

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

ВЛИЯНИЕ ПЕНЫ НА ПОЛЕ ЯРКОСТИ СИСТЕМЫ «ОКЕАН—АТМОСФЕРА»

В работе получены аналитические выражения, позволяющие рассчитать яркость восходящего излучения системы «поверхность моря—атмосфера» с учетом отражения от пенных образований при различных состояниях атмосферы, скорости ветра и геометрии освещения и наблюдения. Показано, что изменения степени покрытия пеной морской поверхности и альбедо пены, вызванные изменениями физикохимических свойств морской воды, приводят к значительным вариациям яркости восходящего излучения на верхней границе атмосферы.

Для расширения возможностей дистанционного определения концентрации содержащихся в морской воде примесей (пигментов хлорофилла, минеральной взвеси и пр.) необходимо усовершенствование алгоритмов атмосферной коррекции [1]. Одним из путей повышения их достоверности является использование более точных моделей, описывающих процессы распространения видимого и ближнего ИК-излучения в атмосфере над морской поверхностью.

В основу алгоритмов атмосферной коррекции положено соотношение [2]

$$B_W(\lambda_i) = [B(\lambda_i) - B_{p+a}(\lambda_i)]/t(\lambda_i), \quad (1)$$

где $B_W(\lambda_i)$ — спектральная яркость излучения, выходящего из толщи моря; $B(\lambda_i)$ — яркость излучения, регистрируемого датчиком на верхней границе атмосферы; $B_{p+a}(\lambda_i)$ — яркость излучения, рассеянного молекулами атмосферных газов (рэлеевское или молекулярное рассеяние) и аэрозольными частицами атмосферы (аэрозольное рассеяние); $t(\lambda_i)$ — коэффициент диффузного пропускания атмосферы; λ_i — средняя длина волны i -го спектрального диапазона.

Составляющая $B_{p+a}(\lambda_i)$ в (1) включает как только рассеянное в атмосфере, так и отраженное от морской поверхности излучение:

$$B_{p+a}(\lambda_i) = B_d^{p+a}(\lambda_i) + B_{АПМ}^{p+a}(\lambda_i) + B_{ПМА}^{p+a}(\lambda_i) + B_{ПМ}^{p+a}(\lambda_i), \quad (2)$$

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

При вычислении (2) в алгоритмах атмосферной коррекции морскую поверхность считают плоской или учитывают влияние ветрового волнения только на отражение прямого солнечного излучения [2]. В [3] получены выражения, описывающие зависимость составляющих отраженного от морской поверхности излучения $B_{ПМ}$, $B_{АПМ}$ и $B_{ПМА}$ от оптического состояния атмосферы, геометрии наблюдения и скорости приводного ветра. Ниже рассматривается отражение излучения от поверхности моря с учетом пенных образований, возникающих при увеличении скорости ветра выше некоторого предела.

При наличии пенных образований в приближении двукратного взаимодействия излучения с системой «поверхность моря—атмосфера» яркость излучения, отраженного от поверхности моря (без учета переотражения на поверхности), $B_{пф}$ можно записать в виде

$$B_{пф} = C_f B_f + (1 - C_f) B_{п}, \quad (3)$$

где C_f — доля поверхности, покрытой пеной; $B_{п} = B_{ПМ} + B_{АПМ} + B_{ПМА}$ — яркость излучения, отраженного от взволнованной морской поверхности, свободной от пены; B_f — яркость излучения, отраженного от участков поверхности, покрытых пеной.

