

У.М. Султангазин, А.Х. Ахмеджанов, В.Н. Глушко, Л.А. Егорова,
Т.К. Караданов, П.Г. Лысенко, Л.В. Шагарова

Спектральная и пространственная атмосферная коррекция данных дистанционного зондирования со спутника «Terra/MODIS»

Институт космических исследований ЦАФИ МОН РК, г. Алматы, Республика Казахстан

Поступила в редакцию 13.06.2006 г.

Рассматриваются вопросы атмосферной коррекции космических изображений с применением численных матриц значений интенсивности излучения, фиксируемого на спутнике «Terra/MODIS», и данных наземных синхронных измерений оптических характеристик атмосферы.

При изучении природных ресурсов Земли с помощью космических аппаратов предметом исследования являются регистрируемые со спутников характеристики солнечной радиации, отраженной от естественных образований на земной поверхности, или характеристики их собственного излучения. Солнечная радиация и собственное излучение земной поверхности трансформируются при прохождении через атмосферу, поэтому в задачах изучения природных ресурсов необходим учет влияния атмосферы.

Для восстановления различных характеристик зондируемой земной поверхности на основе спутниковых наблюдений видимого диапазона спектра требуется проведение атмосферной коррекции космических изображений с целью исключения искажений, вносимых атмосферой.

При математическом решении указанной проблемы были получены значительные теоретические результаты [1–11]. Разные подходы отличаются разной степенью упрощения состава и строения атмосферы. В настоящее время разрабатываются различные подходы и методы атмосферной коррекции космических изображений с учетом высокой изменчивости параметров атмосферы и многообразия типов подстилающей поверхности.

В данной статье предлагается использовать спутниковую информацию, поступающую на приемную станцию, и результаты подспутниковых синхронных измерений оптических характеристик атмосферы. Космический снимок, получаемый со спутника «Terra/MODIS», представляется в виде двух блоков численных матриц, соответствующих величине спектральной яркости [называемой *radiance*, Вт/(м² · мкм · ср)] фокусируемого на пиксели сенсора «MODIS» участка подстилающей поверхности и безразмерному параметру (*reflections*), равному отношению уходящего излучения к поступающему излучению на верхнюю границу атмосферы. Угол сканирования изменяется от –55 до +55° от надира.

Задачей атмосферной коррекции данных дистанционного зондирования поверхности Земли с космических аппаратов (КА) является оценка истинной величины спектральной яркости подстилающей поверхности. Истинную яркость участка подстилающей поверхности обозначим $B_{1\lambda}$, а $B_{2\lambda}$ — яркость этого участка, полученная с сенсора КА. Величина $B_{1\lambda}$ определяется суммарной естественной освещенностью и альбедо данного участка в предположении ламбертовского отражения:

$$B_{1\lambda} = (E_{0\lambda} e^{-\tau_{\delta\lambda} m_{\Theta}} \cos Z_{\Theta}^0 + E_{\lambda H}) q_{\lambda} / \pi. \quad (1)$$

Величина $B_{2\lambda}$ является суммой истинной яркости участка подстилающей поверхности $B_{1\lambda}$, ослабленной атмосферой в $e^{-\tau_{\delta\lambda} m}$ раз, и яркости восходящего полного рассеянного излучения атмосферы $\uparrow B_{\lambda}$:

$$B_{2\lambda} = B_{1\lambda} e^{-\tau_{\delta\lambda} m} + \uparrow B_{\lambda}(\tau_{\delta\lambda}, \mu(\psi), Z_{\Theta}^0, m), \quad (2)$$

где $E_{0\lambda}$ — внеатмосферная спектральная солнечная постоянная; $\tau_{\delta\lambda}$ — оптическая толщина экстинкции атмосферы; m_{Θ} — оптическая масса атмосферы в направлении на Солнце; m — оптическая масса атмосферы в направлении зондирования с КА; Z_{Θ}^0 — зенитное расстояние Солнца; $E_{\lambda H}$ — компонента естественной спектральной освещенности, создаваемая рассеянным светом неба; q_{λ} — спектральное альбедо подстилающей поверхности; $\uparrow B_{\lambda}$ — полная яркость восходящего рассеянного излучения атмосферы в направлении зондирования с КА, зависящая от оптической толщины, индикатрисы, зенитного расстояния Солнца, оптической массы в направлении зондирования и многократно рассеянного прямого и отраженного от подстилающей поверхности излучения в атмосфере.

