

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 528.85:535.51, 535.361

Учет поляризации при пассивном зондировании из космоса отражательных свойств земной поверхности

А.В. Зимовая¹, М.В. Тарасенков^{1,2}, В.В. Белов^{1,2*}

¹ *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

² *Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

Поступила в редакцию 6.10.2015 г.

Рассматривается вопрос об учете поляризации при статистическом моделировании процесса формирования спутниковых изображений земной поверхности в оптическом диапазоне длин волн. Показано, что пренебрежение поляризационными свойствами излучения может приводить к существенным погрешностям при восстановлении коэффициентов отражения слабоотражающих поверхностей.

Ключевые слова: перенос оптического излучения в атмосфере, спутниковое пассивное зондирование земной поверхности, вектор-параметр Стокса, метод Монте-Карло; optical radiation transfer in the atmosphere, passive satellite sensing of the Earth surface, Stokes vector-parameter, Monte-Carlo method.

Введение

В настоящее время одним из эффективных способов наблюдения за состоянием земной поверхности является спутниковый мониторинг в оптическом диапазоне длин волн. Данные о коэффициентах отражения земной поверхности имеют широкое применение в ряде фундаментальных и прикладных задач (например, [1–3]). Атмосфера – мутная среда, поэтому принимаемый оптической системой сигнал (в рассматриваемом случае – изображение) содержит не только полезное (от поверхности), но и фоновое (от атмосферы) излучение. Для корректного восстановления коэффициентов отражения земной поверхности из изображений, сформированных восходящими световыми потоками и свободных от фона, следует осуществить их атмосферную коррекцию. Один из способов коррекции состоит в решении уравнения переноса излучения и в устранении из измеренных величин атмосферных помех.

Алгоритмы атмосферной коррекции развиваются на протяжении многих лет [4–10]. В ИОА СО РАН они строятся в рамках RTM-подхода и теории линейных систем [6, 7, 11–13]. Одним из способов расчета величин, формирующих спутниковое изображение земной поверхности, является метод Монте-Карло [14]. Главное преимущество

этого метода состоит в том, что он позволяет выполнять расчеты с учетом многократного рассеяния, с контролируемой точностью и без ограничений на оптико-геометрические характеристики и параметры конкретной задачи.

Как правило, при коррекции спутниковых изображений пренебрегают таким свойством излучения, как поляризация. Неучет влияния поляризации может вносить некоторую погрешность в расчеты компонент излучения и, следовательно, влиять на результаты интерпретации данных спутникового зондирования. В настоящей статье рассмотрены результаты наших исследований, направленных на выяснение условий, при которых учет поляризации при анализе спутниковых изображений с целью восстановления коэффициентов отражения земной поверхности необходим.

Постановка задачи и алгоритм решения

Задача рассматривалась в следующей постановке (рис. 1). На некотором расстоянии от поверхности Земли H_{priem} находится спутниковая сканирующая оптико-электронная система, которая формирует изображение точки земной поверхности в направлении ω_d . Предположим, что атмосфера представляет собой набор однородных по высоте слоев, ограниченных сферическими поверхностями. Оптические характеристики атмосферы задаются генератором оптических моделей на основе

* Анна Викторовна Зимовая (avk@iao.ru); Михаил Викторович Тарасенков (tmv@iao.ru); Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru).

LOWTRAN-7 [15]. На Землю в направлении ω_{sun} падает параллельный поток солнечного излучения. Поверхность Земли будем считать однородной и отражающей излучение по закону Ламберта. Требуется оценить степень влияния поляризации на результат восстановления коэффициента отражения земной поверхности.

