

М.Л. Белов, А.В. Белохвостиков, В.М. Орлов

ВЛИЯНИЕ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ НА ПОЛЕ ЯРКОСТИ СИСТЕМЫ «ОКЕАН—АТМОСФЕРА»

В статье рассматривается влияние ветрового волнения на яркость излучения, отраженного от морской поверхности. Приводятся интегральные выражения, описывающие отраженное излучение в рамках теории двукратного взаимодействия излучения с системой «океан—атмосфера». Получены аналитические формулы, которые хорошо согласуются с результатами численного интегрирования вне области солнечного блика.

В задачах определения концентрации содержащихся в морской воде хлорофилла и минеральной взвеси дистанционными методами широкое распространение получил алгоритм атмосферной коррекции, описанный в [1]. Этот алгоритм успешно применялся при обработке данных со сканера береговой зоны (CZCS).

В основу алгоритма коррекции положены следующие соотношения:

$$B_w(\lambda_i) = [B(\lambda_i) - B_p(\lambda_i) - B_a(\lambda_i)]/t(\lambda_i); \quad (1)$$

$$B_a(\lambda_i) = S(\lambda_i, \lambda_4)[B(\lambda_4) - B_p(\lambda_4) - B_w(\lambda_4)t(\lambda_4)], \quad (2)$$

где $B_w(\lambda_i)$ — спектральная яркость (СЯ) излучения, выходящего из толщи моря; $B(\lambda_i)$ — СЯ излучения, регистрируемого датчиком на верхней границе атмосферы; $B_p(\lambda_i)$ — СЯ излучения, рассеянного молекулами атмосферных газов (рэлеевское или молекулярное рассеяние); $B_a(\lambda_i)$ — СЯ излучения, рассеянного аэрозольными частицами атмосферы (аэрозольное рассеяние); $t(\lambda_i)$ — коэффициент диффузного пропускания атмосферы; $S(\lambda_i, \lambda_4)$ — коэффициент, учитывающий спектральную зависимость аэрозольного рассеяния; λ_i — средняя длина волны i -го спектрального диапазона.

Составляющие $B_p(\lambda_i)$ и $B_a(\lambda_i)$ в (1) и (2) включают как только рассеянное в атмосфере, так и отраженное от морской поверхности излучение

$$B_{p(a)} = B_d^{p(a)}(\lambda_i) + B_{АПМ}^{p(a)}(\lambda_i) + B_{ПМА}^{p(a)}(\lambda_i) + B_{ПМ}^{p(a)}(\lambda_i), \quad (3)$$

где $B_d(\lambda_i)$ — СЯ излучения, рассеянного в атмосфере (яркость атмосферной дымки); $B_{АПМ}(\lambda_i)$ — СЯ излучения, рассеянного в атмосфере и отраженного от поверхности моря; $B_{ПМА}(\lambda_i)$ — СЯ прямого солнечного излучения, отраженного от поверхности моря, а затем рассеянного в атмосфере; $B_{ПМ}(\lambda_i)$ — СЯ прямого солнечного излучения, отраженного от морской поверхности без рассеяния в атмосфере.

При использовании (3) в алгоритме коррекции [1] влиянием ветрового волнения пренебрегают и считают морскую поверхность гладкой. При этом $B_{ПМ}(\lambda_i) = 0$, а значения $B_{АПМ}(\lambda_i)$ и $B_{ПМА}(\lambda_i)$ выражаются простыми соотношениями (см., например, [2]). Ниже исследуется влияние ветрового волнения на поле спектральной яркости системы «океан—атмосфера» для задач коррекции атмосферных искажений при дистанционном зондировании океана.

