

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

**О ВЛИЯНИИ АТМОСФЕРНОЙ ДЫМКИ НА ЦВЕТ
ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ, НАБЛЮДАЕМОЙ
С ПИЛОТИРУЕМОГО КОСМИЧЕСКОГО КОРАБЛЯ**

При спектрофотометрировании поверхность планеты, проводимой из космоса в интересах изучения геолого-географических образований, определенное значение может иметь колориметрический анализ экспериментальных спектральных данных. Поскольку между оптическим прибором, установленным на космическом корабле, и поверхностью планеты всегда будет находиться рассеивающий и поглощающий слой атмосферы, необходимо оценить влияние, которое атмосферная дымка оказывает на цвет спектрофотометрируемых природных образований. Интересно также построить передаточную функцию атмосферы, позволяющую по цветовым тонам наземных объектов, наблюдаемых с пилотируемых космических кораблей, определить их колориметрические характеристики на уровне подстилающей поверхности.

В настоящей работе продолжено изучение передаточной функции атмосферы, начатое в ^(1, 2). Построена передаточная функция атмосферы для колориметрических характеристик поверхности планеты. Приведены результаты соответствующих расчетов, выполненных для различных оптических моделей атмосферы Земли.

1. Постановка задачи. Используем обозначения, принятые в ^(1, 2). Кроме того, обозначим интенсивность излучения, отраженного планетой и измеренного за пределами ее атмосферы, через $I(\lambda, \eta, \xi, \varphi, \tau_0)$ или просто I .

Для получения полных количественных и качественных характеристик цвета объекта необходимо иметь еще два числовых параметра: цветовой тон, характеризуемый длиной волны λ , и насыщенность цвета p . На практике для нахождения цветового тона и насыщенности цвета пользуются относительными коэффициентами цветности $X(\eta, \xi, \varphi, \tau_0)$, $Y(\eta, \xi, \varphi, \tau_0)$, $Z(\eta, \xi, \varphi, \tau_0)$, определяемыми при помощи соотношений ⁽³⁾

$$X = \frac{\int I(\lambda, \eta, \xi, \varphi) \bar{x}(\lambda) d\lambda}{\int I(\lambda, \eta, \xi, \varphi) [\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)] d\lambda}, \quad (1)$$

$$Y = \frac{\int I(\lambda, \eta, \xi, \varphi) \bar{y}(\lambda) d\lambda}{\int I(\lambda, \eta, \xi, \varphi) [\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)] d\lambda}, \quad (2)$$

$$Z = \frac{\int I(\lambda, \eta, \xi, \varphi) \bar{z}(\lambda) d\lambda}{\int I(\lambda, \eta, \xi, \varphi) [\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)] d\lambda}, \quad (3)$$

где $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$ — стандартные колориметрические функции, таблированные в ⁽³⁾ для средних спектральных характеристик человеческого глаза; интегрирование в (1) — (3) и всюду далее ведется по данному спектральному интервалу $\Delta\lambda$.

Определим колориметрические передаточные функции атмосферы Π_X , Π_Y и Π_Z для коэффициентов цветности X , Y и Z следующим образом:

$$X_o = \Pi_X X, \quad Y_o = \Pi_Y Y, \quad Z_o = \Pi_Z Z, \quad (4)$$

где X_o , Y_o и Z_o — коэффициенты цветности среды на уровне подстилающей поверхности. Получим теперь выражения для функций Π_X , Π_Y и Π_Z , представляющие интерес при колориметрическом анализе экспериментальных спектральных данных (⁴, ⁵), а также при интерпретации данных визуальных наблюдений космонавтов (⁶).