Считая пену диффузным отражателем [4] с альбедо A_f и используя приближение однократного рассеяния в атмосфере, яркость излучения $B_f(\tau, \Theta)$ представим в виде

$$B_f(\tau, \Theta) = \frac{1}{\pi} A_f E_{\Sigma} \left(e^{-\tau/\cos\Theta} + \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \sigma_1(\tau, \Theta, \varphi, \Theta', \varphi') \cos \Theta' \sin \Theta' d\Theta' d\varphi' \right), \quad (4)$$

где

$$E_{\Sigma} = \pi S \cos \Theta_0 \left(e^{-\tau/\cos \Theta_0} + \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \sigma_1(\tau_0, \Theta'', \varphi'', \Theta_0, \varphi_0) \cos \Theta'' \sin \Theta'' d\Theta'' d\varphi'' \right) \quad (5)$$

— освещенность морской поверхности прямым и рассеянным солнечным светом (S — солнечная постоянная);

$$\sigma_1(\tau, \Theta_1, \varphi_1, \Theta_2, \varphi_2) = x(\gamma)/4 (e^{-\tau/\cos \Theta_1} - e^{-\tau/\cos \Theta_2}) / (\cos \Theta_1 - \cos \Theta_2) \quad (6)$$

— коэффициент пропускания слоя атмосферы оптической толщины τ в приближении однократного рассеяния [5]; $x(\gamma)$ — индикатриса рассеяния атмосферы; γ — угол рассеяния;

$$\cos \gamma = \cos \Theta_1 \cos \Theta_2 + \sin \Theta_1 \sin \Theta_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1); \quad (7)$$

τ_0 — оптическая толщина всей атмосферы; Θ, φ — зенитный угол и азимут наблюдения; Θ_0, φ_0 — зенитный угол и азимут солнца.

С учетом (5–7), используя обозначения

$$t_{\text{пр}}(\tau_i, \Theta_i) = e^{-\tau_i/\cos \Theta_i}, \quad (8)$$

$$t_{\text{диф}}(\tau_i, \Theta_i) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{x(\gamma)}{4} \frac{e^{-\tau_i/\cos \Theta'} - e^{-\tau_i/\cos \Theta_i}}{\cos \Theta' - \cos \Theta_i} \cos \Theta' \sin \Theta' d\Theta' d\varphi', \quad (9)$$

преобразуем (4) к виду

$$B_f = A_f S \cos \Theta_0 (t_{\text{пр}}(\tau_0, \Theta_0) + t_{\text{диф}}(\tau_0, \Theta_0) (t_{\text{пр}}(\tau, \Theta) + t_{\text{диф}}(\tau, \Theta)). \quad (10)$$

Для вычисления интеграла (9) воспользуемся представлением индикатрисы $x(\gamma)$ в виде суммы двух членов разложения по полиномам Лежандра,

$$x(\gamma) \approx 1 + x_1 \cos \gamma,$$

где

$$x_1 = \frac{3}{2} \int_0^{\pi} x(\gamma) \cos \gamma \sin \gamma d\gamma$$

— первый коэффициент разложения.

После ряда преобразований получим:

$$\begin{aligned} t_{\text{диф}}(\tau_i, \Theta_i) = & 0,5 (1 + x_1 \cos^2 \Theta_i) \{ e^{-\tau_i/\cos \Theta_i} [\cos \Theta_i (\text{Ei}(-\tau_i (1 - \sec \Theta_i)) - \\ & - \ln |1 - \sec \Theta_i|) - 1] + e^{-\tau_i} + (\tau_i - \cos \Theta_i) \text{Ei}(-\tau_i) \} + \\ & + \frac{x_1 \cos \Theta_i}{4} [e^{-\tau_i} (1 - \tau_i) - e^{-\tau_i/\cos \Theta_i} - \tau_i^2 \text{Ei}(-\tau_i)], \end{aligned} \quad (11)$$

где $\text{Ei}(\cdot)$ — интегральная показательная функция.

Выражение (11) описывает коэффициент пропускания атмосферы $t_{\text{диф}}$ (9) с незначительной погрешностью, которая (для выбранных условий наблюдения и типа индикатрис — рэлеевской, Хенни — Гринштейна и модельной; для морского аэрозоля [2] и $\tau < 0,9$) не превышает 15%.

Таким образом, яркость излучения, отраженного от морской поверхности с пенными образованиями, описывается выражениями (3) и (10), при этом значения $t_{\text{пр}}(\tau, \Theta)$ $t_{\text{диф}}(\tau, \Theta)$ рассчитываются по формулам (8) и (11) соответственно.

