

Влияние поляризации излучения на восстановление коэффициента отражения земной поверхности по спутниковым данным в видимом диапазоне длин волн

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

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

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

Поступила в редакцию 26.05.2017 г.

Рассматривается вопрос об учете влияния поляризации при атмосферной коррекции спутниковых изображений земной поверхности в видимом диапазоне длин волн. Разработан комплекс программ для расчета компонент излучения, формирующих спутниковые изображения, с учетом и без учета поляризации в приближении однородной поверхности. Получены условия, при которых пренебрежение поляризационными свойствами излучения может приводить к существенным погрешностям при восстановлении коэффициентов отражения слабоотражающих поверхностей.

Ключевые слова: перенос оптического излучения в атмосфере, атмосферная коррекция спутниковых изображений, поляризация света, метод Монте-Карло; optical radiation transfer in the atmosphere, atmospheric correction of satellite images, light polarization, Monte Carlo method.

Введение

Данные о коэффициентах отражения земной поверхности в видимом диапазоне длин волн широко применяются в ряде фундаментальных и прикладных задач [1–3]. Для корректного восстановления коэффициентов отражения земной поверхности по спутниковым данным необходимо выполнять их качественную атмосферную коррекцию. Один из способов коррекции заключается в решении уравнения переноса излучения для оценки атмосферных искажений и в их устранении из суммарного принимаемого сигнала.

Алгоритмы атмосферной коррекции развиваются достаточно давно [4–13]. Для экономии времени расчетов при коррекции спутниковых изображений пренебрегают таким свойством излучения, как поляризация, поскольку, согласно многочисленным исследованиям [14–19], влияние поляризации достаточно мало и составляет не более 9,5% от суммарной интенсивности принимаемого излучения [20, с. 128, 133]. Однако неучет влияния поляризации может вносить некоторую погрешность в расчеты компонент излучения и, следовательно, в результаты атмосферной коррекции. Как показали наши оценки для случая наблюдения в надир [21], неучет поляризации при восстановлении коэффициентов отражения слабоотражающих поверхностей способен привести к зна-

чительным погрешностям и даже к отрицательным значениям коэффициента отражения на длинах волн $\lambda = 0,40\text{--}0,55$ мкм. Для больших длин волн при направлениях наблюдения вблизи надира влияние поляризации не столь существенно.

В настоящей работе анализируются влияние поляризации для направлений, отличных от надира, и причины поведения погрешности, обусловленной неучетом поляризации.

Постановка задачи, алгоритм решения и тестирование алгоритма

Задача рассматривалась в следующей постановке (рис. 1). На некотором расстоянии от поверхности Земли H_d располагается пассивная спутниковая система, которая осуществляет наблюдение точки на 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 LOWTRAN-7 [22]. 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.

Приближение однородной поверхности рассматривается для упрощения анализа и поиска общих

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

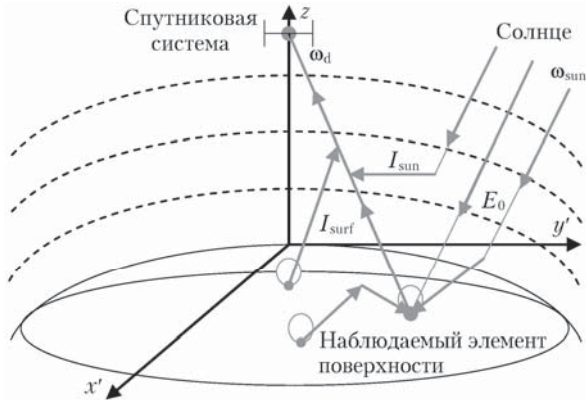


Рис. 1. Геометрическая схема постановки задачи

закономерностей. В общем случае однородное приближение для земной поверхности применимо, когда область на поверхности, откуда в оптическую систему приходит основная часть излучения (радиус бокового подсвета [23]), мала. В рамках рассматриваемой постановки задачи коэффициент отражения определяется как [13]:

