

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ
И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.521

А.Г. Лактионов, Н.А. Луцева, А.А. Мироненко, В.С. Суетин

МОДЕЛЬ УХОДЯЩЕГО КОРОТКОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
НАД АТЛАНТИЧЕСКИМ ОКЕАНОМ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА «ИНТЕРКОСМОС-21»

Проведена статистическая обработка измерений спектральной яркости B_λ системы «океан—атмосфера» над Атлантическим океаном 0—30° с.ш. Предложена статистически обоснованная зависимость \bar{B}_λ от оптической массы атмосферы m_\odot . Дана зависимость \bar{B}_λ от длины волны в диапазоне 0,4—0,8 мкм. Показано согласие предложенной модели с данными других авторов.

При дистанционных исследованиях Земли и ее атмосферы из космоса необходимо иметь средне-статистическую модель, учитывающую зависимость наблюдаемой спектральной яркости системы «Земля—атмосфера» от зенитного угла Солнца.

В работе [1] зависимость яркости системы «океан—атмосфера» от зенитного угла Солнца z_\odot аппроксимировалась полиномами 3-й степени для видимой области спектра в условиях безоблачной атмосферы.

Целью настоящей работы является определение зависимости спектральной яркости системы «океан—атмосфера» B_λ от оптической массы атмосферы m_\odot в направлении от Земли на Солнце, которая является функцией зенитного угла Солнца z_\odot [2] в условиях безоблачной атмосферы.

Работа основана на статистической обработке измерений B_λ в области спектра 0,415—0,823 мкм, которые производились в течение полутора лет многоканальным спектрометром МКС [3, 41 с борта ИСЗ «Интеркосмос-21» при непрерывном трассовом зондировании и ориентации оси визирования в надир. Высота полета спутника 500—600 км, угол поля зрения спектрометра ~ 1°. Спектральная яркость системы «океан—атмосфера» определена в 7 спектральных каналах с полушириной $\Delta\lambda = 10$ нм (0,415; 0,449; 0,483; 0,534; 0,569; 0,621; 0,676 мкм) и в 6 каналах с полушириной $\Delta\lambda = 0,5$ нм (0,758; 0,761; 0,763; 0,767; 0,794; 0,823 мкм). Суммарная ошибка измерений B_λ составляла ~ 3%.

Статистической обработке были подвергнуты ~ 50 000 измерений над Атлантикой 0—30° с.ш., которые были сгруппированы по сезонам года и пяти диапазонам зенитных углов Солнца Z_\odot : 0—60°; 60—70°; 75—80°; 80—85° и 85—90°. Были построены гистограммы спектральных яркостей для всех указанных массивов и получены статистические характеристики: математическое ожидание, средне-квадратическое отклонение, коэффициенты асимметрии и эксцесса. Средние значения \bar{B}_λ для разных сезонов и соответствующих диапазонов Z_\odot отличались не более чем на 30%. Это позволило сделать вывод об отсутствии сезонного хода величин спектральных яркостей в районе Атлантики 0—30° с.ш. и при дальнейшем анализе рассматривать все полученные данные независимо от времени года.

Из всего массива измерений была составлена выборка безоблачных участков. Анализ изменения яркости, измеренной вдоль трассы полета ИСЗ, показал, что участки с безоблачной атмосферой и сплошной облачностью являются более однородными по сравнению с переходными участками (частичная облачность). С помощью критерия близости спектра и порогового уровня B_λ , были выделены участки, соответствующие безоблачной атмосфере. Количество измерений в условиях безоблачности в указанном районе Атлантики составило ~ 10 000.