На рис. 1, 2 приведены графики яркости восходящего излучения системы «поверхность моря — атмосфера» на верхней границе атмосферы в спектральных диапазонах $\lambda = 440$ и $\lambda = 700$ нм для различных скоростей ветра. Расчеты проводились при следующих условиях:

$$S = 1; \Theta_0 = 40^\circ; A_f = 0,5; \tau_a(440) = 0,24; \tau_a(700) = 0,2;$$

$$\tau_p(440) = 0,25; \tau_p(700) = 0,037; \tau_0(\lambda_i) = \tau_a(\lambda_i) + \tau_p(\lambda_i);$$

$$x_{\lambda_i}(\gamma) = (\tau_a(\lambda_i) x_a(\gamma) + \tau_p(\lambda_i) x_p(\gamma)) / \tau_0(\lambda_i).$$

Здесь индекс «а» соответствует оптическим характеристикам аэрозольной атмосферы, а индекс «р» — рэлеевской атмосферы. Зависимость степени покрытия пеной от скорости ветра рассчитывалась по эмпирической формуле [6].

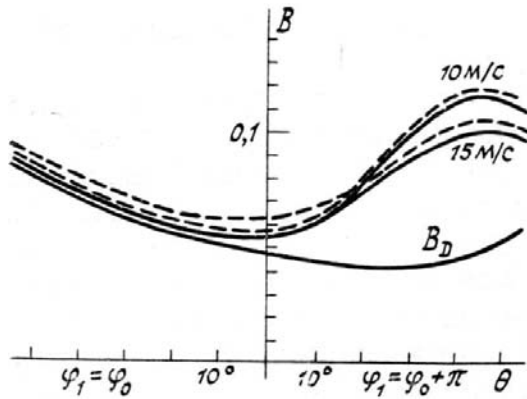


Рис. 1. Яркость восходящего излучения системы «поверхность моря — атмосфера». $\lambda = 440$ нм

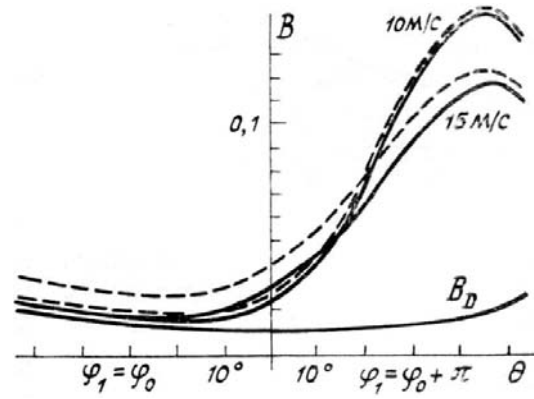


Рис. 2. Яркость восходящего излучения системы «поверхность моря — атмосфера». $\lambda = 700$ нм

На рис. 1, 2 сплошными линиями показана яркость излучения, отраженного от поверхности моря без учета пенных образований, и яркость атмосферной дымки B_D , пунктиром — яркость отраженного излучения с учетом наличия пены. Из рисунков видно, что при скорости ветра больше 10 м/с наличие пены существенно увеличивает яркость восходящего излучения, особенно в областях спектра, где относительное преобладание аэрозоля увеличивает вытянутость индикатрисы рассеяния атмосферы.

При вычислении яркости излучения, отраженного от морской поверхности, покрытой пеной, большое значение имеет точность описания зависимости степени покрытия пеной C_f от скорости ветра и выбор значения альбедо пены A_f .

На рис. 3 приведены результаты расчета яркости восходящего излучения при скоростях ветра 10 и 15 м/с для разных моделей, описывающих зависимость степени покрытия пеной морской поверхности от скорости ветра для морской воды с разными физико-химическими свойствами [6–7]. Яркость излучения рассчитывалась для состояния атмосферы, соответствующего длине волны $\lambda = 700$ нм (см. описание к рис. 2). Результаты приведены в виде относительной поправки к яркости атмосферной дымки. Из графиков видно, что неопределенность расчета яркости излучения, вызванная неопределенностью выбора модели ценообразования, сравнима с величиной яркости излучения, рассеянного в атмосфере.