Рассмотрим условия, при которых $B_{2\lambda}$ (яркость, полученная с сенсора КА) может быть равна истинной яркости участка подстилающей поверхности $B_{1\lambda}$.

Истинную яркость подстилающей поверхности представим в виде

$$B_{1\lambda} = (B_{2\lambda} - \uparrow B_{\lambda}) / e^{-\tau_{\delta\lambda}^m}$$

Если $\uparrow B_{\lambda} = (1 - e^{-\tau_{\delta\lambda}^m})B_{2\lambda}$, то $B_{2\lambda} = B_{1\lambda}$, и далее: если $\uparrow B_{\lambda} < (1 - e^{-\tau_{\delta\lambda}^m})B_{2\lambda}$, то $B_{2\lambda} < B_{1\lambda}$, а при $\uparrow B_{\lambda} > (1 - e^{-\tau_{\delta\lambda}^m})B_{2\lambda}$ имеем $B_{2\lambda} > B_{1\lambda}$.

Для определения истинной величины спектральной яркости участка подстилающей поверхности по данным дистанционного зондирования (ДДЗ) необходимо знать $e^{-\tau_{\delta\lambda}^m}$ и $\uparrow B_{\lambda}$. Величину спектральной оптической толщины экстинкции атмосферы $\tau_{\delta\lambda}$ дают синхронные наземные измерения. Величина яркости восходящего полного рассеянного излучения атмосферы, в идеальном случае, равна яркости абсолютно черного участка подстилающей поверхности, зондируемого с КА. Для определения $\uparrow B_{\lambda}$ можно воспользоваться тем, что спектральный коэффициент яркости глубоководных бассейнов с прозрачной водой при наблюдении в надир (вне пределов «солнечной дорожки») значительно меньше, чем альbedo этих водоемов. При наблюдении в надир яркость водоема складывается из яркости толщи воды и яркости отраженной поверхностью водоема рассеянной радиации из зенитного участка неба [12].

Были проанализированы спектральные зависимости энергетической яркости различных водоемов (Каспийское море, озеро Балхаш, Иссык-Куль, Чарын), полученные со спутников «Terra/MODIS», и литературные данные по яркости системы «океан – атмосфера» [12]. Результаты анализа показали, что значения спектральной энергетической яркости над Иссык-Кулем и океаном наиболее близки.

Для проведения атмосферной коррекции по ДДЗ с MODIS были использованы спектральные величины яркости над Иссык-Кулем 17.09.2004 г. при зондировании практически в надир. Для учета яркости толщи водоема были использованы данные спектральной яркости центральной части Черного моря, полученные по программе «Интеркосмос» с борта научно-исследовательского судна «Профессор Колесников» Морского гидрофизического института АН Украины (высота борта 5 м).

На рис. 1 представлены спектры яркости над Иссык-Кулем, принятые с MODIS 17.09.2004 г., с борта НИС «Профессор Колесников» над Черным морем, и полученный по этим данным спектр яркости восходящего рассеянного излучения атмосферы $\uparrow B_{\lambda}$, необходимый для учета фона рассеянного излучения при атмосферной коррекции. Данные взяты при Z_0^0 около 40° .

Имея spectroэнергетическую яркость восходящего рассеянного излучения атмосферы и данные синхронных натуральных наземных измерений оптических характеристик атмосферы 17.09.2004 г., проведем атмосферную коррекцию произвольно выбран-

ных двух участков подстилающей поверхности между оз. Балхаш и Иссык-Куль при одинаковых углах сканирования ($\alpha = 25^\circ$).

