из следующих задач:

$$\mu \frac{\partial I^{(0)}}{\partial z} + \sigma I^{(0)} = \frac{\sigma_s}{4\pi} \left[\int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 g(\mu, \mu', \varphi, \varphi') I(z, \mu', \varphi') d\mu' d\varphi' + \pi \sigma_s g(\mu, \varphi) E_\pi e^{-\tau/\mu} \right]$$

$$I^{(0)}(0, \mu, \varphi) = 0 \quad \text{при } \mu > 0, \quad I^{(0)}(H, \mu, \varphi) = 0 \quad \text{при } \mu < 0$$

$$\mu \frac{\partial \psi}{\partial z} + \sigma \psi = \frac{\sigma_s}{4\pi} \left[\int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 g(\mu, \mu', \varphi, \varphi') \psi(z, \mu', \varphi') d\mu' d\varphi' \right]$$

$$\psi(0, \mu, \varphi) = 0 \quad \text{при } \mu > 0, \quad \psi(0, \mu, \varphi) = 1 \quad \text{при } \mu < 0.$$

В этих выражениях $I(z, \mu, \varphi)$ – интенсивность излучения; $\mu = \cos\theta$, θ – угол зондирования ($\mu > 0$ – соответствует нисходящему потоку, $\mu < 0$ – восходящему); S_λ – поток солнечной радиации на верхней границе атмосферы; $g(\gamma)$ – индикатриса рассеяния; γ – угол рассеяния; A_λ – альбедо

земной поверхности; μ_0, φ_0 – направление распространения солнечного излучения; σ_s – коэффициент рассеяния излучения; τ_λ – оптическая толщина атмосферы; $\sigma = \sigma_s + \sigma_n$, σ_n – коэффициент поглощения излучения; z, φ, θ – сферическая система координат.

Рассмотрим решение задачи. Уравнение представим в виде конечно-разностной схемы с направленными разностями, а двойной интеграл в правой части уравнения в виде двойного ряда с использованием метода Симпсона для вычисления определенных интегралов.

$$\mu \frac{I_{i,j,k} - I_{i,j,k-1}}{h} + \sigma I_{i,j,k} = \frac{\sigma_s}{2\pi} F1_{i,j,k} + F_{i,j,k}, \text{ при } \mu > 0$$

$$\mu \frac{I_{i,j,k+1} - I_{i,j,k}}{h} + \sigma I_{i,j,k} = \frac{\sigma_s}{2\pi} F1_{i,j,k} + F_{i,j,k}, \text{ при } \mu < 0$$

где h – шаг расчетной сетки по z ,

$$F_{i,j,k} = \pi g_{i,j} E_\lambda e^{-\frac{\tau}{\mu}}, \text{ при } \mu > 0$$

$$F_{i,j,k} = \pi g_{i,j} E_\lambda e^{\frac{\tau}{\mu}}, \text{ при } \mu < 0$$

$$F1_{i,j,k} = \sum_{m=1}^M g_{i,j,1,m} I_{1,m,k} + \sum_{m=1}^M g_{i,j,N,m} T_{N,m,k} + 2 \sum_{n=2}^{N-1} g_{i,j,n,1} T_{n,1,k} + 2 \sum_{n=2}^{N-1} g_{i,j,n,M} T_{i,j,n,M} + 4 \sum_{m=2}^{M-1} \sum_{n=2}^{N-1} g_{i,j,n,m} T_{i,j,n,m}$$

Итерационный алгоритм по определению искомой функции $I_{i,j,k}$ заменяется в виде:

$$I_{i,j,k}^{n+1} = (\mu I_{i,j,k-1}^{n+1} + h \frac{\sigma_s}{2\pi} F1_{i,j,k} + F_{i,j,k} h) / (\mu + \sigma h), \text{ при } \mu > 0$$

$$I_{i,j,k}^{n+1} = (-\mu I_{i,j,k+1}^{n+1} + \frac{\sigma_s}{2\pi} h F1_{i,j,k} + F_{i,j,k} h) / (\sigma h - \mu), \text{ при } \mu < 0$$

В $F1_{i,j,k}$ входит определяемая функция $I_{i,j,k}^n$. В первом приближении $I_{i,j,k}^{(1)} = 0$.

Рассчитаны значения спектрального альbedo для различных типов почв земной поверхности. Получено удовлетворительное согласование расчетных данных и данных наземных измерений альbedo земной поверхности. Значения спектрального альbedo водной поверхности Каспийского моря после атмосферной коррекции совпадают с наблюдаемыми значениями альbedo водной поверхности. Перепад значений спектрального альbedo водной поверхности до и после атмосферной коррекции составил менее 3 %.

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). 2. Спектральный коэффициент аэрозольного ослабления // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2003. – Т. 39. – № 2. – С. 262-268.
2. Султангазин У.М. Математические проблемы построения алгоритмов атмосферной коррекции в дистанционном зондировании // Вестник Кыр. Гос. Ун-та, 2001. – Сер. 3. – Вып. 5. – С. 15-26.
3. Султангазин У.М., Ахмеджанов А.Х. Численные методы восстановления вертикальных профилей температуры и удельной влажности по данным дистанционного зондирования из космоса // Гидрометеорология и экология. – 2001. – № 1-2. – С. 7-10.
4. Султангазин У.М., Ахмеджанов А.Х. Об одном методе восстановления альбедо земной поверхности по данным космического зондирования // Гидрометеорология и экология. – 2003. – №3-4. – С. 7-16.
5. Султангазин У.М., Ахмеджанов А.Х., Караданов Т.К. Алгоритм расчета интенсивности солнечного излучения при условии многократного рассеяния на основе спутниковых данных // Гидрометеорология и экология. – 2005. – №2. – С. 7-19.
6. Султангазин У.М., Ахмеджанов А.Х., Глушко В.Н., Егорова Л.А., Караданов Т.К., Лысенко П.Г. Шагарова Л.В. Спектральная и пространственная атмосферная коррекция данных дистанционного зондирования со спутника «TERRA/MODIS» // Оптика атмосферы, СО РАН. – 2007. – Том 20. – №3. – С. 258-261.
7. 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.
8. 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.

9. Sultangazin U.M. Mathematical problems connected with construction of algorithms for atmosphere correction in remote sensing // Journal of Inverse and ILL-Posed Problems. The Netherlands, Vol. 9, № 6, 2001, – P. 655-668.
10. Sultangazin U.M., Ahmedzhanov A.H., Glushko V.N. Numerical methods of reconstruction of optical parameters of terrestrial surface and atmosphere using remote sensing // Mathematics and Computers in Simulation, Volume 67, Issue 4-5, 3 December 2004, – P. 391-398.

Институт космических исследований, г. Алматы

**АТМОСФЕРАНЫҢ ЖӘНЕ ЖЕР БЕТІНІҢ ОПТИКАЛЫҚ
ПАРАМЕТРЛЕРІН ЕСЕПТЕУДЕ ҒАРЫШТЫҚ БАРЛАУ
МӘЛІМЕТТЕРІН ҚОЛДАНУ**

Техн. ғылымд. докторы А.Х. Ахмеджанов

Техн. ғылымд. канд. Т.К. Қараданов

Ғарыштық түсірілім кезіндегі атмосфераның оптикалық параметрлерін қалпына келтіру үшін дистанциялық барлау мәліметтерін қолдану алгоритмі өңделген.