

УДК 551.501: 629.195.1

**АЛГОРИТМ РАСЧЕТА СПЕКТРАЛЬНОГО АЛЬБЕДО
ЗЕРНОВЫХ ПОЛЕЙ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ**

Канд. техн. наук Н.Р. Муратова

На основе решения обратной задачи переноса коротковолнового излучения получены алгоритмы расчета спектрального альбедо зерновых полей по спутниковым измерениям. Показано удовлетворительное соответствие расчетных и измеренных значений спектрального альбедо.

В последнее время появились многочисленные работы, направленные на улучшение имеющихся моделей оценки состояния зерносеющих районов, путем включения в них спутниковых данных [1]. Перспективной для использования является модель продуктивности сельскохозяйственных культур EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator), которая разработана Сельскохозяйственной научно-исследовательской службой Департамента сельского хозяйства Соединенных Штатов (Soil and Water Research Laboratory USDA). Экономически оправданными и информативными являются поступающие со спутника TERRA/MODIS значения интенсивности уходящего излучения. Эти данные характеризуют отражательную способность подстилающей поверхности (альбедо). В [2] показана взаимосвязь состояния зерновых полей и значений альбедо. В [3] показана возможность изучения динамики отражательных свойств яровой пшеницы в вегетационный период по данным MODIS. Применение методов численной обработки космических изображений с определением значений спектрального альбедо открывает перспективы наблюдения за состоянием зерновых полей и разработки методов прогнозирования их урожайности.

В данной работе рассматривается возможность расчета альбедо и оценка состояния зерновых культур на основе космической информации.

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 [4]. В настоящее время широко применяется параметр A_{λ} (reflection), характеризующий отражательную способность подстилающей поверхно-

сти [5] и определяемый как отношение поступившего сигнала на спутник к спектральной солнечной постоянной. Постоянно изменяющееся состояние атмосферы вносит свои коррективы в параметр A_λ . В замутненной атмосфере значение интенсивности рассеянного излучения гораздо больше, чем в чистой. Задача расчета альбедо земной поверхности с учетом интенсивности рассеянного излучения в общем суммарном сигнале поставлена в этой работе.

Рассмотрим уравнение переноса коротковолнового излучения в атмосфере. Необходимо отметить, что в коротковолновом диапазоне существенным является процесс рассеяния излучения в атмосфере, а в длинноволновом процесс поглощения излучения. Поэтому в первом случае пренебрегают поглощением, а во втором рассеянием.

$$\frac{dJ_\lambda^\uparrow}{dz} = -\frac{1}{\cos\vartheta}(\rho_{\Pi}a_\lambda + \rho_p\sigma_\lambda)J_\lambda^\uparrow + \frac{\rho_p\sigma_\lambda}{\cos\vartheta}\chi_\lambda(\vartheta, \psi, \vartheta_\odot, \psi_\odot)S_\lambda(\vartheta_\odot, \psi_\odot) + \frac{\rho_p\sigma_\lambda}{\cos\vartheta} \int_0^{2\pi} d\psi' \int_0^\pi \chi_\lambda(\vartheta, \psi, \vartheta', \psi')J_\lambda(\vartheta', \psi')d\vartheta', \quad (1)$$

$$\frac{dJ_\lambda^\downarrow}{dz} = \frac{1}{\cos\vartheta}(\rho_{\Pi}a_\lambda + \rho_p\sigma_\lambda)J_\lambda^\downarrow - \frac{\rho_p\sigma_\lambda}{\cos\vartheta}\chi_\lambda(\vartheta, \psi, \vartheta_\odot, \psi_\odot)S_\lambda(\vartheta_\odot, \psi_\odot) - \frac{\rho_p\sigma_\lambda}{\cos\vartheta} \int_0^{2\pi} d\psi' \int_0^\pi \chi_\lambda(\vartheta, \psi, \vartheta', \psi')J_\lambda(\vartheta', \psi')d\vartheta', \quad (2)$$

