

УДК 528.825:551.521

**К ВОПРОСУ АТМОСФЕРНОЙ КОРРЕКЦИИ КОСМИЧЕСКИХ
ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Академик НАН РК У.М. Султангазин
Канд. геогр. наук А.Х. Ахмеджанов

Представлен метод атмосферной коррекции спутниковых изображений земной поверхности, основанный на использовании контрольных участков космоснимка для определения оптических параметров атмосферы и геометрических условий сканирования. Эффективность работы метода продемонстрирована на примере обработки данных многозонального сканера "Modis", установленного на платформе американского спутника "Терра". Отмечено увеличение контрастности на построенных изображениях по сравнению с самими космическими снимками, что подтверждается на графиках распределений спектральной яркости и изменение гистограмм яркости изображений.

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. Для решения этих задач необходимо определить значения параметров, обуславливающих изучаемый процесс. Для этого могут быть использованы данные спутниковой информации, прием которых осуществляется в Институте космических исследований. Для решения этих задач необходимо определить значения параметров, обуславливающих изучаемый процесс.

Система **MODIS** (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer – сканирующий спектрорадиометр среднего разрешения) предназначена для сбора данных о поверхности Земли как единой системы. Данные MODIS по всей поверхности Земли поступают со спутника Terra каждые 2 дня в **36 спектральных зонах** (в диапазоне 0,405...14,385 мкм) с разрешением 250...1000 м, что обеспечивает моделирование в глобальном и региональном масштабе. Материалы съемки MODIS имеют широкий спектр применения для исследования **атмосферы, океана и суши**. MODIS состоит из двух ска-

нирующих 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. В двух зонах (620...670 и 841...876 нм) съемка 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.

При прохождении через земную атмосферу сигнал, фиксируемый на спутнике, претерпевает изменения из-за поглощения и рассеяния электромагнитного излучения атмосферными газами и аэрозольными частицами. На сканер спутника попадает также и собственное рассеянное излучение атмосферы. Вследствие этого происходит изменение спектральной, угловой и пространственной структуры отраженного излучения от изучаемого объекта, в результате чего ослабляется отраженное излучение объектов земной поверхности.

При математическом решении указанной проблемы были получены значительные теоретические результаты [1, 2]. Разные подходы отличаются разной степенью упрощения состава и строения атмосферы [4...7]. В настоящее время разрабатываются различные подходы и методы атмосферной коррекции космических изображений с учетом высокой изменчивости параметров атмосферы и многообразия подстилающей поверхности [8...15].

Измеряемая на спутнике интенсивность солнечной радиации J_{λ}^{\uparrow} и коэффициент яркости R_{λ} земной поверхности, соответствующие длине волны λ , связаны следующим соотношением:

$$J_{\lambda}^{\uparrow}(\tau, \mu, \varphi) = R_{\lambda}(E_{\lambda} \exp\left(\frac{-\tau_{\lambda}}{\mu_0}\right) + F_{\lambda}^{\downarrow}(\tau, \mu, \varphi)) \exp\left(\frac{-\tau_{\lambda}}{\mu}\right) + I_{\lambda}^{(0)}(\tau, \mu, \varphi), \quad (1)$$

где $R_{\lambda} = \frac{q}{\pi}$, q – альбеда земной поверхности, E_{λ} – солнечная постоянная, $\mu_0 = \cos \zeta_0$, ζ_0 – зенитное расстояние Солнца, ζ – угол визирования, φ – азимут, τ_{λ} – оптическая толщина атмосферы, $F_{\lambda}^{\downarrow}(\tau, \mu, \varphi)$ – падающий на земную поверхность поток солнечной радиации, рассеянный атмосферой в нижнюю полусферу, $I_{\lambda}^{(0)}(\tau, \mu, \varphi)$ – интенсивность рассеянной радиации в атмосфере.

Задача атмосферной коррекции заключается в восстановлении функции $P(\tau, \mu, \varphi)$, коэффициента яркости R_{λ} и значения альбеда для каждого пикселя. По распределению этих параметров можно судить о со-

стоянии объектов земной поверхности. В соотношении (1) значения величины $J_{\lambda}^{\uparrow}(\tau, \mu, \varphi)$, углов визирования, зенитного угла и азимута можно определить по данным станции приема спутниковой информации.