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

где

$$Q_i = (I_{\text{sum}(i)} - I_{\text{sun}(i)}) / (I_{\text{surf}(i)} + T_i), \quad (2)$$

$T_i = \exp(-\tau_i) / \pi$, τ_i – оптическая толщина от наблюдаемой точки на земной поверхности до приемной системы; $I_{\text{sum}(i)}$ – суммарная интенсивность излучения, зарегистрированная приемником при наблюдении i -го пикселя, $I_{\text{sun}(i)}$ – интенсивность рассеянного излучения Солнца, не взаимодействовавшего с земной поверхностью, $I_{\text{surf}(i)}$ – интенсивность рассеянного излучения от земной поверхности при единичной светимости земной поверхности; γ – вклад однократно отраженного от земной поверхности излучения в ее суммарную освещенность; E_0 – освещенность Земли Солнцем без учета излучения, отраженного земной поверхностью.

Световой луч характеризуется вектор-параметром Стокса $\mathbf{I} = (I, Q, U, V)$ [24]. При каждом акте рассеяния значения элементов вектор-параметра Стокса преобразуются как

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

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

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

в которой

$$R(\mathbf{r}, \mu) = \frac{\sigma_{s,a}(\mathbf{r})}{\sigma_{t,a}(\mathbf{r}) + \sigma_{t,m}(\mathbf{r})} \times \left(\begin{array}{cccc} \frac{(1+\mu^2)}{2} & -\frac{(1-\mu^2)}{2} & 0 & 0 \\ -\frac{(1-\mu^2)}{2} & \frac{(1+\mu^2)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu \end{array} \right) +$$

$$+ \frac{\sigma_{s,m}(\mathbf{r})}{\sigma_{t,a}(\mathbf{r}) + \sigma_{t,m}(\mathbf{r})} \cdot \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & 0 & 0 \\ r_{12} & r_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{33} & r_{34} \\ 0 & 0 & -r_{34} & r_{44} \end{pmatrix} \quad (5)$$

– суммарная матрица рассеяния, \mathbf{r} – радиус-вектор точки 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 [25]; L – матрица поворота; i_1 и i_2 – углы между плоскостью рассеяния и плоскостями, проходящими через системы координат и векторы соответственно.

Для расчета величин $E_0, \gamma, I_{\text{sun}}, I_{\text{surf}}$ 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 вносит свою специфику по сравнению со скалярным случаем. Путь их решения описан, например, в [20, 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.

Для тестирования разработанных программ выполнялись расчеты суммарной интенсивности принимаемого излучения для условий, описанных в [26]. Расчеты производились программами без учета поляризации из [13] и с учетом поляризации, разработанными в рамках данной работы, для следующих условий: молекулярная непоглощающая атмосфера, оптическая толщина атмосферного слоя $\tau = 1$; косинус зенитного угла Солнца $\mu_{\text{sun}} = 0,6$; солнечная постоянная $\pi S_\lambda = \pi \text{ Вт/м}^2$; коэффициент отражения земли $r_{\text{surf}} = 0,8$; приемник расположен на верхней границе атмосферы, косинус зенитного угла приемника $\mu_d = 0,02-1,0$; азимут между направлением на Солнце и на приемник $\varphi = 0; 90; 180^\circ$. Требовалось найти суммарную интенсивность принимаемого излучения.

Результаты тестовых расчетов приведены на рис. 2, из которого видно, что значения, полученные в [26, с. 337], отличаются от значений, полученных нами с учетом поляризации, не более чем на 1,6%, без учета поляризации – не более чем на 8,9%.

Таким образом, полученные результаты полностью согласуются с [26]. Следовательно, разработанные нами алгоритмы для расчета компонент излучения с учетом и без учета поляризации, формирующих принимаемый спутниковой системой сигнал, работают верно.