где J_λ^\uparrow и J_λ^\downarrow – интенсивности отраженного и падающего излучений, ρ_{Π} , ρ_p – плотности поглощающих и рассеивающих газов в атмосфере, a_λ , σ_λ – коэффициенты поглощения и рассеяния, ϑ , ψ – углы зондирования со спутника и азимута, ϑ_\odot и ψ_\odot – угол и азимут Солнца, λ – длина волны, z – координата по высоте, S_λ – интенсивность прямой солнечной радиации, χ_λ – индикатриса рассеяния излучения.

Учитывая различие в рассеянии прямой и рассеянной радиации, удобно разделить последние члены в уравнениях переноса излучения в атмосфере представляют собой однократное и многократное рассеяния излучения в атмосфере.

Для различных конкретных задач уравнения (1) и (2) могут быть еще более упрощены. Сформулируем граничные условия. На верхней границе атмосферы нисходящая рассеянная радиация отсутствует, так как рассеяние возможно только в атмосфере. Но, как уже говори-

лось, в коротковолновой области спектра главную роль играет прямая солнечная радиация, которая максимальна именно за пределами атмосферы. Таким образом, при $z \rightarrow \infty$

$$J_{\lambda}^{\downarrow}(z) = \begin{cases} 0 & \text{при } \vartheta \neq \vartheta_{\odot}, \psi \neq \psi_{\odot} \\ S_{\lambda 0} & \text{при } \vartheta = \vartheta_{\odot}, \psi = \psi_{\odot} \end{cases}. \quad (3)$$

На земной поверхности восходящая радиация представляет собой нисходящую суммарную радиацию (т.е. сумму прямой и рассеянной радиации), отраженную от земной поверхности,

$$J_{\lambda}^{\uparrow}(0, \vartheta, \psi) = S_{\lambda}(0, \vartheta_{\odot}, \psi_{\odot}) r_{\lambda}(\vartheta, \psi, \vartheta_{\odot}, \psi_{\odot}) \cos \vartheta_{\odot} + \int_0^{2\pi} d\psi' \int_0^{\pi/2} J_{\lambda}^{\downarrow}(0, \vartheta', \psi') r_{\lambda}(\vartheta, \psi, \vartheta', \psi') \cos \vartheta' \sin \vartheta' d\vartheta', \quad (4)$$

где r_{λ} – спектральный коэффициент яркости (или коэффициент направленного отражения) подстилающей поверхности. В большинстве случаев можно считать отражение изотропным. Тогда $r_{\lambda} = A_{\lambda}/\pi$ и выражение (4) значительно упрощается:

$$J_{\lambda}^{\uparrow}(0, \vartheta, \psi) = \frac{A_{\lambda}}{\pi} [S_{\lambda}(0, \vartheta_{\odot}, \psi_{\odot}) \cos \vartheta_{\odot} + D_{\lambda}^{\downarrow}(0)]. \quad (5)$$

Здесь

$$D_{\lambda}^{\downarrow}(0) = \int_0^{2\pi} d\psi' \int_0^{\pi/2} J_{\lambda}^{\downarrow}(0, \vartheta', \psi') \cos \vartheta' \sin \vartheta' d\vartheta'$$

– нисходящий спектральный поток рассеянной радиации на уровне земной поверхности.

Интегрирование этих уравнений для самого общего случая представляет чрезвычайно сложную задачу. Более того, в тех случаях, когда существенную роль играет как поглощение, так и многократное рассеяние, возникают принципиальные трудности. Уравнения переноса справедливы для строго монохроматической радиации, т.е. для спектральных интервалов, значительно меньших, чем ширина спектральной линии. Для того чтобы получить интегральные потоки рассеянной радиации, необходимо проинтегрировать и по всем телесным углам и длинам волн. Из-за сложных зависимостей характеристик рассеяния от угла рассеяния и от длины волны, интегрирование можно выполнить только численно.