В логарифмическом масштабе для средних значений \bar{B}_λ были построены графики зависимости $\lg \bar{B}_\lambda$ от $\lg m_\odot$ и $\lg \bar{B}_\lambda$ от $\lg(m_\odot + 1)$. Линейный характер этих зависимостей позволил представить в виде уравнений регрессии:

$$\lg \bar{B}_\lambda = \lg \alpha_1 + \beta_1 \lg m_\odot; \quad (1)$$

$$\lg \bar{B}_\lambda = \lg \alpha_2 + \beta_2 \lg (m_\odot + 1), \quad (2)$$

Таблица 1

Относительная среднеквадратическая погрешность $\delta \bar{B}_\lambda$ аппроксимации соотношениями (1) и (2), коэффициенты вариации спектральной яркости по спутниковым данным

λ , мкм	0,415	0,449	0,483	0,534	0,569	0,621	0,676	0,758	0,761	0,763	0,767	0,794	0,823
$\delta \bar{B}_\lambda^{(1)}$, %	33	38	38	31	24	28	38	28	53	35	24	32	45
$\delta \bar{B}_\lambda^{(2)}$, %	4	5	6	11	16	17	16	23	23	21	28	22	21
κ_λ , %	17	18	26	31	37	43	48	59	58	59	63	60	54

Таблица 2

Значения \bar{b}_λ , доверительные интервалы $|\bar{b}_\lambda|$ для $\alpha = 0,1$ и значения r_λ

λ , мкм	0,415	0,449	0,483	0,534	0,569	0,621	0,676	0,758	0,761	0,763	0,767	0,794	0,823
\bar{b}_λ , отн. ед.	0,311	0,294	0,24	0,181	0,135	0,124	0,130	0,105	0,03	0,049	0,079	0,1	0,095
$ \Delta \bar{b}_\lambda $	0,008	0,009	0,009	0,012	0,014	0,014	0,013	0,016	0,04	0,006	0,014	0,014	0,012
$S_{\odot, \lambda}$, мВт см ² ·мкм·ср	54,78	63,28	63,28	60,10	58,66	53,79	47,40	39,63	39,15	38,93	38,36	36,92	33,90
r_λ , отн. ед.	0,87	1,0	1,0	0,93	0,79	0,85	1,0	1,0	0,28	0,46	0,75	1,0	1,0

где α_1 , α_2 , β_1 и β_2 — коэффициенты регрессии. Эти коэффициенты были найдены по методу наименьших квадратов. Расчет коэффициентов корреляции для всех спектральных каналов показал, что их значения лежат в диапазоне от 0,9 до 0,99. Проверка значимости коэффициентов корреляции проводилась по r -критерию [5]. Анализ изменения величин β_1 и β_2 в соотношениях (1) и (2) показал, что их можно принять $\beta_1 = \beta_2 = -1$.

В табл. 1 приведены относительные среднеквадратические погрешности $\delta \bar{B}_\lambda$ аппроксимации экспериментальных данных \bar{B}_λ уравнениям (1) и (2) для уровня значимости $\alpha = 0,3$. Анализ этих данных показал, что точность аппроксимации значений $\bar{B}_\lambda(m_\odot)$ по соотношению (2) от 1,5 до 8 раз выше по сравнению с данными, получаемыми по соотношению (1), за исключением длин волн, равных 0,767 и 0,758 нм, где оба соотношения дают практически одинаковую точность аппроксимации. Исходя из (2), зависимость \bar{B}_λ от m_\odot можно представить следующим эмпирическим соотношением:

$$\bar{B}_\lambda = \bar{b}_\lambda \cdot S_{\odot, \lambda} / (m_\odot + 1), \quad (3)$$

где $E = \pi S_{\odot, \lambda}$ — спектральная солнечная постоянная [6]; b_λ — коэффициент яркости системы «океан — атмосфера».

В [1] приведены графики зависимости экспериментальных значений B_λ от зенитного угла Солнца Z_\odot для $\lambda = 0,5$ и $0,7$ мкм. Аппроксимация этих данных соотношением (3) в диапазоне $30^\circ \leq Z_\odot \leq 75^\circ$, проведенная нами, показала, что относительная погрешность для B_λ при $\lambda = 0,5$ мкм составляет $\sim 7\%$, а для $\lambda = 0,7$ мкм достигает 13%. Таким образом, показана приемлемость (3) для аппроксимации данных, полученных в [1].