2. Бесконечно-протяженная однородная подстилающая поверхность. В этом случае яркость среды $I(\lambda, \eta, \xi, \varphi, \tau_o)$, измеренную за пределами атмосферы, можно представить в виде

$$I(\lambda, \eta, \xi, \varphi, \tau_o) = I_d(\lambda, \eta, \xi, \varphi, \tau_o) + I_o(\lambda, \xi, \tau_o) T(\lambda, \eta, \tau_o). \quad (5)$$

Согласно (¹), для яркостей дымки I_d и среды I_o справедливы выражения

$$I_d = S(\lambda) \xi \left\{ \rho(\lambda, \eta, \xi, \varphi, \tau_o, \lambda) + \frac{A(\lambda) \mu(\xi, \tau_o, \lambda)}{1 - A(\lambda) C(\lambda, \tau_o)} \times \right. \\ \left. \times \left[\mu(\eta, \tau_o, \lambda) - \exp\left(-\frac{\tau_o(\lambda)}{\eta}\right) \right] \right\}, \quad (6)$$

$$I_o = S(\lambda) \xi \frac{A(\lambda) \mu(\xi, \tau_o, \lambda)}{1 - A(\lambda) C(\lambda, \tau_o)}, \quad (7)$$

где $A(\lambda)$ — спектральное альbedo подстилающей поверхности, $C(\lambda, \tau_o)$ — сферическое альbedo атмосферы при $A = 0$; $\rho = \rho(\eta, \xi, \varphi, \tau_o, \lambda)$ — коэффициент отражения атмосферы при $A = 0$; функция $\mu = \mu(\xi, \tau_o, \lambda)$ связана простым соотношением с коэффициентом пропускания атмосферы $\sigma(\lambda, \eta, \xi, \varphi, \tau_o)$ при $A = 0$ и определена в (⁶).

Подставляя (7) в (1) — (3), получаем следующие соотношения для коэффициентов цветности X , Y и Z :

$$X = X_d P_d + X_o P_o, \quad (8)$$

$$Y = Y_d P_d + Y_o P_o, \quad (9)$$

$$Z = Z_d P_d + Z_o P_o, \quad (10)$$

где

$$P_d = P_d(\eta, \xi, \tau_o) = \frac{\int I_d [\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)] d\lambda}{\int I [\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)] d\lambda}, \quad (11)$$

$$P_o = P_o(\eta, \xi, \varphi, \tau_o) = \frac{\int [\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)] d\lambda}{\int I [\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)] d\lambda}. \quad (12)$$

Коэффициенты цветности X_d , Y_d , Z_d и X_o , Y_o , Z_o находятся по формулам (1) — (3), в которых вместо яркости $I(\lambda)$ подставляются соответственно $I_d(\lambda)$ и $I_o(\lambda)$.

Подставляя (8) — (10) в (1) — (3), получаем

$$\Pi_X = \frac{X_o}{X_d P_d + X_o P_o}, \quad \Pi_Y = \frac{Y_o}{Y_d P_d + Y_o P_o}, \quad \Pi_Z = \frac{Z_o}{Z_d P_d + Z_o P_o}. \quad (13)$$

3. Неоднородная подстилающая поверхность, образованная двумя однородными полуплоскостями с альbedo $A_i(\lambda)$, $i = 1, 2$. Аналогично (¹, ²) выделим два предельных случая, представляющих практический интерес.

Если определяются колориметрические характеристики однородных областей, удаленных на достаточно большое расстояние от границы раздела двух сред, то для этого необходимо использовать формулы (8) — (13) при замене в (6), (7) величины альбеда $A(\lambda)$ на $A_i(\lambda)$.

Случай визирования границы раздела двух сред требует специального теоретического исследования. Однако, согласно (1), можно приближенно считать, предполагая атмосферу однородной в горизонтальном направлении, что яркость дымки I_d по обе стороны от границы раздела одинакова и определяется по формуле (7) при среднем альбеде $\bar{A} = 1/2(A_1 + A_2)$. Таким образом, согласно (1), вместо (6), (7) имеем

$$I_i = \bar{I}_d + I_{o,i}(\lambda, \xi, \tau_o) T(\lambda, \eta, \tau_o), \quad (14)$$

$$\bar{I}_d = S(\lambda) \xi \left\{ \rho(\lambda) + \frac{\bar{A}(\lambda) \mu(\xi, \tau_o, \lambda)}{1 - \bar{A}(\lambda) C(\tau_o, \lambda)} \left[\mu - \exp\left(-\frac{\tau_o(\lambda)}{\eta}\right) \right] \right\}, \quad (15)$$

$$I_{o,i} = A_i(\lambda) S(\lambda) \xi \mu(\xi, \tau_o, \lambda) \frac{1}{1 - \bar{A}(\lambda) C(\tau_o, \lambda)}. \quad (16)$$