Расчет спектрального альбеда состоит в решении задачи переноса коротковолнового излучения в атмосфере с учетом атмосферной коррекции. В блоке входных данных задаются солнечные параметры $S_{\lambda 0}, \vartheta_0$ – интен-

сивность монохроматического солнечного излучения по длине волны λ на верхней границе земной атмосферы и угол распространения солнечных лучей, а также J_{λ}^{\uparrow} – интенсивность излучения, измеряемая на спутнике, и τ_{λ} – оптическая толщина атмосферы. Последний параметр может вычисляться по коэффициенту прозрачности, который определяется по (5).

Спектральное альbedo участка земной поверхности определяется из следующего выражения:

$$A_{\lambda} = \frac{\pi \left(J_{\lambda}^{\uparrow} - \frac{S_{\lambda 0} \overline{\chi_{\lambda cp}} \sec \vartheta}{\sec \vartheta + \sec \vartheta_{\theta}} \left[e^{-\tau_{\lambda} \sec \vartheta_{\theta}} - e^{-\tau_{\lambda} \sec \vartheta} \right] \right)}{\left[S_{\lambda 0} \cos \vartheta_{\theta} e^{-\tau_{\lambda} \sec \vartheta_{\theta}} + D_{\lambda}^{\downarrow}(0) \right] e^{-\tau_{\lambda} \sec \vartheta}}. \quad (6)$$

Космическое изображение части Северо-Казахстанской области со спутника TERRA/MODIS представлено на рис. 1. В табл. приведены данные статистического анализа расчетных значений альbedo по 2 каналу. Удовлетворительное соответствие расчетных по космическим данным и измеренных значений спектрального альbedo с применением мультиспектральной системы CROPSCAN на полях хозяйства Зеленый Гай Северо-Казахстанской области по 1 и 2 каналам спутника TERRA/ MODIS показано на рис. 2.

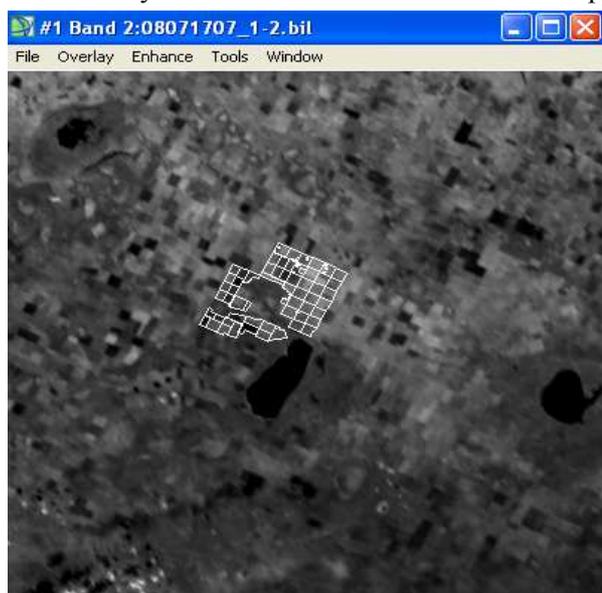


Рис. 1. Космическое изображение зерновых полей Северо-Казахстанской области от 17 июля 2008 г., соответствующее 2 каналу спектро радиометра MODIS. Выделены зерновые поля хозяйства Зеленый Гай.

Мультиспектральные системы CROPSCAN предназначены для измерения отражательных характеристик в видимом и инфракрасном диапазоне спектра на длинах волн, в нашем случае 460, 520, 550, 590, 620, 640, 660, 680, 740, 770, 840, 850, 880, 940, 1240 и 1640 нм. Маршрут съемки прокладывался через характерные участки полей, для каждой точки измерения проводились в многократной повторности. В результате полевых работ был получен ряд спектральных характеристик, которые отражают как состояние поверхности фиксированной датой, так и ее динамику в течение вегетационного периода.