Переходя к анализу спектрального хода величин яркости \bar{B}_λ , необходимо отметить существенное увеличение коэффициентов вариации κ_λ измеренных значений B_λ при увеличении длины волны (табл. 1). Изменчивость яркости системы «океан — атмосфера» связана с ее зависимостью от спектрального хода альbedo подстилающей поверхности $q(\lambda)$, от особенностей спектрального поглощения, рассеяния излучения атмосферным аэрозолем, а также от наличия в рассматриваемой области спектра полос поглощения молекулярным кислородом и озоном. Приведенные в табл. 2 значения \bar{b}_λ можно рассматривать как одну из моделей минимальных значений коэффициентов яркости системы «Земля — атмосфера», исходя из следующих соображений:

— альbedo $q(\lambda)$ океана минимально по отношению к $q(\lambda)$ других типов подстилающих поверхностей и имеет незначительный спектральный ход;

– концентрации частиц океанического аэрозоля соответствующих размеров минимальны по сравнению с концентрацией частиц континентального аэрозоля;
 – в рассматриваемой области широт ($0-30^\circ$ с. ш.) общее содержание озона в столбе атмосферы минимально.

Для тех длин волн, где отсутствует поглощение озоном и молекулярным кислородом (0,449; 0,483; 0,676; 0,758; 0,794; 0,823 мкм), модель \bar{b}_λ можно представить в виде

$$\bar{b}_\lambda = a/\lambda^4 + d/\lambda^2 + c, \quad (4)$$

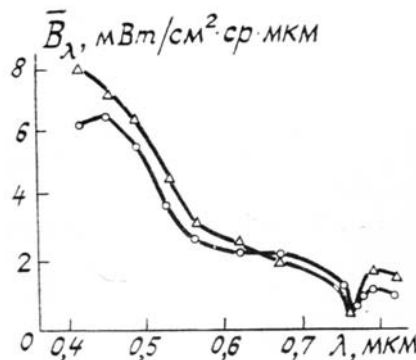
где a , d , c , κ – некоторые числовые параметры. Для малых значений величин $m_\odot < 2,5$ приближение однократного рассеяния в атмосфере над океаном является вполне приемлемым. В этом случае член a/λ^4 в уравнении (4) с определенной степенью точности характеризует молекулярное рассеяние света в атмосфере.

Параметр a определен нами по сопоставлению величин спектральных яркостей B_λ системы «океан–атмосфера», рассчитанных в [7] для чисто молекулярной атмосферы при $m_\odot \leq 2,5$ и альбедо подстилающей поверхности $q = 0$, со значениями $\bar{B}_{\lambda m} = aS_\lambda / \lambda^4(m_\odot + 1)$. Значение $a = 0,0063 \pm 0,0005$ и κ рассматривались в диапазоне $\kappa > 0,7$, так как при $\kappa \leq 0,7$ c становится отрицательной. Для различных значений κ в диапазоне $0,8 \leq \kappa \leq 1,4$ были рассчитаны параметры d и c по нелинейному методу наименьших квадратов, исходя из значений \bar{b}_λ , приведенных в табл. 2. Анализ результатов расчетов показал, что минимальная среднеквадратическая погрешность аппроксимации b_λ соотношением (4) наблюдается при $\kappa = 1$ и не превышает $\sim 3\%$. Значения параметров d и c в этом случае равны соответственно $0,054 \pm 0,001$ и $0,017 \pm 0,001$ для уровня значимости $\alpha = 0,1$. В области длин волн 0,415; 0,534; 0,569; 0,621; 0,761; 0,763; и 0,767 мкм при расчете по соотношениям (3) и (4) яркости \bar{B}_λ системы «океан–атмосфера» необходимо введение корректирующих коэффициентов – r_λ , значения которых даны в табл. 2.

