

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

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ПРИ СПЕКТРОФОТОМЕТРИРОВАНИИ ИЗ КОСМОСА ПРИРОДНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ПЛАНЕТЫ

Считая постановку задачи о спектрофотометрировании поверхности планеты из космоса известной ^(1, 2), обозначим через $I_{\parallel}(0, \eta, \xi, \varphi, \tau_0)$ и $I_{\perp}(0, \eta, \xi, \varphi, \tau_0)$ компоненты спектральной яркости среды I , равной сумме $I_{\parallel}$ и $I_{\perp}$, измеренные с космического корабля соответственно в плоскостях, параллельной и перпендикулярной плоскости рассеяния. За основную плоскость рассеяния выберем плоскость рассеяния для однократно рассеянного света. Переменные η, ξ, φ и τ_0 определены в ⁽¹⁾. Индекс длины λ для простоты будем опускать.

Первоначально предположим, что среда ограничена снизу бесконечно протяженной однородной поверхностью с коэффициентом отражения $r(\eta, \xi, \varphi) = r_{\parallel}(\eta, \xi, \varphi) + r_{\perp}(\eta, \xi, \varphi)$, где $r_{\parallel}$ и $r_{\perp}$ — компоненты, измеренные соответственно в плоскостях, параллельной и перпендикулярной основной плоскости рассеяния.

Будем считать, что поляризация излучения происходит только при однократном акте рассеяния в атмосфере, а также при отражении от подстилающей поверхности. При этом вторичной поляризацией отраженного излучения на пути от подстилающей поверхности до уровня верхней границы атмосферы пренебрегаем. Плоскости рассеяния для излучения, отраженного от подстилающей поверхности и рассеянного в атмосфере, считаются совпадающими.

Определим поляризационную передаточную функцию $\mathcal{P}$ для яркости системы поверхность планеты — атмосфера при помощи соотношения

$$P_0(\gamma, \tau_0) = \mathcal{P}(\gamma, \tau_0) P(\gamma, \tau_0), \quad (1)$$

где $P(\gamma, \tau_0)$ и $P_0(\gamma, \tau_0)$ — степени линейной поляризации излучения среды соответственно на уровне верхней границы атмосферы и на уровне подстилающей поверхности.

Бесконечно протяженная однородная поверхность с коэффициентом $r = r_{\parallel} + r_{\perp}$. В рассматриваемом случае при сделанных выше допущениях для компонент $I_{\parallel}$ и $I_{\perp}$ получаем представление

$$I_{\parallel}(0, \eta, \xi, \varphi, \tau_0) = I'_{\parallel, \parallel}(\eta, \xi, \varphi, \tau_0) + I_{0, \parallel}(\eta, \xi, \varphi, \tau_0) \mu(\eta, \tau_0), \quad (2)$$

$$I_{\perp}(0, \eta, \xi, \varphi, \tau_0) = I'_{\parallel, \perp}(\eta, \xi, \varphi, \tau_0) + I_{0, \perp}(\eta, \xi, \varphi, \tau_0) \mu(\eta, \tau_0), \quad (3)$$

где функция $\mu(\eta, \tau_0)$ определена в ⁽¹⁾, $I_{0, \parallel}$ и $I_{0, \perp}$ — компоненты яркости подстилающей поверхности $I_0 = I_{0, \parallel} + I_{0, \perp}$ соответственно в плоскостях параллельной и перпендикулярной основной плоскости рассеяния, а $I'_{\parallel, \parallel}$ и $I'_{\parallel, \perp}$ — аналогичные компоненты для яркости атмосферной дымки $I'_{\parallel} = I'_{\parallel, \parallel} + I'_{\parallel, \perp}$ (в отсутствие отражения от подстилающей поверхности).

Яркости $I_{\parallel, \parallel}$ и $I_{\parallel, \perp}$ находятся по формулам

$$I'_{\parallel, \parallel} = \frac{Sa}{4(\eta + \xi)} \left[1 - \exp \left[-\tau_0 \left(\frac{1}{\eta} + \frac{1}{\xi} \right) \right] \right] x_{\parallel}(\gamma) + \Delta I'_{\parallel, \parallel}(\eta, \xi, \varphi, \tau_0), \quad (4)$$

$$I'_{\parallel, \perp} = \frac{Sa}{4(\eta + \xi)} \left[1 - \exp \left[-\tau_0 \left(\frac{1}{\eta} + \frac{1}{\xi} \right) \right] \right] x_{\perp}(\gamma) + \Delta I'_{\parallel, \perp}(\eta, \xi, \varphi, \tau_0), \quad (5)$$

