

Член-корреспондент АН СССР К. Я. КОНДРАТЬЕВ, О. И. СМОКТИЙ

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АЛЬБЕДО СИСТЕМЫ ПОВЕРХНОСТЬ ПЛАНЕТЫ — АТМОСФЕРА

Определение соотношения между альбедо системы поверхность планеты — атмосфера и альбедо поверхности важно для решения проблемы воздействия человека на климат. Аналогичная задача возникает также при интерпретации данных наблюдений на пилотируемых космических кораблях в интересах изучения свойств подстилающей поверхности по результатам измерений альбедо из космоса ⁽¹⁾. В обоих случаях необходимо построить передаточную функцию атмосферы, позволяющую определить связь между альбедо поверхности планеты и системы поверхность — атмосфера.

Представляет интерес теоретическое определение этой функции и строгая формулировка условий, при которых возможно ее нахождение по данным совмещенного самолетного и спутникового оптического экспериментов.

1. Постановка задачи. Предполагая постановку задачи об интерпретации данных спектрофотометрирования планет из космоса известной ⁽²⁾, обозначим через $I = I(\xi, \eta, \varphi, \tau_0)$ спектральную интенсивность солнечного излучения, отраженного планетой и измеренного за пределами ее атмосферы; остальные обозначения такие же, как в ⁽²⁾. Индекс длины волн λ для простоты записи будем опускать.

Плоское альбедо атмосферы ⁽³⁾

$$A_s(\xi, \tau_0) = \frac{1}{\pi S_\xi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^1 I(\eta, \xi, \varphi, \tau_0) \eta d\eta. \quad (1)$$

Определим передаточную функцию атмосферы $\Pi_A(\xi, \tau_0)$ для плоского альбедо при помощи соотношения

$$A = \Pi_A(\xi, \tau_0) A_s(\xi, \tau_0), \quad (2)$$

где A — альбедо подстилающей поверхности. Требуется оценить влияние атмосферы и вариации ее оптических параметров на величину передаточной функции Π_A .

2. Случай бесконечно протяженной однородной подстилающей поверхности. В этом случае интенсивность излучения, отраженного планетой, можно представить альтернативно следующим образом ⁽²⁾:

$$I(\xi, \eta, \varphi, \tau_0) = I_d(\xi, \eta, \varphi, \tau_0) + I_0(\xi, \tau_0) T(\eta, \tau_0), \quad (3)$$

$$I(\xi, \eta, \varphi, \tau_0) = I'_d(\xi, \eta, \varphi, \tau_0) + I_0(\xi, \tau_0) [T(\eta, \tau_0) + T_\sigma(\eta, \tau_0)], \quad (4)$$

$T(\eta, \tau_0)$ и $T_\sigma(\eta, \tau_0)$ — соответственно факторы пропускания прямого и диффузного излучения в направлении $\arg \cos \eta$.

Подставляя (3), (4) в (1), находим

$$A_s(\xi, \tau_0) = A_s^{\pi}(\xi, \tau_0) + AM(\xi, \tau_0), \quad (5)$$

$$A_s(\xi, \tau_0) = v(\xi, \tau_0) + A[M(\xi, \tau_0) + M_\sigma(\xi, \tau_0)]. \quad (6)$$

$$A_s^{\pi} = v(\xi, \tau_0) + AM_{\sigma}(\xi, \tau_0), \quad (7)$$

функции $M(\xi, \tau_0)$ и $M_{\sigma}(\xi, \tau_0)$ равны

$$M(\xi, \tau_0) = \frac{2\mu(\xi, \tau_0) E_3(\tau_0)}{1 - AC(\tau_0)}, \quad (8)$$

$$M_{\sigma}(\xi, \tau_0) = \frac{2\mu(\xi, \tau_0)}{1 - AC(\tau_0)} \int_0^1 T_{\sigma}(\eta, \tau_0) \eta d\eta, \quad (9)$$

где $E_n(x) = \int_1^{\infty} \exp(-xy) \frac{dy}{y^n}$ — интегральная показательная функция.

Функции $\mu(\xi, \tau_0)$, $v(\xi, \tau_0)$ и $C(\tau_0)$ определены в (3).