Неизвестными величинами являются оптическая толщина атмосферы τ_{λ} , рассеянное собственное излучение атмосферы $I_{\lambda}^{(0)}(\tau, \mu, \varphi)$, падающий на земную поверхность поток рассеянной солнечной радиации $F_{\lambda}^{\downarrow}(\tau, \mu, \varphi)$ и альbedo земной поверхности q . Эти величины определены в результате решения задачи переноса излучения в атмосфере, как это было показано в работе [3], в которой были использованы средние значения оптических параметров атмосферы. При распознавании космического изображения по конкретному космическому снимку требуются значения оптических параметров атмосферы в момент съемки. Получение таких данных практически невозможно. Поэтому в нашей работе предлагается максимально использовать спутниковую информацию, поступающую на приемную станцию. Космический снимок представляется в виде двух блоков численных матриц, соответствующих величине интенсивности фиксируемого излучения, называемой radians ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1} \text{ ср}^{-1}$), и безразмерному параметру (reflections), равному отношению уходящего излучения к поступающему излучению на верхнюю границу атмосферы. Угол визирования изменяется – 55° до 55° от надира. Распределение зенитного угла по всему космическому снимку определяется по выдаваемым приемной станцией спутниковой информации значениям зенитных углов, соответствующих четырем углам космоснимка.

Оптическая толщина атмосферы, показывающая степень ослабления солнечной радиации при прохождении атмосферы, является одной из важных оптических характеристик. В практических расчетах ослабления потоков солнечной радиации, обусловленное поглощением и рассеянием, учитывают суммарно, путем введения общего коэффициента ослабления. Для определения этого коэффициента наиболее характерным является величина оптической толщины атмосферы при определенной длине волны. Этот параметр определяется следующим интегралом:

$$\tau_{\lambda}(z) = \int_0^z \rho \sigma dt, \quad (2)$$

где $\rho = \rho(z)$ – плотность атмосферы, σ – массовый коэффициент ослабления.

Для практического определения собственного излучения атмосферы $I_{\lambda}^{(0)}(\tau, \mu, \varphi)$ можно выбрать на космическом снимке (рис. 1) участок на наиболее глубоком месте акватории Каспийского моря (рис. 2), где не просматривается дно. Известно, что альbedo воды близко к нулю, а черный цвет на снимке может означать, что падающее излучение полностью поглощается. Поэтому можем предположить, что значение интенсивности фиксируемого излучения с этого участка равно значению собственного излучения атмосферы. Схема распределения угловых координат представлена на рис. 3. На рис. 4 показано распределение интенсивности излучения с этого выбранного участка вдоль горизонтали, проведенной через центр участка. Как видно на графике значение интенсивности излучения близко к нулю. На рис. 5 представлено распределение плотности значений интенсивности излучения по всему участку, где явно видно, что значения этой величины в основном близки к нулю.



Рис. 1. Космический снимок («Modis»).

Интенсивность нисходящего солнечного излучения $F_{\lambda}^{\downarrow}(\tau, \mu, \varphi)$ и альbedo q , характеризующим отражательную способность земной поверхности, были определены и в работе [3].

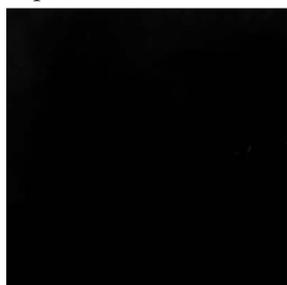


Рис. 2. Участок № 1, соответствующий наиболее глубокой части Каспийского моря

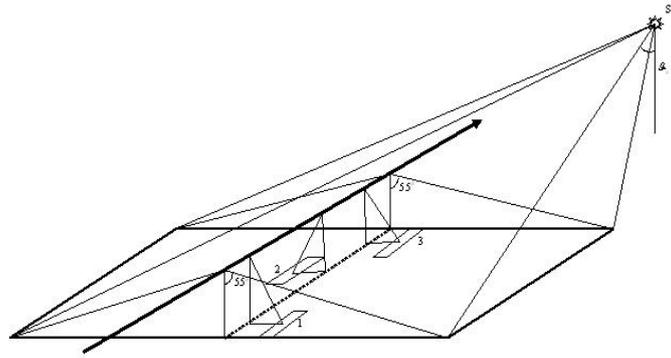


Рис. 3. Схема распределения угловых координат.