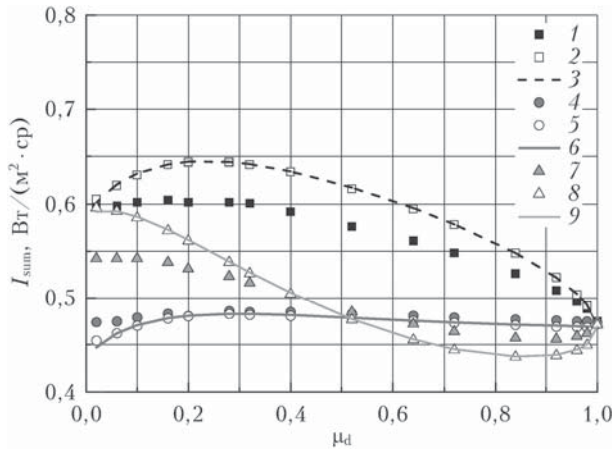


Рис. 2. Зависимость суммарной интенсивности излучения I_{sum} от косинуса угла приемника μ_d : 1 – без учета поляризации для $\varphi = 0^\circ$; 2 – с учетом поляризации для $\varphi = 0^\circ$; 3 – результаты из [26] для $\varphi = 0^\circ$; 4 – без учета поляризации для $\varphi = 90^\circ$; 5 – с учетом поляризации для $\varphi = 90^\circ$; 6 – результаты из [26] для $\varphi = 90^\circ$; 7 – без учета поляризации для $\varphi = 180^\circ$; 8 – с учетом поляризации для $\varphi = 180^\circ$; 9 – результаты из [26] для $\varphi = 180^\circ$

Результаты численных расчетов

Оценка влияния учета поляризации излучения на точность восстановления коэффициентов отражения земной поверхности выполняется при следующих оптико-геометрических условиях. В приземном слое атмосферы (до 5 км) в качестве матрицы аэрозольного рассеяния используется модель дымки H [27]. Для слоев выше 5 км используются аэрозольные индикатрисы рассеяния из [22] и поляризация не учитывается. Длина волны $\lambda = 0,40; 0,45; 0,55$ и $0,85$ мкм; метеорологическая дальность видимости $S_M = 10$ и 50 км; зенитный угол Солнца $\theta_{\text{sun}} = 0; 15; 30; 45; 55; 60; 70; 80^\circ$; зенитный угол оптической оси приемника $\theta_d = 0; 30; 45; 55; 60^\circ$; азимут $\varphi = 0; 90; 180^\circ$; высота приемника $H_d = 100$ км. Коэффициент отражения земной поверхности $r_{\text{surf}} = 0,1$. Это значение было выбрано как пример слабоотражающей поверхности.

Оценка выполнялась в два этапа. На первом этапе рассчитывалась суммарная принимаемая интенсивность с учетом поляризации излучения по формуле

$$I_{\text{sum}} = I_{\text{sun}} + \frac{r_{\text{surf}} E_0}{1 - r_{\text{surf}} \gamma} (T + I_{\text{surf}}). \quad (7)$$

Здесь величины I_{sun} , E_0 , I_{surf} и γ определялись методом Монте-Карло с учетом поляризации излучения.

На втором этапе определялись приближенное значение коэффициента отражения \tilde{r}_{surf} без учета поляризации по формуле (1), а затем разность приближенного \tilde{r}_{surf} и точного r_{surf} значений коэффициента отражения

$$\Delta r_{\text{surf}} = \tilde{r}_{\text{surf}} - r_{\text{surf}}. \quad (8)$$

Для примера на рис. 3 приведены результаты расчетов для длин волн $\lambda = 0,40$ и $0,55$ мкм и $S_M = 50$ км.

Диапазон значений Δr_{surf} для рассматриваемых оптико-геометрических условий указан в табл. 1.