где a — вероятность выживания кванта при элементарном акте рассеяния; πS — освещенность площадки, перпендикулярной солнечному излучению на уровне верхней границы атмосферы (падающий свет предполагается неполяризованным), $\Delta I'_{\parallel, \perp} = \Delta I'_{\parallel} = \Delta I'_{\perp}$ — неполяризованная добавка, обусловленная многократным рассеянием света в атмосфере. Поляризационные компоненты $x_{\parallel}$ и $x_{\perp}$ атмосферной индикатрисы рассеяния $x(\gamma) = x_{\parallel}(\gamma) + x_{\perp}(\gamma)$ очевидным образом выражаются через функции p_1 и p_2 —

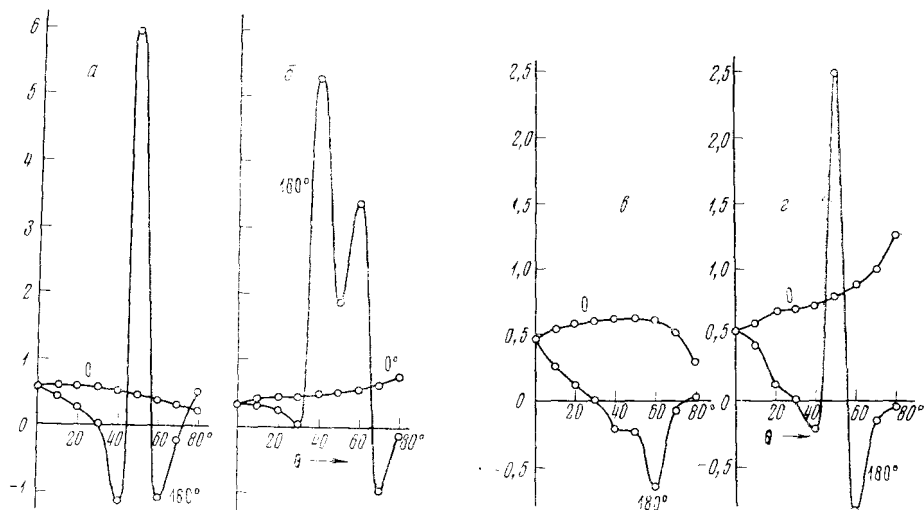


Рис. 1. Поляризационная передаточная функция $\mathcal{P}(\gamma, \tau_0)$ для двух длин волн: а, б — $\lambda = 4920 \text{ \AA}$, в, г — $\lambda = 6430 \text{ \AA}$; а, в — д-рн, б, г — песок. Цифры у кривых — значения азимута φ

элементы фазовой матрицы рассеяния $\mathbf{P}(\gamma, \tau_0)$, определенной в (3) для сферических полидисперсных частиц.

Используя (2)–(5), получаем основную формулу для степени поляризации $P(\gamma, \tau_0)$ на уровне верхней границы плоского слоя с отражающим дном:

$$P(\gamma, \tau_0) = P_d(\tau_0\gamma) [1 - \mu(\eta, \tau_0)\Pi(\eta, \xi, \varphi, \tau_0)] + P_0(\gamma, \tau_0)\mu(\eta, \tau_0)\Pi(\eta, \xi, \varphi, \tau_0), \quad (6)$$

где скалярная передаточная функция Π определена в (1, 2), а P_d — степень линейной поляризации атмосферной дымки (при отсутствии отражающей поверхности). Если считать, что планетная атмосфера состоит из молекул и аэрозоля, произвольным образом перемешанных в среде, тогда для P_d имеем

$$P_d(\gamma, \tau_0) = \frac{[3/4\delta \sin^2 \gamma + 1/2(1 - \delta)(p_{2, \text{аэр}} - p_{1, \text{аэр}})]a}{4(\eta + \xi)I'_d(\eta, \xi, \varphi, \tau_0)} \times \left\{ 1 - \exp \left[-\tau_0 \left(\frac{1}{\eta} + \frac{1}{\xi} \right) \right] \right\}, \quad (7)$$

где

$$I'_d = \left[3/4\delta(1 + \cos^2 \gamma) + (1 - \delta) \frac{p_{2, \text{аэр}} + p_{1, \text{аэр}}}{2} \right] \frac{a \{ 1 - \exp [-\tau_0(1/\eta + 1/\xi)] \}}{4(\eta + \xi)}, \quad (8)$$

$$a = \frac{\tau_{\text{мол}} + \tau_{\text{аэр}}}{\tau_{\text{мол}} + \tau_{\text{аэр}} + \tau_*} \quad (9)$$

и τ_* — оптическая толщина атмосферы, обусловленная истинным поглощением излучения в среде; δ — доля молекулярного рассеяния $p_{1, \text{аэр}}$ и $p_{2, \text{аэр}}$ —

компоненты аэрозольной фазовой матрицы, вычисляемые по теории Ми для данного показателя преломления и функции распределения частиц по размерам.

