

Академик В. Г. ФЕСЕНКОВ

**ЛУННЫЕ ЗАТМЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОЗОНА ПО ВЫСОТЕ
В ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ**

Яркость в земной тени, отбрасываемой на луну во время лунного затмения, обуславливается следующими факторами: преломляющей способностью земной атмосферы, благодаря чему производится некоторое загибание световых лучей внутрь конуса тени, изменением рефракции с высотой, что обуславливает расхождение лучей в пучке, проходящем через атмосферу, поглощением света в атмосфере, рассеянием света. Последний фактор может иметь значение лишь для глубоких участков земной тени, отражающих преимущественно строение тропосферы и потому не представляющих особого интереса. Оставим его без рассмотрения. Кроме того пренебрежем пока угловыми размерами Солнца. В этом идеальном случае распределение яркости в земной тени на расстоянии Луны l представится следующим выражением в зависимости от положения рассматриваемого элемента по отношению к центру:

$$f(\varphi) = I \cdot II \cdot III \frac{dy}{dh_0} = \left(1 - \frac{2IR}{r_0 + h_0}\right)^{-1} \left(1 - 2l \frac{dR}{dh_0}\right)^{-1} e^{-f(h_0)} \frac{dy}{dh_0},$$

где R —горизонтальная рефракция, характеризующая траекторию луча, проходящего через атмосферу на наименьшей высоте h_0 над Землей, r_0 —радиус земного шара, $f(h_0)$ —оптическая толщина атмосферы, считающаяся вдоль данной траектории. Последний множитель $\frac{dy}{dh_0}$ характеризует некоторое расхождение лучей в однородном пучке, вступающем в земную атмосферу, в месте его наибольшего приближения к земной поверхности.

Горизонтальная рефракция может быть вычислена шаг за шагом между отдельными отрезками траектории при помощи ряда, расположенного по степеням угла амплитуды φ , считаемого при центре земного шара:

$$R = \kappa_1 \varphi + (\kappa_1 + \kappa_1^2 + \kappa_2) \text{ctg} \zeta \frac{\varphi^2}{2} + \dots,$$

где коэффициенты $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3 \dots$ легко находятся из формул:

$$\kappa_1 = -\frac{r}{n} \frac{dn}{dr}; \quad \kappa_2 = -\frac{r^2}{n} \frac{d^2n}{dr^2}; \quad n = 1 + c\delta; \quad \frac{d\delta}{\delta} = -\frac{dh}{\tau} \left(\frac{g}{\gamma} + \frac{d\tau}{dh} \right)$$

(δ —плотность воздуха на высоте $h = r - r_0$, g —ускорение силы тяжести, τ —абсолютная температура на той же высоте, ζ —угол между касательной и радиусом-вектором траектории).

Определяя кроме того оптическую толщину $f(h_0)$ на основании обобщенной теории поглощения света Лапласа в связи с наблюдениями над атмосферной прозрачностью, произведенными в высокогорных условиях, находим следующее распределение яркости в земной тени на разных расстояниях ρ от ее центра, выраженных в частях радиуса земного шара r_0 .

Таблица 1

h_0 (км)	$\frac{\rho}{r_0}$	I	II	III	$\frac{dh_0}{dy}$	$f(\rho)$
8	0.461	2.17	0.00280	0.0106	1.100	$0.579 \cdot 10^{-4}$
12	0.654	1.53	0.00344	0.0831	1.070	$0.406 \cdot 10^{-3}$
14	0.745	1.342	0.00357	0.168	1.056	$0.756 \cdot 10^{-3}$
16	0.825	1.212	0.00455	0.291	1.045	$1.533 \cdot 10^{-3}$
18	0.877	1.140	0.00654	0.420	1.031	$3.03 \cdot 10^{-3}$
21	0.933	1.072	0.01168	0.621	1.015	$7.65 \cdot 10^{-3}$
26	0.972	1.029	0.0347	0.817	1.004	0.0290
31	0.986	1.014	0.091	0.912	1.002	0.0840
36	0.993	1.007	0.13	0.946	1.001	0.124
41	0.996	1.0035	0.18	0.981	1.000	0.177

Мы видим, что яркость тени около ее границы определяется фактором II, характеризующим градиент рефракции по высоте для высоких стратосферных слоев; остальные факторы мало отличаются от единицы.