Складывая (8) и (9), находим

$$M(\xi, \tau_0) + M_{\sigma}(\xi, \tau_0) = \frac{\mu(\xi, \tau_0) D(\tau_0)}{1 - AC(\tau_0)}, \quad (10)$$

$$D(\tau_0) = 2 \int_0^1 \mu(\eta, \tau_0) \eta d\eta = 2 \left[E_3(\tau_0) + \int_0^1 T_{\sigma}(\eta, \tau_0) \eta d\eta \right]. \quad (11)$$

Подставим теперь (2) в (5) и (6). Тогда для передаточной функции Π_A находим

$$\Pi_A = \frac{A}{A_s^{\pi}(\xi, \tau_0) + AM(\xi, \tau_0)} = \frac{A}{v(\xi, \tau_0) + A[M(\xi, \tau_0) + M_{\sigma}(\xi, \tau_0)]}. \quad (12)$$

Согласно (7) — (11) и (12), получим

$$\Pi_A = \frac{A[1 - AC(\tau_0)]}{[1 - AC(\tau_0)]v(\xi, \tau_0) + AD(\tau_0)\mu(\xi, \tau_0)}. \quad (13)$$

3. Случай неоднородной подстилающей поверхности, образованной двумя однородными полуплоскостями с альbedo A_i , $i = 1, 2$. Как и в (2), выделим два предельных случая, представляющих практический интерес. При этом естественно предполагать атмосферу однородной в горизонтальном направлении.

Исследуем сначала области, далекие от границы раздела двух сред. Обозначив через $A_{s,i}(\xi, \tau_0)$ и A_i , $i = 1, 2$, соответственно их плоское альbedo на уровне верхней границы атмосферы и на уровне подстилающей поверхности, вместо (5), (6) получим

$$A_{s,i}(\xi, \tau_0) = A_{s,i}^{\pi}(\xi, \tau_0) + A_i M_i(\xi, \tau_0), \quad (14)$$

$$A_{s,i}(\xi, \tau_0) = v(\xi, \tau_0) + A_i [M_i(\xi, \tau_0) + M_{\sigma,i}(\xi, \tau_0)]. \quad (15)$$

Очевидно, что для альbedo атмосферных дымок $A_{s,i}^{\pi}$, функций M_i , $M_{\sigma,i}$ и передаточных функций $\Pi_A = A_i/A_{s,i}$ справедливы выражения (7) — (12), полученные в предыдущем разделе, но при условии замены в них величины A на A_i .

Рассмотрим теперь определение передаточных функций Π_{A_i} вблизи границы раздела двух сред. Здесь можно приближенно принять $A_{s,1}^{\pi} = A_{s,2}^{\pi} = A_s^{\pi}$, $M_1 = M_2 = M$; $M_{\sigma,1} + M_{\sigma,2} = \bar{M}_{\sigma}$, т. е. вместо (14), (15) имеем

$$A_{s,i}(\xi, \tau_0) = A_s^{\pi}(\xi, \tau_0) + A_i \bar{M}(\xi, \tau_0), \quad (16)$$

$$A_{s,i}(\xi, \tau_0) = v(\xi, \tau_0) + A_i \bar{M}(\xi, \tau_0) + \bar{A} \bar{M}_{\sigma}(\xi, \tau_0), \quad (17)$$