Из данных рис. 2 и табл. 1 видно, что для условий низкой мутности атмосферы влияние поляризации намного слабее, чем при высокой. Из ранее полученных результатов [21] следовало, что влияние поляризации для направлений вблизи надира незначительно при $\lambda \geq 0,65$ мкм. Однако для направлений наблюдения, значительно отличающихся от надира (например, $\theta_d = 60^\circ$), как показывают полученные результаты, при высокой мутности среды поляризацию следует учитывать во всем рассмотренном диапазоне длин волн, а при низкой мутности – вплоть до $\lambda = 0,55$ мкм.

Полученные результаты показывают сложное поведение Δr_{surf} в зависимости от положений Солнца и приемной системы (рис. 3). Для объяснения такого поведения введем величины

$$\begin{aligned} \Delta E_0 &= \tilde{E}_0 - E_0, & \Delta I_{\text{sun}} &= \tilde{I}_{\text{sun}} - I_{\text{sun}}, \\ \Delta I_{\text{surf}} &= \tilde{I}_{\text{surf}} - I_{\text{surf}}, & \Delta \gamma &= \tilde{\gamma} - \gamma \end{aligned} \quad (9)$$

(E_0 , I_{sun} , I_{surf} , γ получены с учетом поляризации, а \tilde{E}_0 , \tilde{I}_{sun} , \tilde{I}_{surf} , $\tilde{\gamma}$ – без учета). Погрешности рассматриваемых величин не превышали 1%.

Из (1), (2) находим

$$\begin{aligned} r_{\text{surf}} &= \frac{1}{\frac{E_0}{I_{\text{sum}} - I_{\text{sun}}} + \gamma_1}, \\ \tilde{r}_{\text{surf}} &= \frac{1}{\frac{E_0 + \Delta E_0}{I_{\text{sum}} - I_{\text{sun}} - \Delta I_{\text{sun}}} + \gamma + \Delta \gamma}. \end{aligned} \quad (10)$$

Тогда

$$\begin{aligned} \Delta r_{\text{surf}} &= \tilde{r}_{\text{surf}} - r_{\text{surf}} = \\ &= \frac{1}{\frac{E_0(T + I_{\text{surf}})(1 + C_1)(1 + C_2)}{(I_{\text{sum}} - I_{\text{sun}})(1 - C_3)} + \gamma \left(1 + \frac{\Delta \gamma}{\gamma}\right)} - r_{\text{surf}}, \end{aligned} \quad (11)$$

где

$$C_1 = \frac{\Delta E_0}{E_0}, \quad C_2 = \frac{\Delta I_{\text{surf}}}{T + I_{\text{surf}}}, \quad C_3 = \frac{\Delta I_{\text{sun}}}{I_{\text{sum}} - I_{\text{sun}}}. \quad (12)$$

Для слабоотражающих поверхностей влияние величины γ мало. Кроме того, она не зависит от положения Солнца и приемной системы, поэтому в рамках анализа поведения Δr_{surf} можно приближенно считать, что $\gamma \approx 0$. Тогда (11) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} \Delta r_{\text{surf}} &= \tilde{r}_{\text{surf}} - r_{\text{surf}} \approx \\ &\approx r_{\text{surf}}(1 - C_3) \left(\frac{1}{1 + C_1} \right) \left(\frac{1}{1 + C_2} \right) - r_{\text{surf}}. \end{aligned} \quad (13)$$

Из (13) видно, что поведение Δr_{surf} зависит от множителей $1/(1 + C_1)$, $1/(1 + C_2)$ и $(1 - C_3)$. Чем дальше