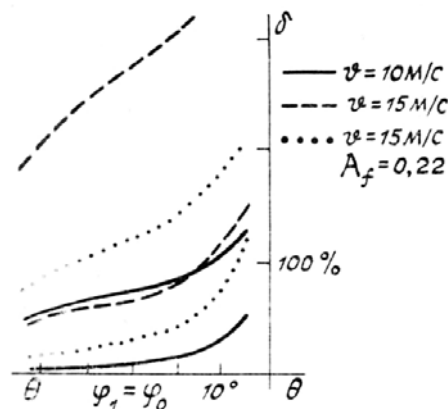


Рис. 3. Влияние неопределенности выбора модели пенообразования на яркость восходящего излучения

Еще одним фактором, создающим трудность описания отраженного от вспененной морской поверхности излучения, является неопределенность значения альбедо пены A_f . Альбедо участка пенной поверхности зависит от продолжительности существования конкретного пенного образования и сни-

жается по мере распада пенной структуры [5]. Таким образом, среднее альbedo всех пенных образований зависит как от интенсивности пенообразования, так и от времени существования пенных структур, определяемого физико-химическими свойствами морской воды. На рис. 3 показаны графики расчетов относительной поправки, вызванной наличием пены, со средним значением альbedo $A_f = 0,22$ [4] для двух крайних значений степени покрытия пены C_f при скорости ветра 15 м/с.

Следует отметить, что значение альbedo $A_f = 0,22$ существенно ниже величин, применяемых ранее, так как другие авторы использовали значения альbedo, измеренные в лабораторных условиях на плотных и свежих пенных структурах.

Таким образом, в работе получена параметрическая модель, описывающая яркость восходящего излучения системы «поверхность моря – атмосфера» с учетом пенных образований. Результаты расчетов, проведенных с помощью параметрической модели, позволяют сделать следующие выводы:

– наличие пенных образований приводит к существенному увеличению яркости восходящего излучения системы «океан – атмосфера» при скорости ветра больше 5–7 м/с;

– при скорости ветра больше 10 м/с неопределенность значения альbedo пены A_f и зависимость степени покрытия пеной C_f при различных условиях приводят к разбросу значения яркости, сравнимому с яркостью системы «поверхность моря – атмосфера»;

– для успешного проведения дистанционного зондирования над морской поверхностью при скоростях ветра больше 7 м/с необходимо проведение измерений степени покрытия пеной морской поверхности и альbedo пены одновременно с дистанционным зондированием.

1. Davis C. O. // Adv. Space Res. 1987. V. 7. № 2. P. (2) 3.
2. Gordon H. R., Clark D. K., Brown J. W. et al. // Appl. Opt. 1983. V. 22. № 1. P. 20.
3. Белов М.Л., Белохвостиков А.В., Орлов В.М. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 5. С. 546.
4. Коерке Р. // Appl. Opt. 1984. V. 23. № 11. P. 1816.
5. Соболев В.В. Перенос лучистой энергии в атмосферах звезд и планет. М.: Гостехиздат, 1956. 392 с.
6. Monahan E. C., O’Muircheartaigh. // Int. j. Remote Sensing. 1986. V. 7. № 5. P. 627.
7. Бортковский Р. С. // Метеорология и гидрология. 1987. № 5. С. 68.

Всесоюзный научно-исследовательский институт морского рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО). МРХ СССР

Поступила в редакцию
6 марта 1990 г.

A. V. Belokhvoostikov, M. L. Belov, V. M. Orlov. The Influence of Foam on the «Ocean-Atmosphere» System Radiance Field.

Analytical expressions for calculation of the upward radiation from the «sea surface – atmosphere» system taking into account reflection from the sea foam under different atmospheric conditions, wind speed values and different geometries of observation and irradiation are obtained. It is shown that variations of the foam’s coverage and albedo, caused by the variations of the sea water physical and chemical properties, produce considerable variations of the upward going radiation at the upper boundary of the atmosphere.