Соотношение (6) является обобщением формулы, полученной И. Н. Мининим при изучении поляризации Марса ⁽⁴⁾. При $\tau_0 = \infty$ из (6) следует формула, выведенная ранее В. В. Соболевым для степени поляризации атмосферы Венеры ⁽⁵⁾.

Подставляя (6) в (1), получаем для поляризационной передаточной функции $\mathcal{P}(\gamma, \tau_0)$ соотношение

$$\mathcal{P}(\gamma, \tau_0) = \frac{P_0(\gamma, \tau_0)}{P_d(\gamma, \tau_0) [1 - \mu(\eta, \tau_0) \Pi(\eta, \xi, \varphi, \tau_0)] + P_0(\gamma, \tau_0) \mu(\eta, \tau_0) \Pi(\eta, \xi, \varphi, \tau_0)}. \quad (10)$$

Зная функции $\mathcal{P}$ и P , легко найти функцию P_d :

$$P_d = \frac{P(\gamma, \tau_0) [1 - \mu(\eta, \tau_0) \mathcal{P}(\gamma, \tau_0) \Pi(\eta, \xi, \varphi, \tau_0)]}{1 - \mu(\eta, \tau_0) \Pi(\eta, \xi, \varphi, \tau_0)}. \quad (11)$$

На рис. 1 представлены результаты расчета поляризационной передаточной функции $\mathcal{P}(\gamma, \tau_0)$, проведенного по формуле (10) для подстилающей поверхности двух типов (песок и дерн) и модели атмосферы, однородной в горизонтальном направлении ⁽⁷⁾. Зенитное расстояние Солнца $\theta_0 = \arcsin \cos \xi = 53^\circ$, угол $\theta = \arcsin \cos \eta$ изменялся в интервале $0-90^\circ$. Оптические характеристики указанных подстилающих поверхностей (альbedo A , P_0) и их зависимости от углов θ_0 , θ и φ для $\lambda = 4920$ и $6430 \text{ \AA}$ взяты из работы ⁽⁶⁾. При расчете значений $\mathcal{P}(\gamma, \tau_0)$ использовались скалярная передаточная функция $\Pi(\eta, \xi, \varphi, \tau_0)$ и функциям $\mu(\eta, \tau_0)$, вычисленные для $x(\gamma) = 1 + x_1 \cos \gamma$ ^(1, 2). Аэрозольная фазовая матрица $P_{\text{аэр}}(\gamma, \tau_0)$, рассчитанная по теории Ми для показателя преломления $m = 1,56$ и обобщенного гамма-распределения частиц по размерам, взята из ⁽³⁾, табл. Т.102.

Подстилающая поверхность, образованная из двух однородных полуплоскостей с коэффициентами отражения r_i , $i = 1, 2$. Этот случай не является стандартным и требует специального теоретического исследования. Однако, если предположить, что по своим оптическим свойствам атмосфера однородна в горизонтальном направлении, то аналогично ⁽¹⁾ можно выделить два предельных случая, допускающих приближенное рассмотрение.

Если поляризационные измерения яркости подстилающей поверхности проводятся с космического корабля вдали от границы раздела двух сред (на расстоянии, превышающем высоту однородной атмосферы), то этот случай сводится к рассмотренному выше (см. формулы (6) — (11)).

Если поляризационные измерения яркости подстилающей поверхности планеты проводятся вблизи границы двух сред, можно приближенно считать, что степень поляризации $P_i(\gamma, \tau_0)$, $i = 1, 2$, определяется соотношением

$$P_i(\gamma, \tau_0) = \bar{P}_d(\gamma, \tau_0) [1 - \mu(\eta, \tau_0) \bar{\Pi}_i(\eta, \xi, \varphi, \tau_0)] + \bar{P}_0(\gamma, \tau_0) \mu(\eta, \tau_0) \bar{\Pi}_i(\eta, \xi, \varphi, \tau_0), \quad (12)$$

где для данного случая функция $\bar{\Pi}_i$ определена в ^(1, 2), а степени поляризации $\bar{P}_0(\gamma, \tau_0)$ и $\bar{P}_d(\gamma, \tau_0)$ находятся при среднем коэффициенте отражения $\bar{r} = 1/2(r_1 + r_2)$.