В предыдущем не учитывалось наличие в атмосфере озона, который проявляет себя в визуальной части спектра лишь слабо заметной полосой Шапюи (Charuis). Можно тем не менее думать, что для горизонтальных траекторий, проходящих на больших высотах, где обычное поглощение чрезвычайно мало, поглощение озона в указанной полосе

Таблица 2

$\frac{\rho}{r_0}$	$f(\rho)$ [без озона]	$f(\rho)$ [озон] $\Delta h = 1$ км	5 км	10 км
1.00	100	100	100	100
0.98	5.20	5.20	5.20	1.14
0.96	1.75	1.75	0.174	0.232
0.94	0.93	0.93	0.0391	0.0890
0.92	0.59	0.001	0.0603	0.0976
0.90	0.42	0.0201	0.0697	0.0933
0.88	0.318	0.0295	0.0620	0.0794
0.86	0.234	0.0307	0.0519	0.0632
0.84	0.179	0.0284	0.0438	0.0516
0.82	0.145	0.0261	0.0381	0.0438
0.80	0.119	0.0235	0.0334	0.0377
0.70	0.0540	0.0142	0.0178	0.0198
0.67	0.0290	0.0086	0.0107	0.0109
0.50	(0.0086)	(0.0017)	(0.0031)	(0.0033)
0.40	(0.0046)	(0.0014)	(0.0017)	(0.0018)

может значительно повлиять на распределение яркости в земной тени. Предположим например, что озон, имея определенную эквивалентную толщину, известную из наблюдений, располагается в виде однородного слоя в пределах а) 20—24 км, б) 24—26 км, в) 24—31 км. Для коэффициента поглощения k в направлении на зенит находим 0.069, для чего достаточно сравнить между собой различные части кривой атмосферной прозрачности внутри и вне полосы Шапои. С этим значением k вычислена во всех трех указанных случаях яркость в земной тени в функции расстояния от центра ρ (табл. 2).

В предыдущем предполагалось, что Земля освещается точечным источником света. В действительности Солнце имеет довольно значительные угловые размеры. Нужно представить себе, что каждый элемент его видимой поверхности производит распределение яркости в земной тени, указанное выше. Это распределение, имеющее некоторым образом усредненный характер, может быть вычислено при помощи приближенной формулы:

$$f(\bar{\rho}) = \frac{\sum_{\rho_i - \frac{\Delta\rho}{2}}^{\rho_i + \frac{\Delta\rho}{2}} e^{-m^2\xi^2} P[m\sqrt{r_0^2 - \xi^2}] d\xi + \frac{f''(\rho_i)}{2!} \int_{\rho_i - \frac{\Delta\rho}{2}}^{\rho_i + \frac{\Delta\rho}{2}} (\xi - \rho_i)^2 e^{-m^2\xi^2} P[m\sqrt{r_0^2 - \xi^2}] d\xi}{\sum_{\rho_i - \frac{\Delta\rho}{2}}^{\rho_i + \frac{\Delta\rho}{2}} \int e^{-m^2\xi^2} P[m\sqrt{r_0^2 - \xi^2}] d\xi},$$

где

$$P(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x^2} dx,$$

причем яркость на солнечном диске представлена функцией

$$\varphi(\varepsilon) = e^{-m^2\varepsilon^2}; \quad \varphi(0) = 1.$$

Если общее выражение представить не менее как 16 слагаемыми, то производные второго и высших порядков можно отбросить.

Значительно точнее, хотя и более затруднительно, вычислять яркость в земной тени путем непосредственного числового интегрирования исходного выражения:

$$f(\bar{\rho}) = \iint f(\rho) \varphi(\varepsilon) d\varepsilon,$$

где за $\varphi(\varepsilon)$ следует, конечно, взять действительно наблюдаемое распределение яркости по солнечному диску.

Результаты подобных вычислений приведены в следующей таблице:

Таблица 3

$\frac{\rho}{r_0}$	Озона нет	Озон $\Delta h = 1$ км	$\Delta h = 5$ км	$\Delta h = 10$ км
0.60	0.000424	0.000103	0.000137	0.000152
0.66	0.000829	0.000135	0.000203	0.000241
0.69	—	0.000384	0.000243	0.000300
0.72 (граница тени)	0.00243	0.00210	0.00176	0.00158

К сожалению, не существует наблюдений, произведенных специально для выявления распределения озона по лунным затмениям. До известной степени наши результаты можно сравнить с наблюдениями Кеена над затмением 27 ноября 1928 года, который в зеленых лучах ($\lambda = 5000 - 5900 \text{ \AA}$) получил следующее распределение яркости в тени:

Таблица 4

$\frac{\rho}{r_0}$	0.501	0.587	0.683
$f(\rho)$	0.000130	0.000200	0.000541

Эти наблюдения хорошо согласуются с нашей теорией, если только предположить, что атмосферный озон, начинаясь на высоте около 20 км, простирается в высоту не менее как до 50 км. Наблюдения Данжона 1931 г. можно интерпретировать таким же образом, приняв однако несколько меньшее значение для эквивалентной толщи озона.

Повидимому, следует признать, что фотометрические наблюдения над лунными затмениями, относящиеся преимущественно к краю земной тени и произведенные в красных и зеленых лучах спектра, дают возможность самостоятельного суждения о градиенте рефракции по высоте и о распределении озона в высоких стратосферных слоях.

Астрофизическая обсерватория
Московского государственного университета.
Кучино.

Поступило
13 III 1937.