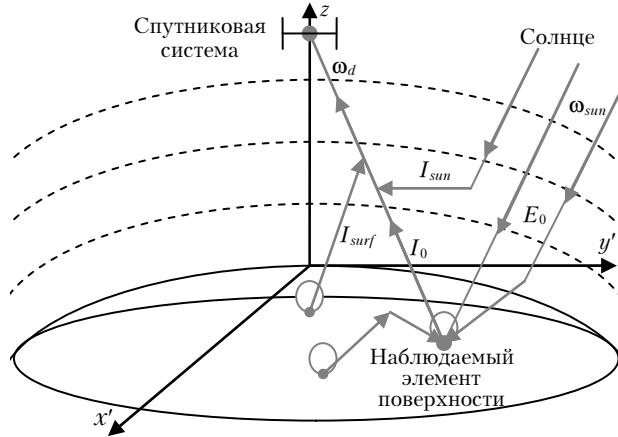


Рис. 1. Геометрическая схема постановки задачи

Однородное приближение для земной поверхности применимо в случаях, когда область на земной поверхности, откуда в оптическую систему приходит основная часть излучения (радиус бокового подсвета [16]), мала. В этом случае коэффициент отражения определяется как [13]:

$$r_{surf(i)} = \frac{Q_i}{E_0 + \gamma Q_i}, \quad (1)$$

где

$$Q_i = \frac{I_{sum(i)} - I_{sun(i)}}{I_{surf(i)} + \frac{\exp(-\tau_i)}{\pi}}. \quad (2)$$

Здесь I_{sum} — суммарная интенсивность излучения, зарегистрированная приемником при наблюдении i -го пикселя; I_{sun} — интенсивность рассеянного излучения Солнца, не взаимодействовавшего с земной поверхностью (солнечная дымка [17]); I_{surf} — интенсивность рассеянного излучения от земной поверхности при единичной светимости земной поверхности (поверхностная дымка [18]); τ — оптическая толщина от наблюдаемой точки на земной поверхности до приемной системы; γ — вклад однократно отраженного от земной поверхности излучения в суммарную ее освещенность; E_0 — освещенность Земли Солнцем.

Световой луч характеризуется вектор-параметром Стокса $\mathbf{I} = (I, Q, U, V)$ [14]. При каждом рассеянии значения элементов вектор-параметра Стокса преобразуются как

$$(I, Q, U, V) = P(\omega', \omega, \mathbf{r}) \cdot (I, Q, U, V), \quad (3)$$

где $P(\omega', \omega, \mathbf{r})$ — фазовая матрица рассеяния, которая рассчитывается по формуле

$$P(\omega', \omega, \mathbf{r}) = L(\pi - i_2)R(\mathbf{r}, \mu)L(-i_1). \quad (4)$$

Здесь

$$R(\mathbf{r}, \mu) = \frac{\sigma_{s,a}(\mathbf{r})}{\sigma_{t,a}(\mathbf{r}) + \sigma_{t,m}(\mathbf{r})} \cdot \frac{3}{4} \begin{pmatrix} \frac{(1-\mu)^2}{2} & -\frac{(1-\mu)^2}{2} & 0 & 0 \\ \frac{(1-\mu)^2}{2} & \frac{(1-\mu)^2}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu \end{pmatrix} + \frac{\sigma_{s,m}(\mathbf{r})}{\sigma_{t,a}(\mathbf{r}) + \sigma_{t,m}(\mathbf{r})} \cdot \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & 0 & 0 \\ r_{12} & r_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{33} & r_{34} \\ 0 & 0 & -r_{34} & r_{44} \end{pmatrix}; \quad (5)$$

L — матрица поворота; R — суммарная матрица рассеяния; μ — косинус угла рассеяния; $r_{11}, r_{12}, r_{33}, r_{44}$ — элементы матрицы аэрозольного рассеяния в предположении об однородности и сферичности аэрозольных частиц [19]; i_1 и i_2 — углы между плоскостью рассеяния и плоскостями, проходящими через системы координат и векторы соответственно; $\sigma_{t,a}, \sigma_{t,m}, \sigma_{s,a}, \sigma_{s,m}$ — коэффициенты аэрозольного и молекулярного ослабления, аэрозольного и молекулярного рассеяния соответственно.