С целью учета влияния ветрового волнения на яркость отраженного от морской поверхности излучения, составляющие $B_{АПМ}$ и $B_{ПМА}$ можно описать следующими интегральными выражениями:

$$B_{АПМ} = \sec \theta_1 e^{-\frac{\tau_0}{\cos \theta_1}} \int_0^{2\pi} \int_0^1 B^\downarrow(n') \cos \chi r_\Phi(\chi) P(\theta_n, \varphi_n) \sec^4 \theta_n d \cos \theta_n d \varphi_n; \quad (4)$$

$$B_{ПМА} = \frac{e^{-\frac{\tau_0}{\cos \theta_C}}}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 B_{ПМ}^\uparrow(n'') \cos \theta'' \sigma(n'', n_1) \cos \chi' d \cos \theta_n d \varphi_n, \quad (5)$$

где θ_c — зенитный угол солнца; θ_1 — зенитный угол наблюдения; τ_0 — оптическая толщина атмосферы; r_Φ — коэффициент отражения Френеля; χ, χ' — соответствующие углы падения; θ_n, φ_n — зенитный угол и азимут нормали микроплощадки; $B^\downarrow(n) = 0,25 S \cos \theta_c g(\gamma) Q(\tau_0, \theta', \theta_c)$ — СЯ рассеянного излучения небосвода в приближении однократного рассеяния [3]; S — спектральная солнечная постоянная;

$$P(\theta_n, \varphi_n) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp \left\{ -\frac{\text{tg}^2 \theta_n}{2} \left[\frac{\sin^2(\varphi_n - \varphi_V)}{\sigma_x^2} + \frac{\cos^2(\varphi_n - \varphi_V)}{\sigma_y^2} \right] \right\}$$

— плотность вероятности распределения наклонов нормалей микроплощадок [4]; $\sigma_x^2 = (3 + 1,92V)10^{-3}$; $\sigma_y^2 = 3,16 \cdot 10^{-3} \cdot V$; V , φ_V — скорость и азимут ветра; $\sigma(n'', n_1) = 0,25g(\gamma)Q(\tau_0, \theta'', \theta_1)$ — коэффициент пропускания атмосферы в приближении однократного рассеяния [3]; $g(\gamma)$ — индикатриса рассеяния; γ — угол рассеяния:

$$Q(\tau_0, \theta_i, \theta_j) = (e^{-\tau_0/\cos \theta_i} - e^{-\tau_0/\cos \theta_j}) / (\cos \theta_i - \cos \theta_j).$$

Направление наблюдения n_1 и направление падения n' , а также направление отражения n'' и направление на солнце n_C связаны с направлением нормали n соотношениями зеркального отражения: $n' = -n_1 + 2n \cos \chi$; $n'' = -n_C + 2n \cos \chi'$. Угол рассеяния γ и косинусы углов падения $\cos \chi$ и $\cos \chi'$ определяются из соотношений, описывающих взаимное положение векторов в сферической системе координат.

При освещении морской поверхности параллельными солнечными лучами интеграл (4) легко вычисляется и дает выражение для описания СЯ солнечного излучения, отраженного от морской поверхности

$$B_{\text{ПМ}} = 0,25 \pi S \sec \theta_1 \sec^4 \theta_n r_\Phi (\chi^\circ) P(\theta_n^0, \varphi_n^0) e^{-\tau_0 \left(\frac{1}{\cos \theta_1} + \frac{1}{\cos \theta_C} \right)}, \quad (6)$$

где θ_n^0, φ_n^0 — положения нормали микроплощадки, зеркально отражающей солнечное излучение в направлении n_1 ; χ° — соответствующий угол падения.

После проведения ряда преобразований и положив $\varphi_V = 0$; $\varphi_C = \pi$; $r_\Phi = \text{const}$, получим выражения, приближенно описывающие значения интегралов (4) и (5)

$$B_{\text{АПМ}} = \frac{S \cos \theta_C}{4} r_\Phi e^{-\tau_0/\cos \theta_1} \left\{ g(\gamma) Q + \frac{1}{2 \cos \theta_1} \left[\frac{\partial^2 G_{11}}{\partial x^2} \sigma_x^2 + \frac{\partial^2 G_{21}}{\partial x^2} \sigma_y^2 \right] \right\}; \quad (7)$$

$$B_{\text{ПМА}} = \frac{S r_\Phi}{4} e^{-\frac{\tau_0}{\cos \theta_C}} \left\{ g(\gamma) Q \cos \theta_C + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial^2 G_{12}}{\partial x^2} \sigma_x^2 + \frac{\partial^2 G_{21}}{\partial x^2} \sigma_y^2 \right] \right\}, \quad (8)$$