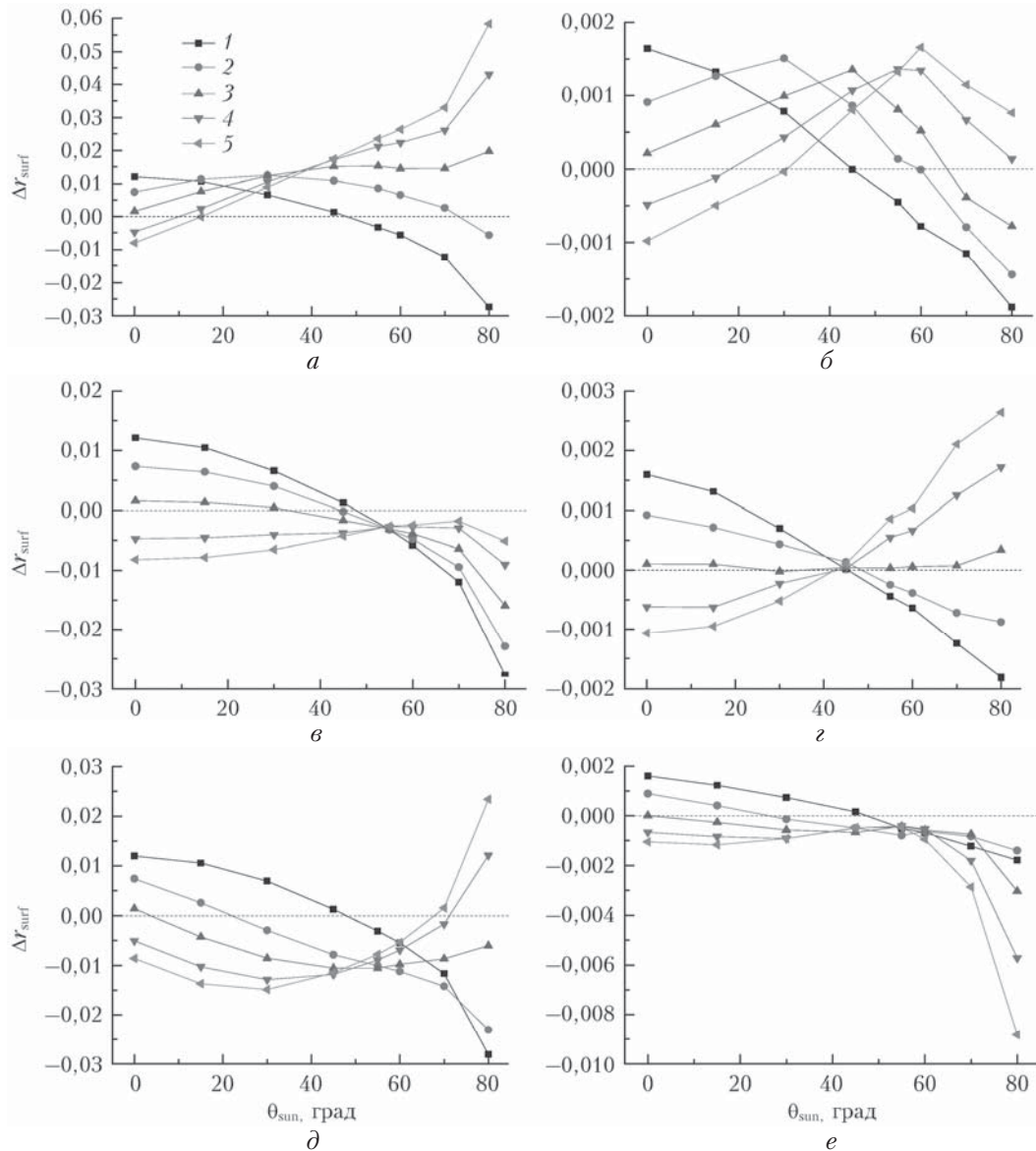


Рис. 3. Зависимости Δr_{surf} от θ_{sun} для фиксированных значений $\theta_d = 0$ (1), 30 (2), 45 (3), 55 (4), 60° (5): а – $\lambda = 0,40$ мкм, $\varphi = 0^\circ$; б – $\lambda = 0,55$ мкм, $\varphi = 0^\circ$; в – $\lambda = 0,40$ мкм, $\varphi = 90^\circ$; г – $\lambda = 0,55$ мкм, $\varphi = 90^\circ$; д – $\lambda = 0,40$ мкм, $\varphi = 180^\circ$; е – $\lambda = 0,55$ мкм, $\varphi = 180^\circ$