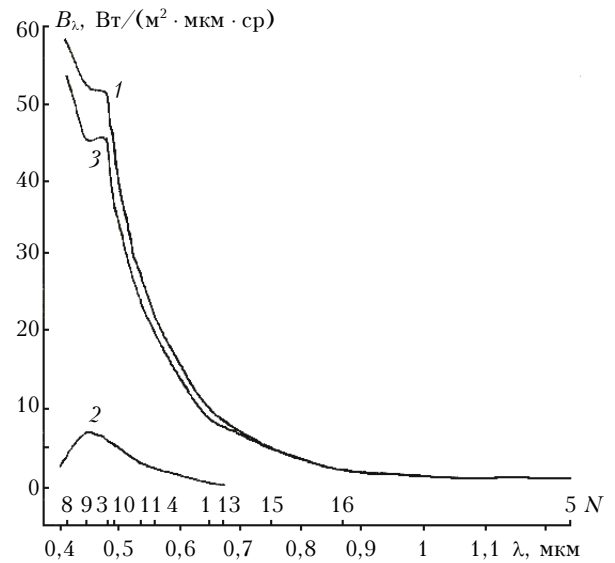


Рис. 1. Spectroэнергетическая яркость: 1 – яркость восходящего излучения над Иссык-Кулем 17.09.2004 г.; 2 – яркость Черного моря с борта НИС «Профессор Колесников»; 3 – яркость восходящего рассеянного излучения атмосферы. N – номера спектральных каналов спутника «Terra/MODIS»

На рис. 2 приведены спектры яркости в абсолютных энергетических единицах выбранных пикселей до и после атмосферной коррекции.

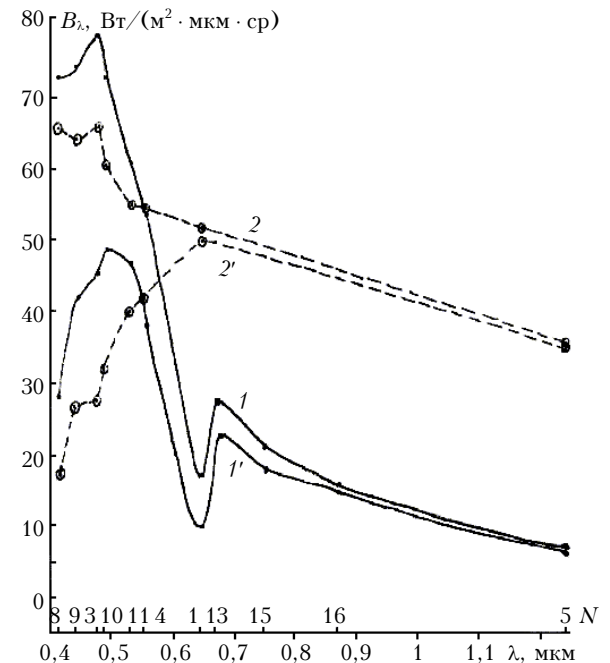


Рис. 2. Spectroэнергетическая яркость 17.09.2004 г. до (кривые 1 и 2) и после (1' и 2') атмосферной коррекции. Пиксели 1 и 2 произвольно выбраны в районе между оз. Балхаш и Иссык-Куль. N – номера спектральных каналов спутника «Terra/MODIS»

Как видно из рис. 2, атмосферная коррекция значительно трансформирует спектр яркости участков подстилающей поверхности, полученный с КА, особенно в коротковолновом участке спектра. При $\lambda = 0,412$ мкм яркость уменьшается для пикселя 2 с 66 до $17,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм} \cdot \text{ср})$.

Для иллюстрации пространственного распределения спектральноэнергетической яркости зондируемого участка подстилающей поверхности до и после атмосферной коррекции взята линейка пикселей вдоль пролета КА на том же угле сканирования $\alpha = 25^\circ$ 17.09.2004 г. при длинах волн 0,412 и 0,479 мкм. Был выбран участок с пестрой подстилающей поверхностью, проходящий через горы.