где

$$\frac{\partial^2 G_{11}}{\partial x^2} = \cos \theta_1 \left[g''_{\{1\}_2} + 2g'_{\{1\}_2} Q'_{f\{1\}_2} + g(Q''_{f\{1\}_2} + Q'_{f\{1\}_2}) \right] + 2 \sin \theta_1 \sin \varphi_1 (g'_{\{1\}_2} Q + g Q'_{f\{1\}_2});$$

$$\frac{\partial^2 G_{12}}{\partial x^2} = \cos \theta_C \left[g''_{\{1\}_2} + 2g'_{\{1\}_2} Q'_h h'_{\{1\}_2} + g(Q''_h R'_{\{1\}_2} + Q'_h h''_{\{1\}_2}) \right] - \left\{ 2 \sin \theta_C (g'_{\{1\}_2} Q + g Q'_h h'_{\{1\}_2}); \right.$$

$$h = \cos \theta_C; \quad h''_1 = h''_2 = -4 \cos \theta_C;$$

$$f = \cos \theta_1; \quad f'_1 = 2 \sin \theta_1 \sin \varphi_1; \quad f'_2 = 2 \sin \theta_1 \cos \varphi_1; \quad f''_1 = f''_2 = -4 \cos \theta_1; \quad h'_1 = 0;$$

$$Q_{\{f\}_h} = \left[\exp \left(-\tau_0 \left\{ \frac{f}{h} \right\} \right) - \exp \left(-\tau_0 / \cos \left\{ \theta_C \right\} \right) \right] / \left(\left\{ \frac{f}{h} \right\} - \cos \left\{ \theta_C \right\} \right); \quad h'_2 = -2 \sin \theta_C;$$

$$g = g(\cos \gamma); \quad \cos \gamma = \cos \theta_C \cos \theta_1 + \sin \theta_C \sin \theta_1 \cos \varphi_1; \quad \frac{\partial g(\cos \gamma)}{\partial \cos \gamma} = g'_\gamma; \quad \frac{\partial^2 g(\cos \gamma)}{(\partial \cos \gamma)^2} = g''_\gamma;$$

$$g'_1 = 2 \cos \theta_C \sin \theta_1 \sin \varphi_1 g'_\gamma; \quad g'_2 = 2 (\cos \theta_C \sin \theta_1 \cos \varphi_1 - \sin \theta_C \cos \theta_1) g'_\gamma;$$

$$g''_1 = -4 \cos \theta_C \cos \theta_1 g''_\gamma + 4 \cos^2 \theta_C \sin^2 \theta_1 \sin^2 \varphi_1 g''_\gamma; \quad g''_2 = -4 (\cos \theta_C \cos \theta_1 - \sin \theta_C \sin \theta_1 \cos \varphi_1) g''_\gamma + 4 (\cos \theta_C \sin \theta_1 \cos \varphi_1 - \sin \theta_C \cos \theta_1)^2 g''_\gamma.$$