Таблица 1

θ_0	A	400 мμ	450 мμ	500 мμ	550 мμ	600 мμ	650 мμ	700 мμ	800 мμ	900 мμ	400 мμ	450 мμ	500 мμ	550 мμ
		Чисто рассеивающая молекулярная атмосфера									Молекулярная атмосфера при наличии озона (модель ^(*))			
0°	0,78 0,24 0,084	1,029 0,765 0,404	1,014 0,812 0,514	1,010 0,892 0,614	1,007 0,924 0,699	1,005 0,916 0,766	1,004 0,960 0,818	1,003 0,970 0,858	1,002 0,983 0,914	1,001 0,990 0,945	1,019 0,765 0,404	1,014 0,842 0,514	1,048 0,921 0,631	1,107 1,007 0,753
20°	0,78 0,24 0,084	1,016 0,749 0,389	1,012 0,828 0,498	1,009 0,881 0,598	1,005 0,916 0,684	1,005 0,940 0,753	1,004 0,956 0,807	1,003 0,967 0,849	1,002 0,981 0,908	1,001 0,988 0,941	1,016 0,749 0,389	1,012 0,828 0,498	1,047 0,910 0,614	1,108 1,000 0,738
50°	0,78 0,24 0,084	0,996 0,653 0,311	0,998 0,743 0,405	0,999 0,812 0,499	0,999 0,862 0,589	1,000 0,897 0,667	1,000 0,933 0,732	1,000 0,942 0,786	1,000 0,966 0,865	1,000 0,979 0,911	0,996 0,653 0,311	0,998 0,743 0,405	1,042 0,841 0,515	1,115 0,950 0,640
70°	0,78 0,24 0,084	0,955 0,515 0,219	0,969 0,601 0,293	0,977 0,680 0,357	0,984 0,749 0,436	0,988 0,804 0,514	0,991 0,847 0,587	0,994 0,880 0,654	0,996 0,927 0,766	0,998 0,953 0,839	0,955 0,515 0,219	0,968 0,601 0,283	1,030 0,710 0,369	1,133 0,844 0,482

(продолжение)

θ_0	A	600 мμ	650 мμ	700 мμ	800 мμ	900 мμ	400 мμ	450 мμ	500 мμ	550 мμ	600 мμ	650 мμ	700 мμ	800 мμ	900 мμ
		Молекулярная атмосфера при наличии озона (модель ^(*))					Молекулярная атмосфера при наличии аэрозоля и озона (модель ^(*))								
0°	0,78 0,24 0,084	1,152 1,074 0,858	1,069 1,020 0,864	1,027 0,993 0,877	1,084 0,995 0,924	1,008 0,990 0,945	1,095 0,727 0,339	1,076 0,792 0,405	1,116 0,856 0,468	1,175 0,926 0,528	1,220 0,980 0,580	1,120 0,940 0,581	1,073 0,919 0,590	1,056 0,924 0,611	1,050 0,922 0,629
20°	0,78 0,24 0,084	1,155 1,070 0,845	1,071 1,016 0,853	1,027 0,990 0,868	1,014 0,993 0,918	1,001 0,988 0,941	1,078 0,701 0,323	1,071 0,768 0,385	1,112 0,833 0,445	1,173 0,903 0,506	1,218 0,960 0,556	1,118 0,920 0,557	1,070 0,902 0,565	1,054 0,908 0,590	1,038 0,908 0,607
50°	0,78 0,24 0,084	1,172 1,038 0,757	1,077 0,990 0,779	1,029 0,968 0,805	1,014 0,979 0,876	1,000 0,979 0,911	1,096 0,582 0,245	1,037 0,643 0,293	1,075 0,706 0,339	1,154 0,777 0,385	1,198 0,834 0,428	1,114 0,805 0,431	1,055 0,792 0,440	1,039 0,806 0,462	1,034 0,810 0,479
70°	0,78 0,24 0,084	1,218 0,966 0,599	1,095 0,926 0,635	1,032 0,912 0,675	1,016 0,944 0,778	0,998 0,953 0,839	0,970 0,449 0,176	0,979 0,491 0,201	1,035 0,655 0,229	1,117 0,602 0,259	1,175 0,633 0,287	1,074 0,633 0,288	1,031 0,625 0,291	1,016 0,639 0,309	0,991 0,646 0,321

где альbedo дымки $\bar{A}_s^A$ и функции $\bar{M}$ и $\bar{M}_\sigma$ определяются при среднем альbedo подстилающей поверхности $\bar{A} = 1/2 (A_1 + A_2)$.