На рис. 3, 4 представлено распределение яркости до и после атмосферной коррекции вдоль линейки пикселей для участка подстилающей поверхности с сильно отличающимися отражательными свойствами. Диапазон изменения яркости для одного участка линейки пикселей $0-70 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм} \cdot \text{ср})$, для другого $0-250 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм} \cdot \text{ср})$.

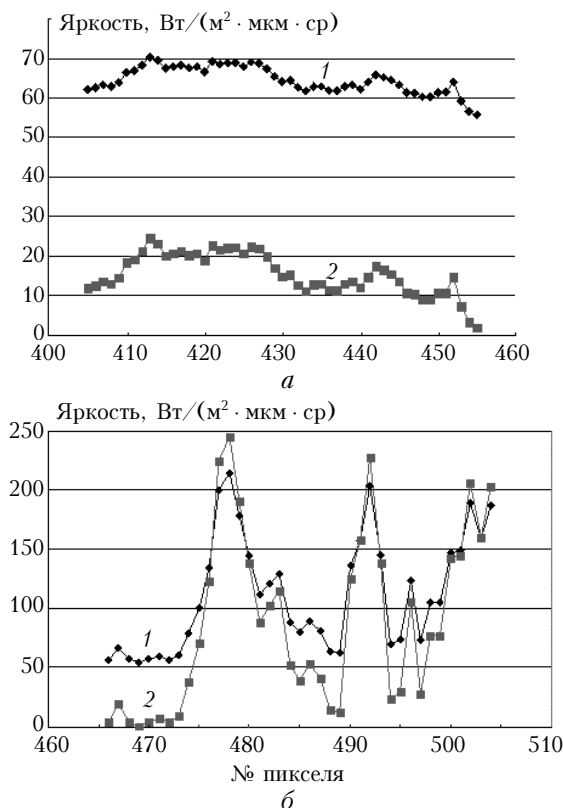


Рис. 3. Распределение яркости вдоль линейки пикселей до (1) и после (2) атмосферной коррекции для пикселей: а – 405–455; б – 465–505 при $\lambda = 0,412$ мкм, 8-й канал

Видно, что для меньших значений яркостей атмосферная коррекция приводит к существенному уменьшению значений яркости (рис. 3, а). Для горных участков при больших значениях яркости кривые пересекаются. Это обусловлено тем, что, как показано выше, при $\uparrow B_\lambda = (1 - e^{-\tau_{\delta\lambda} m}) B_{2\lambda}$ доли фонового рассеянного восходящего излучения и ослабления истинной величины яркости пикселя атмо-

сферой становятся равными, т.е. $B_{2\lambda} = B_{1\lambda}$. Аналогичные по характеру изменения пространственного распределения величин яркости наблюдаются и при $\lambda = 0,479$ мкм (см. рис. 4). Масштаб различный. (Разрешение при 0,412 и 0,479 мкм различно: 500×500 и 1000×1000 м, и номера пикселей вдоль абсцисс отличаются кратно).