Таблица

Статистический анализ расчетных значений альbedo по 2 каналу

Номер поля, количество пикселей	Min	Max	Средние значения	Среднеквадратические отклонения
48, 40	0,32000	0,36000	0,343500	0,009487
24, 38	0,32000	0,43000	0,409211	0,023410
23, 41	0,28000	0,40000	0,339268	0,033045
12, 24	0,32000	0,39000	0,370000	0,016940
1, 45	0,24000	0,43000	0,349556	0,061050
4, 34	0,26000	0,36000	0,332647	0,019433

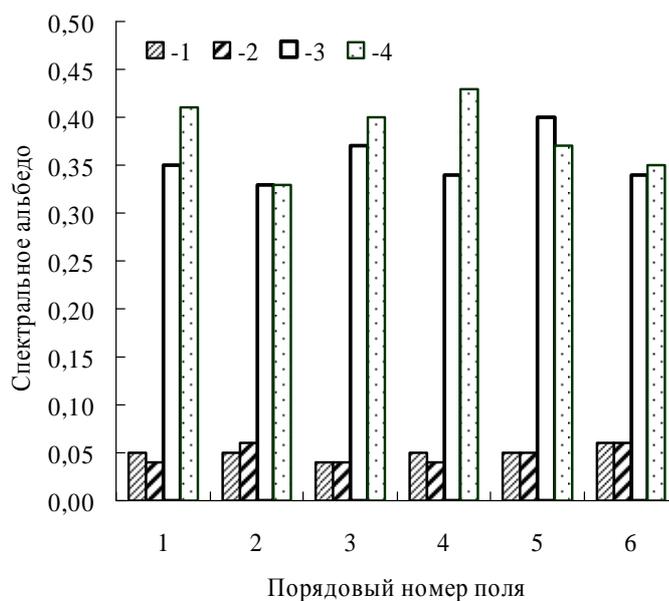


Рис. 2. Сравнение расчетных по космическим данным и измеренных значений спектрального альbedo на полях хозяйства Зеленый Гай Северо-Казахстанской области. 1 – космос 1 канал, 2 – наземка 1 канал, 3 – космос 2 канал, 4 – наземка 2 канал.

Применение численных методов обработки космических изображений, с определением значений спектрального альбедо, позволит оценивать состояния зерновых полей и прогнозировать их урожайность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брыксин В.М. Технология прогнозирования урожайности зерновых культур на основе данных космического мониторинга и моделирования биопродуктивности / В.М. Брыксин, А.В. Евтюшкин // Обратные задачи и информационные технологии рационального природопользования: Материалы IV научно-практической конференции. – Ханты-Мансийск: Полиграфист, 2008. – С. 181–186.
2. Муратова Н.Р., Колдасова С.С. Изучение динамики отражательных свойств яровой пшеницы в вегетационный период по данным MODIS. // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. – 2005. – №8. – С. 30 – 32.
3. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики – СПб.: Наука, 2003. – 474 с.
4. WAN Z. MODIS LST ATBD // Institute Computational Earth System Science, USA, Santa Barbara, 1999, 77 pp.

АО «Национальный центр космических исследований и технологий» НКА РК

СПУТНИКТІК МӘЛІМЕТТЕР БОЙЫНША АСТЫҚ АЛҚАПТАРЫНЫҢ СПЕКТРАЛЬДІК АЛЬБЕДО ЕСЕПТЕУ АЛГОРИТМІ

Техн. ғылым. канд. Н.Р. Муратова

Астық алқаптарының спутниктік өлшемдерімен қысқатолқынды сәулеленудің тасымалдануын есепті кері шешу негізінде спектральді альбедо есептеу алгоритмі табылды. Есептелінген және өлшенген спектральді альбедо мәліметтерінің қанағаттанарлық сәйкестілігі көрсетілген.