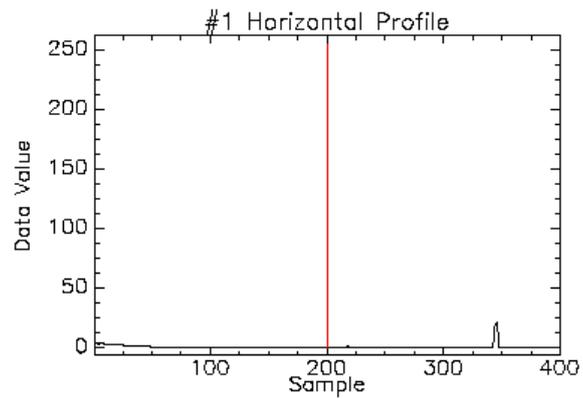


Рис. 4. Распределение спектральной яркости по горизонтали, проходящей через центр участка № 1.

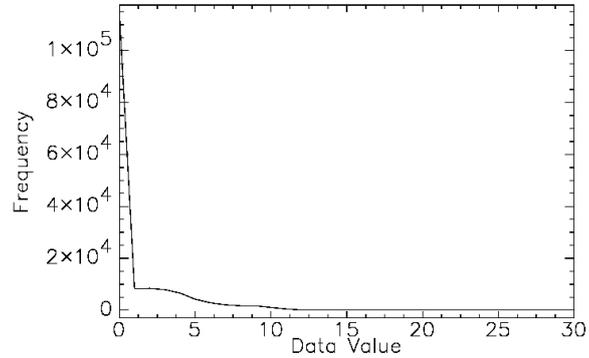


Рис. 5. Распределение плотности значений спектральной яркости по участку № 1.

Для восстановления поля распределения альбедо необходимо знание нисходящей солнечной радиации $F_{\lambda}^{\downarrow}(\tau)$ и оптической толщины ат-

мосферы τ_λ . Если известно значение оптической толщины атмосферы τ_λ , то для определения нисходящей солнечной радиации $F_\lambda^\downarrow(\tau, \xi)$ достаточно выбрать один участок с известным значением альбедо.

Для примера был выбран участок пустыни с альбедо q_{II} , значение которого было выбрано из справочников (в среднем $q_{II} = 0,3$). Этот участок на космическом снимке показан на рис. 6а и его изображение, построенное по рассчитанной матрице на рис. 6б. На последнем изображении стала отчетливо видна грядово-бугристая структура поверхности песков. На рис. 7а, 7б для двух этих изображений построены графики распределения спектральной яркости по горизонтали, проходящей через центр участка. График на рис. 7а близок к прямой линии, что действительно соответствует однородному изображению космоснимка этого участка. Значительное увеличение контрастности изображения отражено на рис. 7б, что значительно улучшает качество снимка по распознаванию объектов земной поверхности. Идентичность двух изображений подтверждает рис. 8, на котором представлены распределения плотности спектральной яркости.

В качестве второго участка была выбрана территория с зеленой растительностью рис. 9а, альбедо такой поверхности может соответствовать значению порядка 15...20%. На рис. 9б представлено изображение этого участка, построенное на основе пересчитанной матрицы. Второе изображение отличается от первого большей контрастностью. На рис. 10...11 представлены функции распределения спектральной яркости по горизонтали, проходящей через центр участка и распределение плотности спектральной яркости, соответствующие космическому снимку и изображению, построенному по числовой матрице значений интенсивности, отраженной от этого участка.

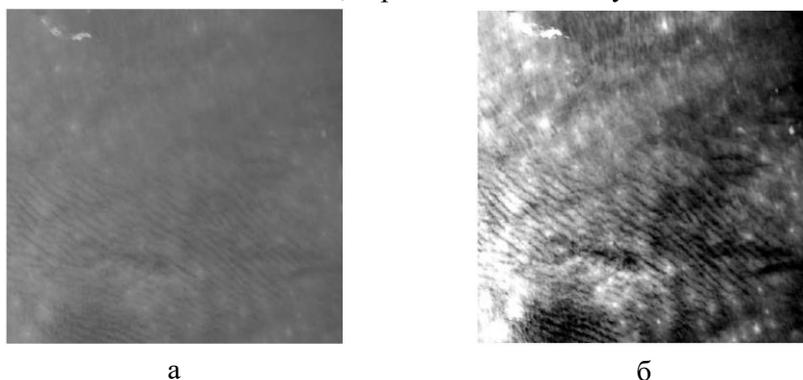
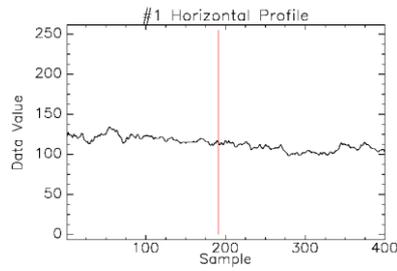
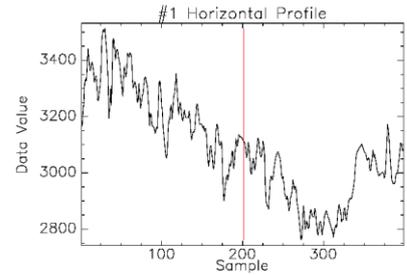