В этом случае для передаточной функции $\mathcal{P}_i$ и степени поляризации дымки $\bar{P}_d$ справедливы выражения

$$\mathcal{P}_i = \frac{\bar{P}_0}{\bar{P}_d(1 - \mu\bar{\Pi}_i) + \bar{P}_0\mu\bar{\Pi}_i}, \quad (13)$$

$$\bar{P}_d = \frac{P_i(1 - \mu\mathcal{P}_i\bar{\Pi}_i)}{1 - \mu\bar{\Pi}_i}. \quad (14)$$

Определение передаточной функции $\mathcal{P}_i$, $i = 1, 2$, и ее составляющих из эксперимента. Аналогично ^(1, 2) передаточная функция $\mathcal{P}_i$ и ее составляющая $P_{d,i}$ могут быть определены из совмещенного спутникового и самолетного экспериментов по измерению степеней поляризации P_i и $P_{0,i}$ вдали или вблизи от границы раздела двух сред с существенно разными отражательными (поляризационными) характеристиками подстилающей поверхности. Рассмотрим сначала случай вдали от границы раздела двух сред.

Предположим, что экспериментально определена прозрачность атмосферы $\exp(-\tau_0/\eta)$, функция $\mu(\eta, \tau_0)$ и передаточная функция $\Pi_i(\eta, \xi, \varphi, \tau_0)$ по схеме, описанной в ⁽¹⁾. Кроме того, измерена степень поляризации P_i со спутника, а $P_{0,i}$ — с низко летящего самолета-лаборатории. Тогда имеем ($i = 1, 2$)

$$\mathcal{P}_{i, \text{эксп}} = \frac{P_{0,i}^{\text{эксп}}}{P_{i, \text{эксп}}}, \quad P_{d,i} = \frac{P_{i, \text{эксп}} [1 - \mu\mathcal{P}_{i, \text{эксп}} \Pi_i]}{1 - \mu\bar{\Pi}_i}, \quad (15)$$

Когда эксперимент проводится вблизи границы раздела двух сред, то определение поляризационной передаточной функции $\mathcal{P}_i$ и ее составляющей $P_{d,i}$ выполняется по формулам (15), но с особенностями нахождения функций $P_{0,i}$, $P_{d,i}$ и Π_i , характерными для этого случая ⁽¹⁾. Несомненно, функцию $\mathcal{P}_i$ лучше находить из эксперимента первого типа, если считать, что атмосфера по своим оптическим (поляризационным) свойствам однородна в горизонтальном направлении.

При помощи передаточной функции $\mathcal{P}$ на основе сопоставления данных космического эксперимента и соответствующих вычислений по теории Ми можно решать некоторые обратные задачи атмосферной оптики. Для этого служит формула

$$P_{d, \text{эксп}} = \frac{[3/2 \delta \sin^2 \gamma + 1/2 (1 - \delta) (p_{2, \text{аэр}} - p_{1, \text{аэр}})] a \{1 - \exp[-\tau_0 (1/\eta + 1/\xi)]\}}{4 (\eta + \xi) I'_{d, \text{эксп}}(\eta, \xi, \varphi, \tau_0)}, \quad (16)$$

где функции $P_{d, \text{эксп}}$ и $I'_{d, \text{эксп}}$ определяются из эксперимента, а $p_{1, \text{аэр}}$ и $p_{2, \text{аэр}}$ вычисляются по теории Ми для заданной оптической модели атмосферного полидисперсного аэрозоля. Применение соотношения (16) для атмосферы Венеры ($\tau_0 = \infty$) дано В. В. Соболевым в ⁽³⁾.

Авторы выражают благодарность К. Л. Коулсону и И. Н. Минину за полезные обсуждения данной работы.

Ленинградский государственный университет
им. А. А. Жданова

Поступило
17 VIII 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ К. Я. Кондратьев, О. И. Смоктий, ДАН, 206, №№ 5 и 6 (1972). ² К. Я. Кондратьев, О. И. Смоктий, Тр. Гл. геофиз. обсерв., в. 295 (1973). ³ Д. Дейрменджан, Рассеяние света сферическими полидисперсными частицами, М., 1971. ⁴ И. Н. Минин, Астрон. журн., 44, в. 6 (1967). ⁵ В. В. Соболев, Астрон. журн., 45, в. 1 (1968). ⁶ K. L. Coulson, E. L. Gray, G. M. Bouricius, A Study of the Reflection and Polarization Characteristics of Selected Natural and Artificial Surface. Rep. R65-SD, Philadelphia, 1965. ⁷ L. Elterman, UV, Visible and IR Attenuation for Altitudes to 50 km, AFCRL-68-0153, Environmental Res. Papers № 285, April, 1968.