

Н. Б. ДИВАРИ, Ю. И. ЗАГИНАЙЛО

ИНДИКАТРИСЫ РАССЕЯНИЯ АТМОСФЕРНОЙ ПЫЛИ, ОПРЕДЕЛЕННЫЕ ПО ЯРКОСТЯМ СУМЕРЕЧНОГО НЕБА В ВЕРТИКАЛЕ СОЛНЦА

(Представлено академиком В. Г. Фесенковым 16 XI 1970)

Для определения индикатрисы рассеяния верхней атмосферы нами были использованы измерения яркости сумеречного неба в вертикале Солнца. Наблюдения производились на астрономической станции Одесской астрономической обсерватории в с. Маяки вблизи Одессы в сентябре — октябре 1969 г. при помощи электрофотометра и интерференционными фильтрами, выделяющими участки спектра, центрированные на длины волн 0,37 и 0,58 μ .

Выделение первичных сумерек B_1 из наблюдаемых яркостей B_n сумеречного неба производилось по формуле $B_1 = kB_n$, где коэффициент k представляет отношение $B_1 / (B_1 + B_2)$ яркости первичных сумерек и сумме яркостей $B_1 + B_2$ первичных и вторичных сумерек. Коэффициент k зависит от погружения Солнца g , горизонтальных координат точки наблюдения (z ; A) коэффициента прозрачности и длины волны света. Значения коэффициента k вычислялись по данным ⁽¹⁾ для средней модели атмосферы CIRA, 1961 с учетом влияния озона и рассеяния света на атмосферной пыли, средняя концентрация которой была определена по сумеречным наблюдениям ⁽²⁾. Искользованные значения коэффициента k приведены в табл. 1.

Представляя яркость первичных сумерек B_1 в виде суммы молекулярной B_m и пылевой B_n составляющих, получим $B_1 = B_m + B_n$:

$$B_m = I_0 \frac{\beta}{n(0)} \cdot 3,046 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{3}{16\pi} (1 + \cos^2 \theta) \int_0^\infty n(h) e^{-\tau} e^{-\tau'} \sec \gamma dh; \quad (1)$$

$$B_n = I_0 \cdot 3,046 \cdot 10^{-4} \int_0^\infty (q\pi a^2)_{cp} n_1(h) f_1(\theta) e^{-\tau} e^{-\tau'} \sec \gamma dh. \quad (2)$$

Здесь $f(\theta) = \frac{3}{16\pi} (1 + \cos^2 \theta)$ — индикатриса молекулярного (релеевского) рассеяния, нормированная по условию $\int_{(4\pi)} f(\theta) d\omega = 1$; β — коэффициент

рассеяния чистого воздуха у земной поверхности ($h = 0$), рассчитанный на единицу длины (см^{-1}); $n(h)$ и $n_1(h)$ — соответственно концентрация молекул воздуха и концентрация пылевых частиц на высоте h над земной поверхностью; $(q\pi a^2)_{cp}$ — эффективная площадь сечения пылевых частиц на высоте h ; $f_1(\theta)$ — индикатриса рассеяния пылевых частиц, нормированная по условию $\int_{(4\pi)} f_1(\theta) d\omega = 1$; $e^{-\tau}$ — фактор, учитывающий экстинк-

цию солнечного излучения в атмосфере Земли до рассеивающего элемента; $e^{-\tau'}$ — фактор, учитывающий экстинкцию рассеянного излучения на пути от рассеивающего элемента до наблюдателя (если рассеивающий элемент

находится достаточно высоко над земной поверхностью, можно принять $e^{-\tau'} = p^m$, где p — коэффициент прозрачности земной атмосферы, m — атмосферная масса наблюдаемой точки неба); γ — угол при рассеивающем элементе между направлением визирования и направлением от центра Земли к рассеивающему элементу; θ — угол рассеивания; множитель $3,046 \cdot 10^{-4}$ введен для перехода от телесного угла в один стерадиан к углу в один квадратичный градус.

Вводя обозначения

$$\mu = \frac{\beta}{n(0)} \frac{3}{16\pi} (1 + \cos^2 \theta), \quad v = (q\pi a^2)_{\text{cp}} f_1(\theta), \quad (3)$$

получим

$$B_1 = I_0 \cdot 3,046 \cdot 10^{-4} \int_0^\infty [\mu n(h) + v n_1(h)] e^{-\tau} e^{-\tau'} \sec \gamma dh. \quad (4)$$

Подынтегральная функция интеграла (4) достигает максимума на некоторой высоте h , которую называют эффективной высотой сумеречного луча.