Таблица 1
Диапазон изменения Δr_{surf} при $r_{\text{surf}} = 0,1$
для рассмотренных схем наблюдения и заданных λ и S_M

λ , мкм	S_M , км	Δr_{min}	Δr_{max}
0,40	50	-2,81E-02	5,83E-02
0,45	50	-9,66E-03	1,56E-02
0,55	50	-8,81E-03	2,64E-03
0,85	50	-3,54E-03	7,04E-04
0,40	10	-5,57E-02	6,57E-02
0,45	10	-8,73E-02	3,46E-02
0,55	10	-1,45E-01	3,28E-02
0,85	10	-7,32E-02	1,19E-02

каждый из множителей от 1, тем сильнее влияние C_1 , C_2 и C_3 и больше по модулю значение Δr_{surf} . Поэтому достаточно рассмотреть поведение этих множителей.

Для примера проанализируем следующие ситуации: $\lambda = 0,40$ мкм, $S_M = 50$ км, $\theta_d = 60^\circ$, $\varphi = 0^\circ$ и $\lambda = 0,55$ мкм, $S_M = 50$ км, $\theta_d = 60^\circ$, $\varphi = 180^\circ$ (рис. 4). Поведение Δr_{surf} для рассматриваемых ситуаций определяется главным образом множителем $(1 - C_3)$, т.е. основное влияние при неучете поляризации оказывает I_{sun} .

Для всех рассмотренных ситуаций были рассчитаны значения величин $(1 - C_3)$, $1/(1 + C_1)$ и $1/(1 + C_2)$. В табл. 2 приведены диапазоны их изменений для всех рассмотренных длин волн. Анализируя эти результаты, можно утверждать, что поведение Δr_{surf} в большей степени задается поведением $C_3 = \frac{\Delta I_{\text{sun}}}{I_{\text{sun}} - I_{\text{sun}}}$. Чем выше ΔI_{sun} и чем ближе I_{sun} к I_{sun} , тем сильнее влияет поляризация излучения на результат восста-

новления коэффициента отражения. Кроме того, знак Δr_{surf} зависит от знака ΔI_{sun} .

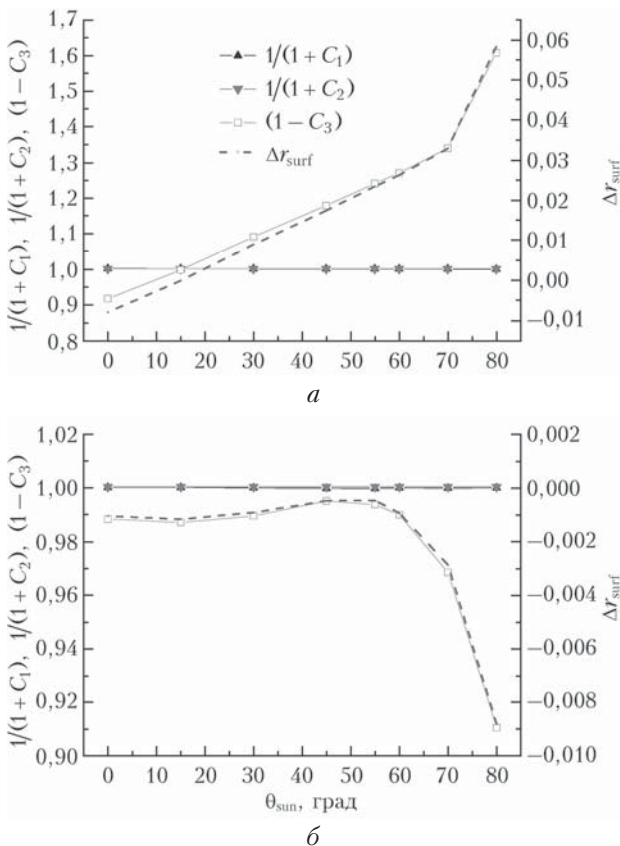


Рис. 4. Зависимости $1/(1+C_1)$, $1/(1+C_2)$, $(1-C_3)$ и Δr_{surf} от угла θ_{sun} : а – $\lambda = 0,40$ мкм, $S_M = 50$ км, $\theta_d = 60^\circ$, $\varphi = 0^\circ$; б – $\lambda = 0,55$ мкм, $S_M = 50$ км, $\theta_d = 60^\circ$, $\varphi = 180^\circ$