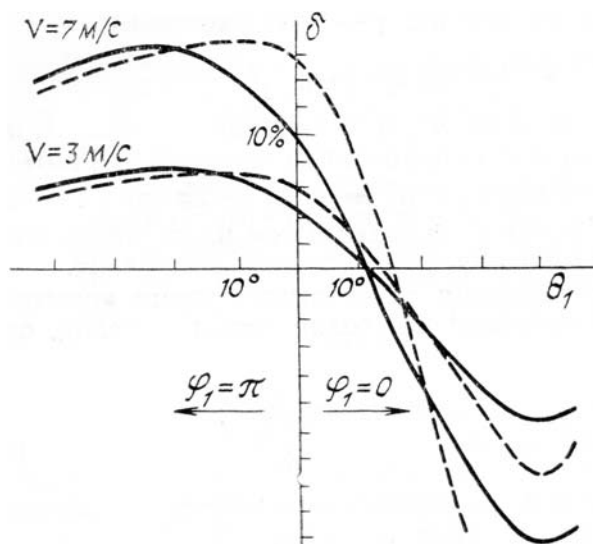
Вид функции $g(\cos \gamma)$ и ее производные зависят от типа используемой индикатрисы. В частности, для индикатрисы Хеньи — Гринштейна:

$$g_{X\Gamma}(\cos \gamma) = (1 - g_x^2)(1 + g_x^2 - 2g_x \cos \gamma)^{-3/2};$$

$$\frac{\partial g_{X\Gamma}(\cos \gamma)}{\partial \cos \gamma} = 3g_x(1 - g_x^2)(1 + g_x^2 - 2g_x \cos \gamma)^{-5/2};$$

$$\frac{\partial^2 g_{X\Gamma}(\cos \gamma)}{(\partial \cos \gamma)^2} = 15g_x(1 - g_x^2)(1 + g_x^2 - 2g_x \cos \gamma)^{-7/2},$$

где $g_x \in [0, 1]$ — параметр индикатрисы.



Влияние ветрового волнения на яркость излучения, отраженного от поверхности моря

Анализ результатов численного интегрирования показывает, что поправка, вызванная влиянием ветрового волнения, может достигать значительной величины по отношению к СЯ излучения, отраженного от гладкой морской поверхности. На рисунке показан угловой ход относительной поправки δ , рассчитанной с помощью численного интегрирования (4), (5) и по приближенным формулам (7), (8). Расчеты проводились при следующих значениях параметров: $r_\phi = 0,02$; $S = 1/\pi$; $\phi_C = \pi$; $\phi_V = 0$; $\theta_C = 40^\circ$; $\tau_0 = 0,5$; $V = 3; 7$ м/с; $g_x = 0,5$ для индикатрисы Хеньи—Гринстейна. Из рисунка видно, что в рассматриваемых условиях величина поправки достигает 20%. Отклонение поправки, полученной по приближенным формулам (штриховые линии), от результатов численного интегрирования (сплошные линии) вне солнечного блика достаточно мало, что позволяет предложить эти формулы для учета ветрового волнения в алгоритмах коррекции атмосферных искажений при определении дистанционными методами концентрации хлорофилла и минеральной взвеси, содержащихся в морской воде.

1. Gordon H.R., Clark D.K., Brown J.W. et al. // Appl. Opt. 1983. V. 22. №1. P. 20—36.
2. Viollier M., Tanre D., Deschamps P.V. // Boundary — Zayer Meteorol. 1980. V. 18. №3. P. 347—367.
3. Соболев В.В. Перенос лучистой энергии в атмосферах звезд и планет. М.: Гостехиздат, 1956. 392 с.
4. Cox C., Munk W. // Bull. Scripps. Inst. Oceanogr. 1956. V. 6. №9. P. 401—488.

Всесоюзный научно-исследовательский институт
морского рыбного хозяйства и океанографии,
Москва

Поступило в редакцию
9 февраля 1989 г.

M.L. Belov, A.V. Belokhvoshtikov, V.M. Orlov. **The Influence of Wind-Ruffled Sea Surface on the Radiance of Ocean-Atmosphere System.**

The influence of wind-ruffled sea surface on the radiance of reflected from the sea surface radiation is considered in this paper. Integral expressions describing the reflection of radiation from the sea surface are given within the framework of the theory of the double interaction between the radiation and the ocean-atmosphere system. Analytical expressions which show good agreement with the numerical integration results at the points located sufficiently far from the center of the glitter pattern are obtained.