Таким образом, в качестве статистически обоснованной модели зависимости яркости системы «океан–атмосфера» \bar{B}_λ над экваториальной Атлантикой от длины волны света и зенитного угла Солнца Z_\odot (или m_\odot) предлагается следующее соотношение:

$$\bar{B}_\lambda = \left[\left(\frac{0,0063}{\lambda^4} + \frac{0,054}{\lambda} + 0,017 \right) \cdot r_\lambda S_{\odot \lambda} \right] / (m_\odot + 1), \quad (5)$$

где \bar{B}_λ в мВт/ср · см² · мкм, а λ , в мкм.



Среднее спектральное распределение яркости системы «океан–атмосфера» ($m_\odot = 1,84$): \circ – результат расчета по (5) для Атлантического океана; Δ – результат статистической обработки экспериментальных данных по Тихому океану [8]

Данные, рассчитанные по (5) для $Z_\odot = 57^\circ$ ($m_\odot = 1,84$), были сопоставлены с результатами статистической обработки экспериментальных данных над Тихим океаном (64 реализации) [8]. На рисунке приведены результаты этого сравнения, которые показывают, что расхождения не превышают 18% в диапазоне $0,415 \leq \lambda \leq 0,676$ мкм. Такое согласие данных можно считать вполне удовлетворительным, учитывая, что они получены для различных регионов Мирового океана.

Приведенные в работе данные показали, что:

– над районами Атлантики $0-30^\circ$ с.ш. наблюдаются мало изменяющиеся в течение года средние значения спектральной яркости \bar{B}_λ ;

– величины \bar{B}_λ имеют четко выраженную зависимость от зенитного угла Солнца, аппроксимируемую соотношением (5);

– при зенитных углах $Z_0 < 20^\circ$ могут наблюдаться зеркальные блики (в зависимости от балла волнения океана). Таким образом, в области $Z_0 < 20^\circ$ выражение (5) дает только оценку величины \bar{B}_λ .

Предложенная в статье модель может быть рекомендована для использования при проверке работы спутниковой оптической аппаратуры над экваториальными районами Атлантики.

1. Беляев Б.И., Зайцева В.А. и др. //Тр. IX научных чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других советских ученых – пионеров освоения космического пространства. М.: ИИЕТ АН СССР, 1988. С. 70.
2. Радиационные характеристики атмосферы и земной поверхности /Под редакцией К.П. Кондратьева. Л.: Гидрометеониздат, 1969. 564 с.
3. Бадаев В.В., Малкевич М.С., Пизик Б., Циммерман Г. //Исследование Земли из космоса. 1985. № 5. С. 18.
4. Bichoff K., Gaetzke J. et al. //Acta Astronautica, 1983. V. 10. № 1. P. 31.
5. Налимов В.В. Применение математической статистики при анализе веществ. М.: Физматгиз, 1960. 430 с.
6. Neckel H., Labs D. //Solar Physics. 1984. V. 90. № 2. P. 246.
7. Coulson K. et al. //Tables Related to Radiation Emerging from a Planetary Atmosphere with Rayleigh Scattering. University of California Press. Berkley, 1960.
8. Ахмедов Ш.А. //Тр. IX научных чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других советских ученых – пионеров освоения космического пространства. М.: ИИЕТ АН СССР. 1988. С. 77.

Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова АН СССР,
Москва
Морской гидрофизический институт АН УССР,
Севастополь

Поступила в редакцию
12 июня 1989 г.

A.G. Laktionov, N.A. Lutseva, V.A. Mironenko, V.S. Suetin. The Model of Outgoing Short-Wave Radiation over the Atlantic Ocean using the «Intercosmos-21» Satellite Data.

Statistical treatment of spectral brightness, B_λ , measurements of the atmosphere–ocean system over the Atlantic Ocean (0–30°N) is performed. A statistically proved model of the B_λ dependence on the atmosphere optical mass m_\odot is suggested in the paper along with the spectral behavior of B_λ in the region 0,4 to 0,8 μm .