Таблица 2

Диапазон изменения $1/(1+C_1)$, $1/(1+C_2)$ и $(1-C_3)$ для всех рассмотренных схем наблюдения и заданных λ и S_M

λ , мкм	S_M , км	$\frac{1}{1+C_1}$		$\frac{1}{1+C_2}$		$(1-C_3)$	
		min	max	min	max	min	max
0,40	50	0,999	1,001	1,000	1,001	0,715	1,608
0,45	50	0,999	1,000	0,999	1,001	0,902	1,159
0,55	50	0,999	1,000	0,999	1,000	0,910	1,025
0,85	50	0,999	1,000	0,999	1,000	0,964	1,007
0,40	10	0,963	0,993	1,013	1,038	0,434	1,685
0,45	10	0,967	0,994	1,006	1,023	0,126	1,369
0,55	10	0,978	0,997	1,002	1,008	0,398	1,354
0,85	10	0,996	0,999	1,000	1,001	0,267	1,123

В целом из табл. 1, 2 следует, что для рассмотренных условий погрешности лежат в диапазонах

$$\begin{aligned}
 -7,40 \cdot 10^{-2} &\leq \Delta I_{\text{sun}}/I_{\text{sun}} \leq 6,85 \cdot 10^{-2}; \\
 0,0 &\leq \Delta I_{\text{surf}}/(T + I_{\text{surf}}) \leq 2,89 \cdot 10^{-4}; \\
 -9,54 \cdot 10^{-2} &\leq \Delta\gamma/\gamma \leq -7,15 \cdot 10^{-4}; \\
 -9,14 \cdot 10^{-4} &\leq \Delta E_0/E_0 \leq 3,84 \cdot 10^{-2},
 \end{aligned}$$

Влияние поляризации излучения на восстановление коэффициента отражения земной поверхности...

отсюда $-0,14 \leq \Delta r_{\text{surf}} \leq 0,07$ для $S_M = 10$ км (что сопоставимо и даже превышает значение $r_{\text{surf}} = 0,1$) и $-0,03 \leq \Delta r_{\text{surf}} \leq 0,02$ для $S_M = 50$ км.

Заключение

Проведенные исследования показывают, что для направлений наблюдения приемной системы вблизи надира или низкой мутности атмосферы влияние поляризации нужно учитывать при $\lambda \leq 0,55$ мкм, а для высокой мутности атмосферы и значительных отклонений от направления в надир – во всем рассматриваемом диапазоне. Погрешность Δr_{surf} при $r_{\text{surf}} = 0,1$ для длин волн 0,40–0,85 мкм будет лежать в диапазоне $-0,03 \leq \Delta r_{\text{surf}} \leq 0,02$ для низкой мутности атмосферы (метеорологическая дальность видимости $S_M = 50$ км) и в диапазоне $-0,14 \leq \Delta r_{\text{surf}} \leq 0,07$ для высокой (метеорологическая дальность видимости $S_M = 10$ км).

Наблюдается сложная зависимость погрешности Δr_{surf} от взаимного положения Солнца и приемной системы. Анализ причин такого поведения показывает, что основной величиной, которая формирует погрешность и определяет ее функциональное поведение, является $C_3 = \Delta I_{\text{sun}}/(I_{\text{sun}} - I_{\text{sun}})$.