Для расчета $E_0, \gamma, I_{sun}, I_{surf}$ использовались программы на основе метода Монте-Карло с учетом поляризации излучения. В части программ (для E_0 и I_{sun}) моделирование траекторий фотонов производилось по сопряженной схеме. В отличие от ядра скалярного интегрального уравнения переноса излучения (УПИ) ядро векторного интегрального УПИ для вектор-параметров Стокса не является самосопряженным, что вызывает дополнительные сложности. Путь к решению их описан, например, в [14, с. 96]. Для моделирования переноса излучения с учетом поляризации по сопряженной схеме с использованием локальных оценок в каждой точке столкновения необходимо хранить в памяти произведение матриц рассеяния на предыдущих столкновениях. То есть на каждом новом столкновении формировать матрицу

$$M_i = M_{i-1} \cdot P(\omega', \omega, \mathbf{r}). \quad (6)$$

Тогда в локальных оценках принимаемое излучение определяется как произведение полученной матрицы и исходных значений вектор-параметра Стокса. На рис. 2 показана блок-схема алгоритма с учетом поляризации на примере программы для моделирования солнечной дымки.

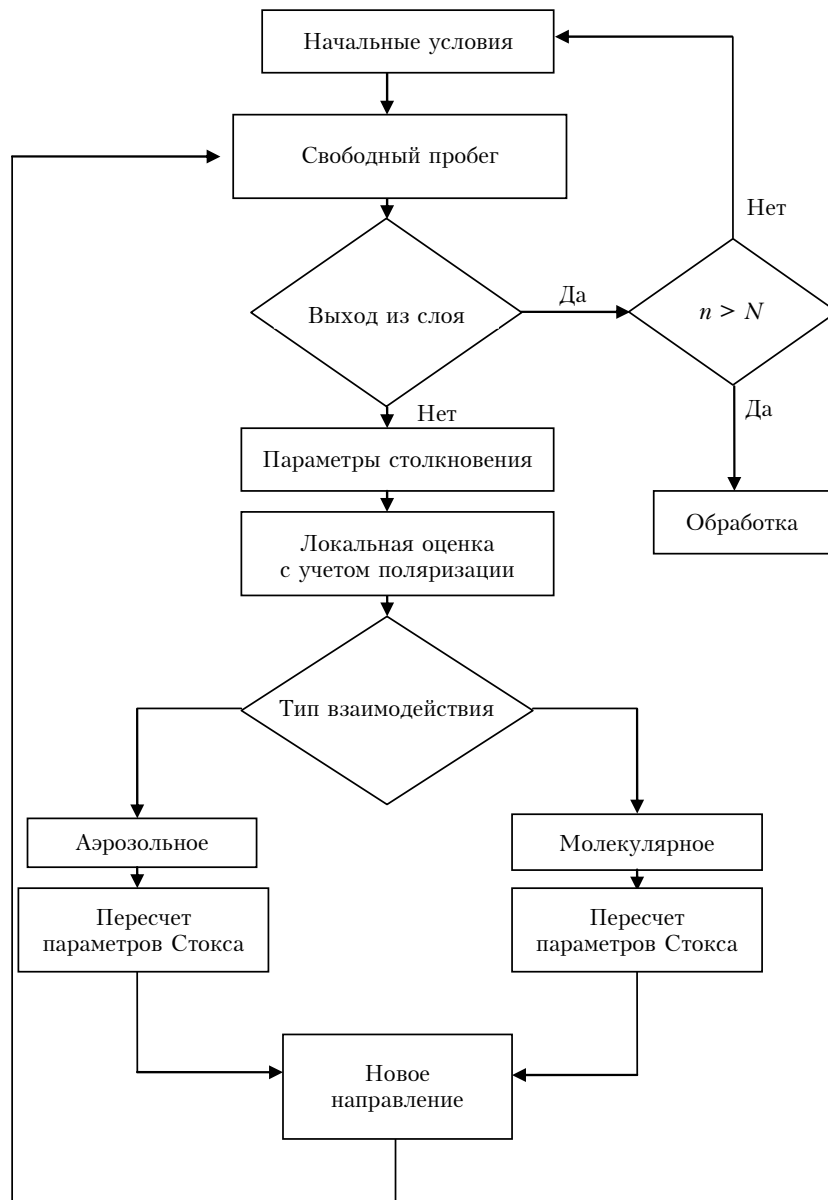


Рис. 2. Блок-схема программы с учетом поляризации

Результаты численных экспериментов

Для оценки влияния учета поляризации на точность восстановления коэффициентов отражения земной поверхности был рассмотрен следующий пример. В приземном слое атмосферы (до 5 км) в качестве матрицы аэрозольного рассеяния применялась модель дымки H [20]. Для слоев выше 5 км использовались аэрозольные индикатрисы рассеяния из [15] и поляризация не учитывалась. Расчеты проводились при следующих условиях: длина волны $\lambda = 0,45$ мкм, метеорологическая дальность видимости $S_M = 10$ км, зенитные углы Солнца $\theta_{sun} = 0, 30, 45, 60, 70, 80^\circ$, зенитный угол оптической оси приемника $\theta_d = 30^\circ$, азимут $\varphi =$