Таблица 1

z, град	$\lambda = 0,37 \mu, p = 0,46$				$\lambda = 0,58 \mu, p = 0,72$			
	g в градусах				g в градусах			
	4	6	10	14	4	6	10	14
80	0,61	0,72	0,66	0,37	0,70	0,72	0,65	0,45
70	0,71	0,71	0,22	0,125	0,70	0,59	0,26	0,19
60	0,67	0,66	0,065	0,060	0,66	0,53	0,093	0,10
40	0,61	0,57	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$	0,63	0,42	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$
20	0,58	0,48	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	0,58	0,34	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$
0	0,56	0,44	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	0,56	0,30	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$
-20	0,56	0,41	$7,0 \cdot 10^{-3}$	$7,0 \cdot 10^{-3}$	0,54	0,27	$6,6 \cdot 10^{-3}$	$9,0 \cdot 10^{-3}$
-40	0,53	0,32	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	0,53	0,19	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$
-60	0,42	0,090	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$	0,43	0,036	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$

Примечание. Знак минус перед z означает, что точка находится на противосолнечной стороне вертикала Солнца.

Яркость первичных сумерек с достаточной точностью может быть представлена приближенной формулой

$$B_1 = I_0 \cdot 3,046 \cdot 10^{-4} [\mu n(h) + v n_1(h)] e^{-\tau} e^{-\tau'} \sec \gamma \Delta h, \quad (5)$$

где значение подынтегральной функции берется для высоты h , равной эффективной высоте сумеречного луча, а Δh — так называемая полуширина сумеречного луча.

Представление яркости первичных сумерек в форме (5) было использовано нами для определения рассеивающих свойств атмосферы. При этом значения Δh брались согласно данным работы (3), а $e^{-\tau}$, $e^{-\tau'}$ и $\sec \gamma$ вычислялись. Оптическая толща τ определялась как сумма оптических толщ воздуха τ_a , озона τ_o и пыли τ_{Π} по формулам

$$\tau_a = 2\beta \int_0^\infty \frac{n(h)}{n(0)} ds, \quad \tau_o = 2\alpha \int_0^\infty n_o(h) ds, \quad \tau_{\Pi} = 2(q\pi a^2)_{\text{cp}} \int_0^\infty n_1(h) ds, \quad (6)$$

где α — коэффициент поглощения озона, а $n_o(h)$ — его концентрация на высоте h .

В соответствии с ранее сделанным замечанием вместо $e^{-\tau'}$ мы использовали p^m , причем коэффициент прозрачности p определялся по методу Бугера по звездам. Угол γ вычислялся по формуле $\gamma = \arcsin R \sin z / (R + h)$, где R — радиус Земли. Высота сумеречного луча h в зависимости от погружения Солнца определялась по таблицам, приведенным в (4).

Полученные из наблюдений яркости B_1 первичных сумерек в рассматриваемой точке неба наносили на график в зависимости от эффективной высоты h сумеречного луча и по этому графику брали значения B_1 для различных высот через каждые 5 км. Зная для этих высот значения выражения $I_0 \cdot 3,046 \cdot 10^{-4} e^{-\tau} p^m \sec \gamma \Delta h$, по формуле (5) получим для рассматриваемых высот значения общего (или интегрального) направленного коэффициента рассеяния $\sigma(\theta, h) = \mu n(h) + \nu n_1(h)$, который определяет, какая часть света, падающего на элементарный объем на высоте h , рассеивается всем веществом (т. е. газом и пылью) в единицу телесного угла под углом рассеяния θ .

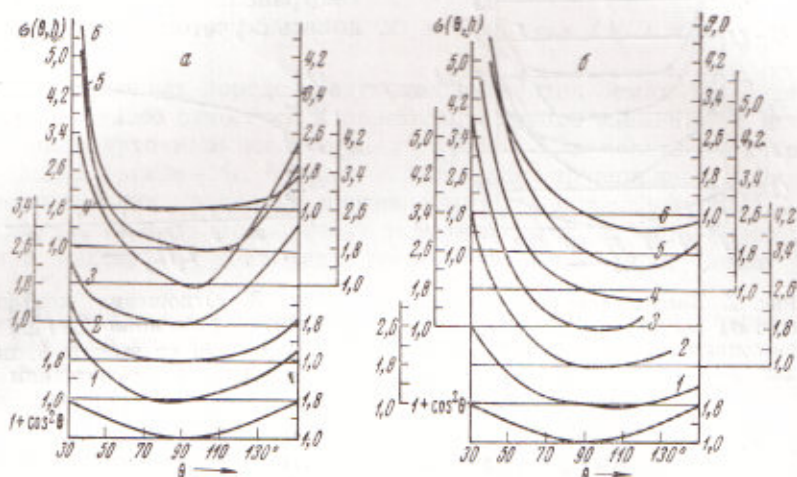


Рис. 1. Нормированные по условию $\sigma(90^\circ, h) = 1$ индикатрисы рассеяния в лучах 0,37 (а) и 0,58 (б) для высот: 1 — 40 км, 2 — 50, 3 — 70, 4 — 90, 5 — 110, 6 — 130 км

На рис. 1 приведены нормированные по условию $\sigma(90^\circ, h) = 1$ индикатрисы рассеяния для высот 40, 50, 70, 90, 110 и 130 км, полученные в длинах волн 0,37 и 0,58 μ . Как видно из рисунка, имеется тенденция увеличения крутизны индикатрис с возрастанием высоты над земной поверхностью. На высотах 40 и 50 км индикатрисы в длине волны 0,37 μ почти симметричны относительно линии $\theta = 90^\circ$ в отличие от индикатрис в длине волны 0,58 μ , которые и на этих высотах характеризуются большей вытянутостью вперед, чем назад. Полученные нами индикатрисы рассеяния для 0,58 μ хорошо согласуются с индикатрисами, найденными Е. В. Пясковской-Фесенковой⁽³⁾ по наблюдениям дневного неба.