Рис. 6. Космический снимок участка пустыни с барханами (а) и изображение этого же участка по рассчитанной матрице (б).

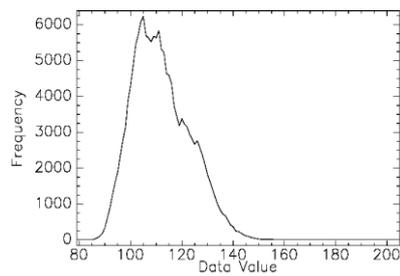


а

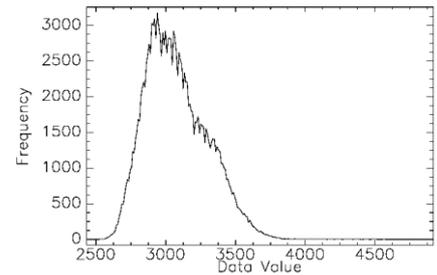


б

Рис. 7. Графики распределения спектральной яркости по горизонтали, проходящей через центр участка пустыни, соответствующие изображениям рис. ба и рис. бб.

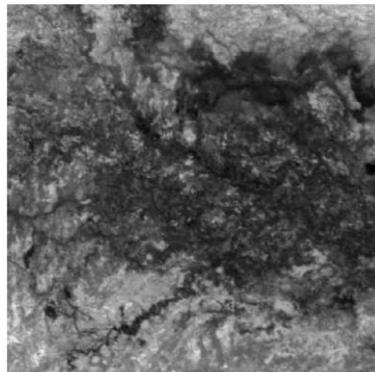


а

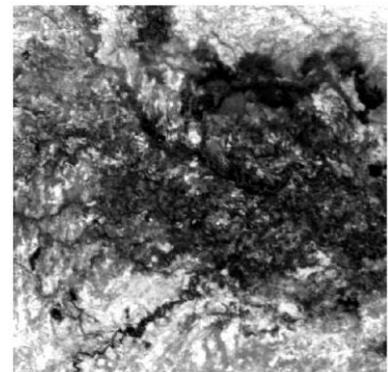


б

Рис. 8. Графики распределения плотности спектральной яркости участка пустыни, соответствующие изображениям рис. ба и рис. бб.

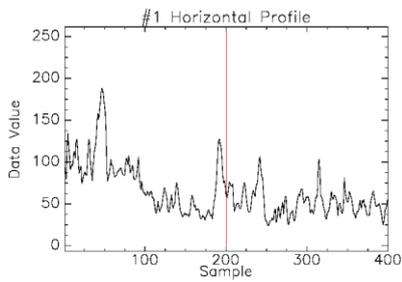


а

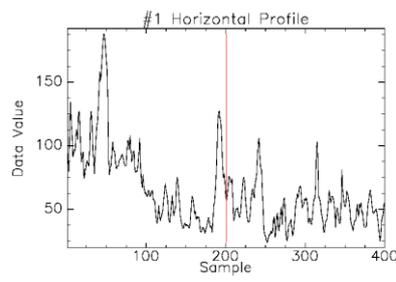


б

Рис. 9. Космический снимок участка с зеленой растительностью (а) и изображение этого же участка по рассчитанной матрице (б).

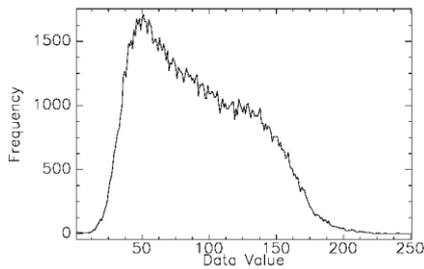


а

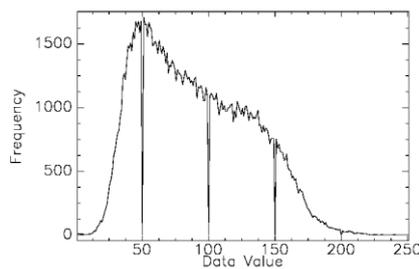


б

Рис. 10 Графики распределения спектральной яркости по горизонтали, проходящей через центр участка с зеленой растительностью, соответствующие изображениям рис. 9а и рис. 9б.