$= 180^\circ$, высота приемника $H_{priem} = 100$ км. Коэффициенты отражения земной поверхности $r_{surf} = 0,01; 0,5; 1$. Для всех указанных оптико-геометрических условий был выполнен расчет суммарной интенсивности принимаемого излучения с учетом поляризации излучения, определяемой в рамках сделанных допущений по формуле

$$I_{sum} = I_{sun} + \frac{r_{surf} E_0}{1 - r_{surf} \gamma} \left(\frac{\exp(-\tau)}{\pi} + I_{surf} \right). \quad (7)$$

С использованием этой суммарной интенсивности и результатов расчетов с помощью программ без учета поляризации излучения были получены величины, входящие в формулы (1), (2), и восстановлены

коэффициенты отражения земной поверхности без учета поляризации. Результаты представлены в виде разности восстановленных без учета поляризации коэффициентов отражения \tilde{r}_{surf} и заданных r_{surf} для шести зенитных углов Солнца (рис. 3).

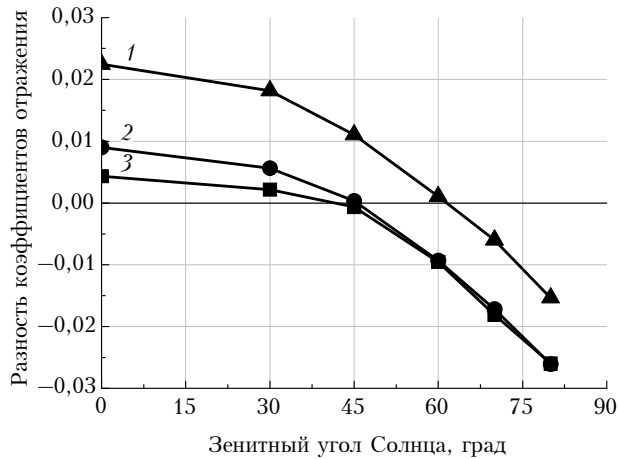


Рис. 3. Зависимости разности коэффициентов отражения от зенитного угла Солнца и истинного значения коэффициента отражения r_{surf} . 1 – $r_{surf} = 1$; 2 – 0,5; 3 – 0,01

Видно, что при малых зенитных углах Солнца значение коэффициента отражения при неучете поляризации завышается, при больших – занижается по сравнению с заданным. Анализ показывает, что основными причинами завышения коэффициента отражения при неучете поляризации являются заниженные значения интенсивности солнечной дымки I_{sun} и вклада отраженного излучения γ . Занижается коэффициент отражения при неучете поляризации из-за завышенных значений I_{sun} и освещенности Земли Солнцем E_0 . Из рис. 3 также следует, что при заданном значении $r_{surf} = 1$ рассчитанный без учета поляризации коэффициент отражения меняется от 1,022 до 0,985, при $r_{surf} = 0,5$ – от 0,509 до 0,474, а при $r_{surf} = 0,01$ – от 0,014 до –0,016. Из этого следует, что при низких значениях коэффициентов отражения могут быть ситуации, когда учет поляризации необходим при восстановлении коэффициентов отражения.

Заключение

Проведенный расчет показал, что неучет поляризации излучения при восстановлении коэффициентов отражения слабоотражающих поверхностей (например, растительность или водная поверхность в коротковолновой части видимого диапазона) способен привести к значительным погрешностям и даже к отрицательным значениям коэффициента отражения. Таким образом, существуют ситуации, когда эффективная атмосферная коррекция невозможна без учета поляризации оптического излучения.

Авторы выражают благодарность В.В. Веретенникову за ценные замечания по теме статьи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Соглашение № 14.604.21.0100 – уникальный идентификатор RFMTFI60414X0100).