Для определения индикатрисы $\sigma_n(\theta, h) = \nu n_1(h)$, представляющей рассеяние на пыли (пылевая индикатриса), из общей индикатрисы вычиталась величина $\mu n(h)$, определенная для средней модели атмосферы CIRA, 1961, т. е. $\sigma_n(\theta, h) = \sigma(\theta, h) - \mu n(h)$. Найденные таким образом нормированные по условию $\sigma_n(90^\circ, h) = 1$ индикатрисы рассеяния, полученные в длине волны 0,37 μ , приведены на рис. 2. Как видно из рисунка, пылевые индикатрисы для малых высот (например, для высоты 40 км) значительно круче общих индикатрис. Однако, по мере увеличения высоты над земной поверхностью разница между пылевой и общей индикатрисами практически исчезает, поскольку для больших высот основной вклад в рассеяние определяется рассеянием на пыли. Аналогичная картина имеет место и для длины волны 0,58 μ , где роль пыли по сравнению с газом еще больше, чем в длине волны 0,37 μ .

Для определения коэффициента рассеяния Σ , показывающего, какая часть падающего света рассеивается во все стороны, необходимо знать направленный коэффициент рассеяния $\sigma(\theta, h)$ для всех углов θ в интервале

(0°, 180°), поскольку

$$\Sigma(h) = \int_{(4\pi)} \sigma(\theta, h) d\omega = 2\pi \int_0^\pi \sigma(\theta, h) \sin \theta d\theta. \quad (7)$$

Коэффициент направленного рассеяния $\sigma(\theta, h)$ определялся нами по наблюдениям в вертикале Солнца на интервале углов рассеяния от 25 до 155°. Поэтому для получения $\Sigma(h)$ функция $\sigma(\theta, h)$ экстраполировалась от 25 до 0° и от 155 до 180°. Экстраполяция от 25 до 0° проводилась с учетом индикатрисы, най-

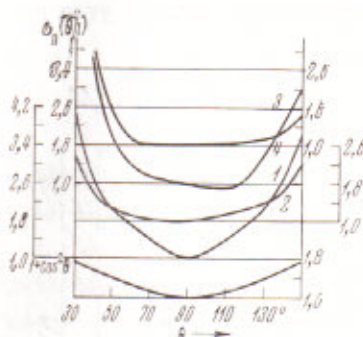


Рис. 2. Нормированные по условию $\sigma_n(90^\circ, h) = 1$ индикатрисы рассеяния пыли в лучах $0,37 \mu$ для высот h : 1—40 км, 2—50, 3—110, 4—130 км

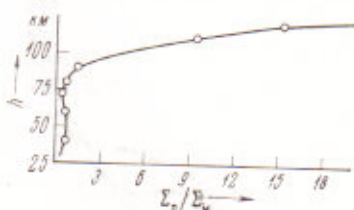


Рис. 3. Отношения коэффициентов рассеяния Σ_p / Σ_m в зависимости от высоты h , полученные по наблюдениям в лучах $0,37 \mu$

денной в (°) для малых углов рассеяния по наблюдениям, проведенным при помощи коронографа, поднятого на высоту 25 км. Экстраполяция в область углов 160—180° делается достаточно уверенно, и ее возможные ошибки, согласно нашим оценкам, могут составлять несколько процентов значения Σ .

На рис. 3 показаны значения отношения Σ_p / Σ_m коэффициента рассеяния пыли Σ_p к коэффициенту рассеяния молекул воздуха Σ_m , полученные по яркостям первичных сумерек в лучах $0,37 \mu$. Представленная кривая показывает, что в области высот от 30 до 70 км отношение Σ_p / Σ_m изменяется мало и близко к единице. На высотах более 75 км это отношение начинает заметно расти, и на высотах более 100 км рассеяние на пыли преобладает над рассеянием на молекулах.

Одесский политехнический институт

Поступило
10 XI 1970

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Н. Б. Дивари, Л. И. Плотникова, *Астрон. журн.*, **42**, № 5, 1090 (1965).
² Н. Б. Дивари, *Геомагнетизм и аэронавтика*, **4**, № 5, 886 (1964). ³ Н. Б. Дивари, *Сборн. Атмосферная оптика*, «Наука», М., 1970, стр. 158. ⁴ Н. Б. Дивари, *Сборн. Атмосферная оптика*, «Наука», 1968, стр. 105. ⁵ Е. В. Пясковская-Фесенкова, *Сборн. Атмосферная оптика*, «Наука», 1970, стр. 94. ⁶ G. Newkirk, J. A. Eddy, *Space Res.* III, 1963, p. 143.