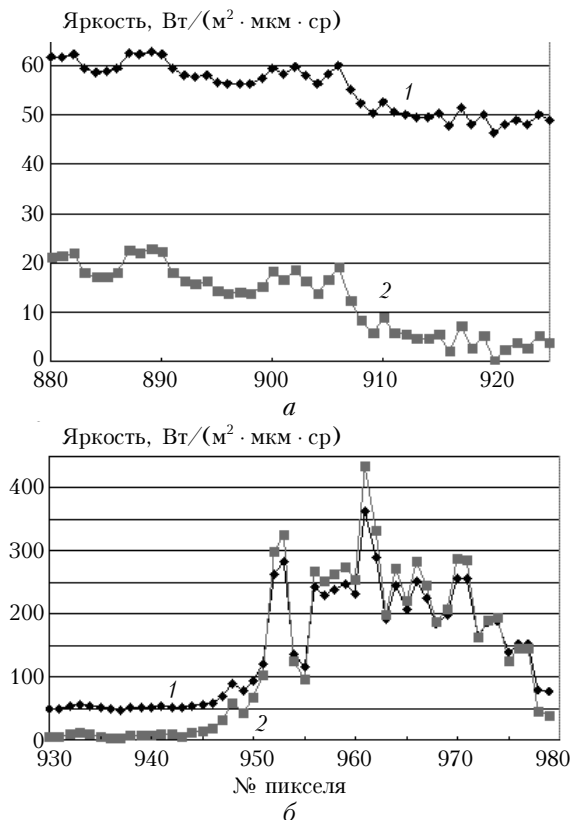


Рис. 4. Распределение яркости вдоль линейки пикселей до (1) и после (2) атмосферной коррекции для пикселей: а – 880–925; б – 930–980 при $\lambda = 0,479$ мкм, 3-й канал

Результаты атмосферной коррекции приведены для двух произвольно выбранных пикселей и при двух длинах волн видимого участка спектра вдоль линейки пикселей с максимальным диапазоном величин яркости, зарегистрированного сенсором на космическом аппарате 17.09.2004 г.

Для проведения атмосферной коррекции космических изображений конечной площадки земной поверхности, сканируемой сенсором на космическом аппарате, необходимо использовать спектральные значения индикатрисы яркости атмосферы, полученные по синхронным наземным измерениям с учетом изменения зенитного расстояния Солнца для каждого пикселя космического снимка.

1. Sultangazin U.M. Mathematical problems connected with construction of algorithms for atmosphere correction in remote sensing // J. of Inverse and ILL-Posed Problems. 2001. V. 9. N 6. P. 655–668.
2. Сушкевич Т.А. О теории оптического передаточного оператора системы «атмосфера – земная поверхность». Препр. / Ин-т прикладной математики им. М.В. Келдыша. М.: РАН, 1999. 20 с.

3. *Матвеев Л.Т.* Физика атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1976. 477 с.
4. *Шалина Е.В.* Блок атмосферной коррекции спутниковых изображений в рамках ГИС // Исслед. Земли из космоса. 1995. № 4. С. 59–65.
5. *Волков Ю.А., Плахина И.Н., Ретина И.А.* Радиационные потоки у поверхности Земли по данным измерений и численного моделирования // Метеорол. и гидрол. 1999. № 7. С. 14–21.
6. *Fraser R.S., Ferrare R. A., Kaufman Y.J., Mattoo S.* Algorithm for atmospheric corrections of aircraft and satellite imagery // Int. J. Remote Sens. 1992. V. 13. N 3. P. 541–557.
7. *Dozier J., Frew J.* Atmospheric corrections to satellite radiometric data over rugged terrain // Remote Sens. Environ. 1981. V. 11. P. 191–205.
8. *Fraser R.S., Ferrare R.A., Kaufman Y.J., Mattoo S.* Algorithm for atmospheric corrections of aircraft and satellite imagery // NASA Technical Memorandum. 100751. 1989. P. 98.
9. *Kaufman Y.J., Sendra C.* Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery // Int. J. Remote Sens. 1988. V. 9. N 8. P. 1357–1381.
10. *Putsay M.* A simple atmospheric correction method for the short wave satellite image // Int. J. Remote Sens. 1992. V. 13. N 8. P. 1549–1558.
11. *Roger J.C., Vermote E., El Saleous N.* Atmospheric Correction of MAS data during SCAR-A experiment // Atmos. Sens. and Modeling. Rome. September 29–30: Proc. SPIE. 1994. V. 2311. P. 83–89.
12. *Смерколов В.А.* Прикладная оптика атмосферы. СПб.: Гидрометеониздат, 1997. 373 с.

U.M. Sultanqazin, A.Kh. Akhmedzhanov, V.N. Glushko, L.A. Egorova, T.K. Karadanov, P.G. Lysenko, L.V. Shagarova. **Spectral and spatial atmospheric correction of Terra/MODIS remote sensing data.**

Atmospheric correction of space images with the use of numerical matrices of radiation intensity values recorded by the Terra/MODIS satellite, as well as simultaneous ground measurements of optical characteristics of the atmosphere is under consideration.