1. Толтин В.А., Луян Е.А., Барталев С.А., Плотников Д.Е., Матвеев А.М. Возможности анализа состояния сельскохозяйственной растительности с использованием спутникового сервиса «ВЕГА» // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 7. С. 581–586.
2. Полищук Ю.М., Токарева О.С. Использование космических снимков для экологической оценки воздействия факельного сжигания попутного газа на нефтяных месторождениях Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 7. С. 647–651.
3. Катаев М.Ю., Бекеров А.А. Обнаружение экологических изменений природной среды по данным спутниковых измерений // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 7. С. 652–656.
4. Reinersman P.N., Carder K.L. Monte Carlo simulation of the atmospheric point-spread function with an application to correction for the adjacency effect // Appl. Opt. 1995. V. 34, N 21. P. 4453–4471.
5. Vermote E.F., Vermeulen A. Atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (MOD09). Algorithm Theoretical Background document, version 4.0. 1999. URL: http://modis.gsfc.nasa.gov/atbd/atbd_nod08.pdf
6. Белов В.В., Афонин С.В. От физических основ, теории и моделирования к тематической обработке спутниковых изображений. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2005. 266 с.
7. Афонин С.В., Белов В.В., Соломатов Д.В. Решение задач температурного мониторинга земной поверхности из космоса на основе RTM-метода // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21, № 12. С. 1056–1063.
8. Mekler Y., Kaufman Y.J. Contrast reduction by the atmosphere and retrieval of nonuniform surface reflectance // Appl. Opt. 1982. V. 21, N 2. P. 310–316.
9. Breon F.M., Vermote E. Correction of MODIS surface reflectance time series for BRDF effects // Remote Sens. Environ. 2012. V. 125. P. 1–9.
10. Lyapustin A., Martonchik J., Wang Y., Laszlo I., Korkin S. Multiangle implementation of atmospheric correction (MAIAC): 3. Atmospheric correction // Remote Sens. Environ. 2012. V. 127. P. 385–393.
11. Зуев В.Е., Белов В.В., Веретенников В.В. Теория систем в оптике дисперсных сред. Томск: Изд-во «Спектр» ИОА СО РАН, 1997. 402 с.
12. Белов В.В., Тарасенков М.В. Статистическое моделирование функции размытия точки в сферической атмосфере и критерий выделения зон изопланарности изображений // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 5. С. 371–377.
13. Кожевникова А.В., Тарасенков М.В., Белов В.В. Параллельные вычисления при решении задач восстановления коэффициента отражения земной поверхности по спутниковым данным // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 2. С. 172–174.
14. Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А., Дарбинян Р.А., Каргин Б.А., Еленов Б.С. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1976. 284 с.

15. *Kneizys F.X., Shettle E.P., Anderson G.P., Abreu L.W., Chetwynd J.H., Selby J.E.A., Clough S.A., Gallery W.O.* User Guide to LOWTRAN-7. ARGL-TR-86-0177. ERP 1010. Hanscom AFB. 1988. MA 01731. 137 p.
16. *Белов В.В., Борисов Б.Д., Макушкина И.Ю.* Некоторые закономерности формирования помехи бокового подсвета в системах видения // Оптика атмосфер. и океана. 1988. Т. 1, № 2. С. 18–24.
17. *Белов В.В., Тарасенков М.В., Пискунов К.П.* Параметрическая модель солнечной дымки в видимой и УФ-области спектра // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 4. С. 294–297.
18. *Белов В.В., Тарасенков М.В.* Статистическое моделирование интенсивности световых потоков, отраженных сферической земной поверхностью // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 1. С. 14–20.
19. *ван де Хюлст Г.* Рассеяние света малыми частицами. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. 537 с.
20. *Дейрменджан Д.* Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 165 с.

A.V. Zimovaya, M.V. Tarasenkov, V.V. Belov. **Allowance for a polarization in passive sensing of the reflective properties of the Earth surface from space.**

Problem of allowance for a polarization in statistical simulation of satellite imaging of the Earth surface in the optical wavelength range is considered. It is demonstrated that neglecting the polarizing properties of radiation can lead to significant errors in the reconstructed reflection coefficient of weakly reflecting surfaces.