Учитывая соотношения (14) — (16), вместо (13) имеем

$$\begin{aligned} \Pi_{X,i} &= \frac{X_{o,i}}{\bar{X}_d \bar{P}_{d,i} + X_{o,i} P_{o,i}}, & \Pi_{Y,i} &= \frac{Y_{o,i}}{\bar{Y}_d \bar{P}_{d,i} + Y_{o,i} P_{o,i}}, \\ \Pi_{Z,i} &= \frac{Z_{o,i}}{\bar{Z}_d \bar{P}_{d,i} + Z_{o,i} P_{o,i}}, \end{aligned} \quad (17)$$

где коэффициенты $X_{o,i}$, $Y_{o,i}$, $Z_{o,i}$; \bar{X}_d , \bar{Y}_d , \bar{Z}_d и $\bar{P}_{d,i}$, $P_{o,i}$ определяются из (11), (12) при использовании соответствующих функций $I_{o,i}$, \bar{I}_d и I_i .

4. Результаты численных расчетов передаточных функций Π_X и Π_Y . Для численных иллюстраций полученных выше выражений по формулам (8), (9), (14) — (16) были проведены расчеты передаточных функций Π_X и Π_Y (случай однородной подстилающей поверхности) при $\eta = 1$ и $A(\lambda) = 0,78; 0,24; 0,084$ — средние спектральные альбедо (в видимой области спектра) снега, песка и зеленых растений соответ-

Таблица 1

°	A	I		II (*)		III (*)	
		Π_X	Π_Y	Π_X	Π_Y	Π_X	Π_Y
0°	0,78	0,999	0,999	1,008	1,011	1,008	1,011
	0,24	1,038	1,048	1,047	1,061	1,045	1,056
	0,084	1,111	1,142	1,120	1,156	1,090	1,111
20°	0,78	0,999	0,999	1,008	1,011	1,008	1,011
	0,24	1,039	1,049	1,048	1,062	1,046	1,057
	0,084	1,113	1,144	1,121	1,158	1,091	1,113
40°	0,78	1,000	1,000	1,009	1,012	1,010	1,014
	0,24	1,042	1,053	1,051	1,066	1,050	1,062
	0,084	1,118	1,151	1,127	1,165	1,097	1,120
60°	0,78	1,004	1,006	1,013	1,018	1,014	1,019
	0,24	1,055	1,069	1,063	1,083	1,061	1,075
	0,084	1,141	1,179	1,149	1,193	1,111	1,133
80°	0,78	1,029	1,032	1,038	1,044	1,021	1,024
	0,24	1,112	1,129	1,118	1,142	1,066	1,074
	0,084	1,216	1,250	1,215	1,260	1,095	1,107

Примечание. I — чисто рассеивающая атмосфера, II — молекулярная атмосфера при наличии озона (модель*), III — молекулярная атмосфера при наличии аэрозоля и озона (модель*).

ственно. Оптические модели атмосферы и численная схема расчета вспомогательных функций взяты такими же, как и в (1) (табл. 1).

Авторы выражают благодарность В. Л. Булычеву за помощь в проведении расчетов.

Ленинградский государственный университет
им. А. А. Жданова

Поступило
18 II 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ К. Я. Кондратьев, О. И. Смоктий, ДАН, 206, № 5 (1972). ² К. Я. Кондратьев, О. И. Смоктий, ДАН, 206, № 6 (1972). ³ М. М. Гуревич, Цвет и его измерение, Изд. АН СССР, 1950. ⁴ К. Я. Кондратьев, А. А. Бузников и др., ДАН, 195, № 5 (1970). ⁵ К. Я. Кондратьев, А. А. Бузников и др., Проблемы физики атмосферы, в. 10 (1972). ⁶ В. В. Соболев, Перенос лучистой энергии в атмосферах звезд и планет, М., 1956. ⁷ К. Я. Кондратьев, А. А. Бузников и др., ДАН, 197, № 3 (1971). ⁸ L. Elterman, UV, Visible and IR Attenuation for Altitudes to 50 km. 1968. AFCRL-68-0153, Environmental Res. Papers № 285, April, 1968.