а



б

Рис. 11. Распределение спектральной плотности значений спектральной яркости участка пустыни с барханами, соответствующие изображениям рис. 9а и рис. 9б.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков Ю.А., Плахина И.Н., Репина И.А. Радиационные потоки у поверхности Земли по данным измерений и численного моделирования. // Метеорология и гидрология. – 1999. – №7. – С. 14-21.
2. Кондратьев К.Я. Лучистая энергия Солнца – Л.: Гидрометиздат, 1954. – 600 с.
3. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли. Основы и методы дистанционных исследований в геологии. – М.: Мир. – 1988. – 343 с.
4. Султангазин У.М. Математические проблемы построения алгоритмов атмосферной коррекции в дистанционном зондировании // Вестник Кыр. Гос. ун-та, сер.3, 2001. – Вып.5. – С. 15-26.

5. Султангазин У.М., Ахмеджанов А.Х. Об одном методе восстановления альбедо земной поверхности по данным космического зондирования // Гидрометеорология и экология, 2003. – №3, С. 9-17.
6. Сушкевич Т.А. О теории оптического передаточного оператора системы: «атмосфера – земная поверхность», Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша, РАН, препринт. – М.: 1999. – 20 с.
7. Шалина Е.В. Блок атмосферной коррекции спутниковых изображений в рамках ГИС // Исследования Земли из космоса. – 1995. – №4. – С. 59-65.
8. Dozier J., Frew J. Atmospheric corrections to satellite radiometric data over rugged terrain. *Remote Sens. Environ.*, 11, 1981. – P. 191-205
9. Fraser R.S., Ferrare R.A., Kaufman Y.J. and Mattoo S., Algorithm for atmospheric corrections of aircraft and satellite imagery. // *NASA Technical Memorandum 100751*, 1989. – 98 p.
10. Fraser R.S., Ferrare R.A., Kaufman Y.J. and Mattoo S., Algorithm for atmospheric corrections of aircraft and satellite imagery. *Int. J. Remote Sensing*, 13, 1992. – P. 541-557.
11. Kaufman Y.J., Sendra C., Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery. *Int. J. of Remote Sensing*, 9, 1988. – P. 1357-1381.
12. Putsay M. A simple atmospheric correction method for the short wave satellite image. // *Int. J. Remote Sensing* 1992. – 13(8), P. 1549-1558.
13. Roger J.C., Vermote Eric and Nazmi El Saleous "Atmospheric Correction of MAS data during SCAR-A experiment" // *Atmospheric Sensing and Modeling*, Rome, Italy, September 29-30, SPIE proceedings, Vol. 2311, 1994. – P. 83-89.
14. 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.
15. Tanr D., Holben B.N. and Kaufman Y.J. Atmospheric Correction algorithm for NOAA-AVHRR Products: Theory and Application. // *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing* 30. – 1992. – P. 231-248.

Институт космических исследований

КОСМОСТЫҚ КЕСКІНДЕРДІ АТМОСФЕРАЛЫҚ ТҮЗЕТУ МӘСЕЛЕСІ

ҚР ҰҒА академигі У.М. Сұлтанғазин
Геогр. ғылымд. канд. А.Х. Ахмеджанов

Атмосфераның оптикалық параметрлері және сканерлеудің геометриялық жағдайын анықтау үшін космөкіністердің бақылау бөліктерін пайдалануға негізделген жер беті спутнигі кескіндерін атмосфералық түзету әдісі ұсынылған. Ұсынылған әдістің тиімділігі «Терра» американдық спутнигі платформасында қондырылған «Modis» көпзональды сканерінің мәліметтерді өңдеуін мысалға келтіріп көрсетілген. Космостық көріністермен салыстырғанда тұрғызылған кескіндерде қарама-қайшы түстерінің ұлғаюы байқалған. Бұл спектральды жарықтығының таралуы мен кескіндер жарықтығы гистограммасының өзгерісі графигімен дәлелденеді.