Авторы выражают благодарность В.В. Веретенникову за полезные обсуждения темы статьи.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 16-31-00033-мол_а, 15-07-06811-А, 15-01-00783-А).

1. Толпин В.А., Луляя Е.А., Барталев С.А., Плотицков Д.Е., Матвеев А.М. Возможности анализа состояния сельскохозяйственной растительности с использованием спутникового сервиса «ВЕГА» // Оптика атмосф. 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 атмосф. 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 атмосф. 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 [Electronic resource]. URL: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd_mod08.pdf (last access: 17.10.2017).
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 атмосф. 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., Korokin S.* Multiangle implementation of atmospheric correction (MAIAC): 3. Atmospheric correction // *Remote Sens. Environ.* 2012. V. 127. P. 385–393.
11. *Зув 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; *Belov V.V., Tarasenkov M.V.* Statistical modeling of the point spread function in the spherical atmosphere and a criterion for detecting image isoplanarity zones // *Atmos. Ocean. Opt.* 2010. V. 23, N 6. P. 441–447.
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; *Kozhevnikova A.V., Tarasenkov M.V., Belov V.V.* Parallel computations for solving problems of the reconstruction of the reflection coefficient of the Earth's surface by satellite data // *Atmos. Ocean. Opt.* 2013. V. 26, N 4. P. 326–328.
14. *Prigarin S.M., Vazarov K.B., Oppel U.G.* The effect of multiple scattering on polarization and angular distributions for radiation reflected by clouds: Results of Monte Carlo simulation // *Proc. SPIE.* 2014. V. 9292. P. 92920S-1–92920S-8.
15. *Михайлов Г.А., Назаралиев М.А.* Расчеты поляризации света в сферической атмосфере методом Монте-Карло // *Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана.* 1971. Т. 7, № 4. С. 385–395.
16. *Ухинов С.А., Юрков Д.И.* Оценки методов Монте-Карло для параметрических производных поляризованного излучения // *Сиб. ж. вычисл. матем.* 2002. Т. 5, № 1. С. 40–56.
17. *Назаралиев М.А., Сушкевич Т.А.* Расчеты характеристик поля многократно рассеянного излучения в сферической атмосфере // *Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана.* 1975. Т. 11, № 7. С. 705–717.
18. *Kattawar G.W., Plass G.N.* Radiance and polarization of multiple scattered light from haze and clouds // *Appl. Opt.* 1968. V. 7, N 8. P. 1519–1527.
19. *Розенберг Г.В.* Рассеяние света в земной атмосфере // *Успехи физ. наук.* 1960. Т. LXXI, вып. 2. С. 173–213.
20. *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, Сиб. отд., 1976. 284 с.
21. *Zimovaia A.V., Tarasenkov M.V., Belov V.V.* Estimate of the effect of polarization account on the reflection coefficient of the Earth's surface for atmospheric correction of satellite data // *Proc. SPIE.* 2016. V. 10035. P. 1–10.
22. *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.
23. *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.
24. *Чандрасекар С.* Перенос лучистой энергии. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1953. 432 с.
25. *Ван де Хюлст Г.* Рассеяние света малыми частицами. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. 536 с.
26. *Coulson K., Dave J., Sekera Z.* Tables related to radiation emerging from a planetary atmosphere with Rayleigh scattering. University of California Press, 1960. 548 p.
27. *Дейрменджан Д.* Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 165 с.

A.V. Zimovaia, M.V. Tarasenkov, V.V. Belov. Influence of radiation polarization on reconstruction of the Earth surface reflection coefficient from satellite data in the visible wavelength range.

The problem of taking into account the influence of polarization is considered for correction of satellite images of the Earth surface in the visible wavelength range for the distorting effect of the atmosphere. A program complex for calculation of the radiation components forming the satellite images has been developed with and without allowance for radiation polarization in the approximation of the homogeneous surface. Conditions are established under which the neglect of the radiation polarization can lead to significant errors in reconstruction of the reflection coefficients of weakly reflecting surfaces.