Таким образом, указанные величины находятся по формулам (7) — (10) при замене в них альbedo A на $\bar{A}$. Легко показать, что в данном случае для передаточных функций $\bar{P}_{A_i}(\xi, \tau_0)$ справедлива формула

$$\bar{P}_{A_i}(\xi, \tau_0) = A_i [1 - \bar{A}C(\tau_0)] / [1 - \bar{A}C(\tau_0)] v(\xi, \tau_0) + 2\mu(\xi, \tau_0) \left[A_i E_3(\tau_0) + \bar{A} \int_0^1 T(\eta) \eta d\eta \right]. \quad (18)$$

4. Результаты численных расчетов. В табл. 1 (случай однородной подстилающей поверхности) представлены значения спектральных передаточных функций для трех моделей атмосферы и трех значений интегрального альbedo подстилающей поверхности $A = 0,78$ (снег); $0,24$ (песок); $0,084$ (зеленые растения). При расчете функций $s(\tau_0)$, $P(\tau_0)$, $\mu(\xi\tau_0)$ и $v(\xi, \tau_0)$ рассеяние первого порядка точно учитывалось при индикатрисе рассеяния ⁽⁴⁾, а рассеяние высших порядков приближенно ⁽⁴⁾.

5. Определение передаточной функции для плоского альbedo из эксперимента. Приближенное рассмотрение задачи об определении альbedo атмосферной дымки $\bar{A}_s^A$ и передаточной функции $\bar{P}_A$ из эксперимента проведено в ⁽¹⁾. Ниже эта задача рассмотрена строго на примере съемки из космоса и с самолета подстилающей поверхности, образованной двумя однородными полуплоскостями с альbedo A_i .

Предположим, что при помощи совмещенного самолетного и спутникового эксперимента определены значения альbedo двух сред на уровне верхней границы атмосферы $A_{s,i}$ и подстилающей поверхности A_i . Если измерения альbedo проводятся вблизи от границы раздела сред, где $A_{s,1}^n = A_{s,2}^n = \bar{A}_s^n$, то, используя систему линейных алгебраических уравнений (16) или (17), легко найти неизвестные функции $\bar{A}_s^n$, v , M и M_σ , а затем по формуле (18) определить передаточную функцию Π_{A_i} . Решая, например, систему (16), находим

$$\bar{A}_s^n = \frac{A_1 A_{s,2} - A_2 A_{s,1}}{A_1 - A_2}; \quad (19)$$

$$\bar{M} = \frac{A_{s,1} - A_{s,2}}{A_1 - A_2}; \quad (20)$$

$$\Pi_{A_i} = \frac{A_i (A_1 - A_2)}{A_1 A_{s,2} - A_2 A_{s,1} + A_i (A_{s,1} - A_{s,2})}. \quad (24)$$

Если съемка проводится вдали от границы раздела двух сред, то нахождение передаточной функции в этом случае строго сводится к предыдущему при условии горизонтальной однородности атмосферы. Для этого необходимо использовать представление $A_{s,i}(\xi, \tau_0)$ только в виде (15), поскольку в отличие от (14) система линейных алгебраических уравнений (15) является определенной. Решение этой системы относительно неизвестных функций $v(\xi, \tau_0)$ и $[M_i(\xi, \tau_0) + M_{\sigma,i}(\xi, \tau_0)]$ формально имеет вид (19) и (20). Передаточная функция находится по формуле (24). Следует, однако, подчеркнуть, что, в отличие от предыдущего эксперимента, в рассматриваемом случае определяется альbedo дымки (без учета «подсветки» от подстилающей поверхности), которая может существенно отличаться от альbedo реальной атмосферной дымки. В дальнейшем предполагается провести сравнение экспериментальных значений альbedo среды с теоретическими, рассчитанными для разных оптических моделей атмосферы и условий совмещенного космического эксперимента.

В заключение авторы выражают благодарность И. Н. Минину за полезные обсуждения и В. П. Булычеву за помощь в проведении расчетов.

Ленинградский государственный университет
им. А. А. Жданова

Поступило
18 II 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ К. Я. Кондратьев и др., Проблемы физики атмосферы, в. 10 (1972).
² К. Я. Кондратьев, О. И. Смоктий, ДАН, 206, № 5 (1972). ³ В. В. Соболев, Перенос лучистой энергии в атмосферах звезд и планет, М., 1956. ⁴ Э. Г. Яновский, Сборн. Физика Луны и планет, Киев, 1964. ⁵ L. Elterman, UV, Visible and IR Attenuation for Altitudes to 50 Km, 1968, AFCRL — 68—0153, Environmental Res. Papers, № 285, April 1968.