

УДК 523.42

АСТРОНОМИЯ

В. Я. ГАЛИН, Н. Л. ЛУКАШЕВИЧ, Е. М. ФЕЙГЕЛЬСОН

**ОТРАЖЕНИЕ СОЛНЕЧНОГО СВЕТА ОТ АТМОСФЕРЫ ВЕНЕРЫ**

(Представлено академиком Г. И. Марчуком 28 VIII 1970)

Существование облачного слоя в атмосфере Венеры не вызывает сомнений и ему обычно отводят главную роль в формировании светового и теплового режима планеты (1). Предполагается, что отражение солнечного света обусловлено рассеянием в облаке, и парниковый эффект (если таковой имеется (1, 2)) также ранее приписывался облаку.

Данные о составе и строении атмосферы Венеры, полученные космическими аппаратами «Венера-4—6» и «Маринер-5», вносят поправки в эти представления.

Новым, твердо установленным фактом является большая оптическая толщина молекулярной составляющей атмосферы, обусловленная интенсивным релеевским рассеянием в коротких волнах ( $\lambda \leq 1 \mu$ ) и поглощением атмосферными газами в диапазоне теплового излучения ( $1 \mu \leq \lambda \leq 100 \mu$ ).

Ниже приведен коэффициент релеевского рассеяния  $\sigma_{\lambda_0}(z)$  для модели венерианской атмосферы из (3) при  $\lambda_0 = 0,5 \mu$ .

$z$ , км	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33
$\sigma_{\lambda_0} \cdot 10^2$ , км <sup>-1</sup>	160	140	120	110	90	76	64	53	44	37	29	24
$z$ , км	36	39	42	45	48	51	54	57	60	70	80	
$\sigma_{\lambda_0} \cdot 10^2$ , км <sup>-1</sup>	19	16	11	8,7	6,2	4,9	3,6	2,5	1,6	0,28	0,04	

По этим данным оптическая толщина молекулярной составляющей атмосферы Венеры равна

$$\tau_{\lambda_0,p} = \int_0^{\infty} \sigma_{\lambda_0}(z) dz = 30.$$

Заметим, что для земной атмосферы  $\tau_{\lambda_0,p} \approx 0,2$ . Оптическую толщину теплового излучения в атмосфере Венеры пока невозможно определить точно. По грубым оценкам это величина порядка ста (4).

Согласно современным представлениям (3), нижняя граница облачного слоя расположена на высоте порядка 60 км, где

$$p/p_0 = 0,003, \quad \rho/\rho_0 = 0,01, \quad T/T_0 = 0,35$$

( $p_0, T_0, \rho_0$  — давление, температура и плотность воздуха при  $z \approx 0$  соответственно).

Таким образом, почти целиком под облаком располагается деятельный слой молекулярной атмосферы огромной рассеивающей и поглощающей способности. В (4) указано, что этот слой должен играть первостепенную роль в формировании парникового эффекта.

В настоящей работе выясняется значение молекулярной подложки в формировании яркости отраженного солнечного света. Рассматривается двуслойная модель атмосферы. Нижний слой рассеивает свет по закону Релея при соответствующей индикатрисе и оптической толщине, равной

$$\tau_{\lambda} = 30(\lambda_0/\lambda)^4,$$

где  $\lambda_0 = 0,5 \mu$ . Верхний облачный слой рассеивает аналогично земным облакам: принята индикатрисса рассеяния полидисперсного облака <sup>(6)</sup>, оптическая толщина  $\tau_0$  не зависит от длины волны.

Угловое распределение и поток солнечного излучения, отраженного от верхней границы описанной двухслойной атмосферы, были определены путем численного решения уравнения переноса излучения по методам, разработанным в Вычислительном центре СО АН СССР <sup>(7)</sup>. Решение табулировалось по параметрам  $\tau_p$ ,  $\tau_0$  и  $\mu_0 = \cos \xi$ , где  $\xi$  — зенитный угол солнца. Погрешность расчетов не превысит 10%.

На рис. 1 представлено угловое распределение отраженного света при различных  $\tau_p$  и  $\tau_0$ , подчиненных условию  $\tau_p + \tau_0 = 40$  и при нормальном падении солнечных лучей ( $\mu_0 = 1$ ) на верхнюю границу атмосферы. Видно, что добавление к релеевскому

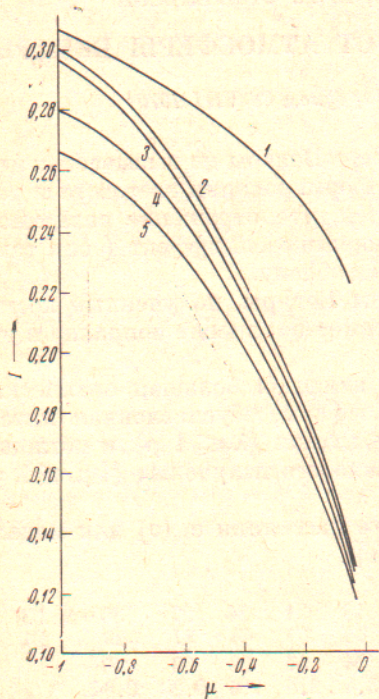


Рис. 1. Угловое распределение отраженного света: 1 —  $\tau_p = 40$ ,  $\tau_0 = 0$ ; 2 —  $\tau_p = 30$ ,  $\tau_0 = 10$ ; 3 —  $\tau_p = 20 = \tau_0$ ; 4 —  $\tau_p = 10$ ,  $\tau_0 = 30$ ; 5 —  $\tau_p = 0$ ,  $\tau_0 = 40$ .  $\mu = \cos \theta$ ,  $\pi/2 \leq \theta \leq \pi$ ,  $\theta$  — угол визирования

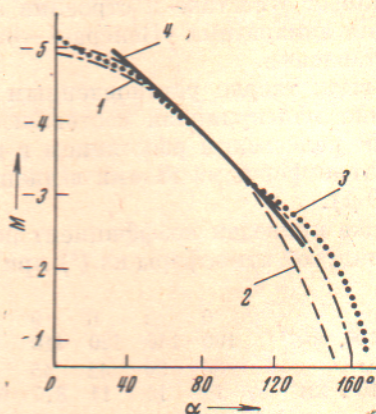


Рис. 2. Фазовые кривые отраженного света;  $\alpha$  — фазовый угол.  $M(\alpha)$  — звездная величина по <sup>(8)</sup>. 1 — измерения <sup>(8)</sup>; 2 и 3 — расчет по <sup>(9)</sup>: 2 —  $\tau_0 = 0$ ,  $\tau_p = \infty$ ; 3 —  $\tau_p = 0$ ,  $\tau_0 = \infty$ ; 4 — двухслойная атмосфера при  $\tau_p = \tau_0 = 20$  (наши данные)

слою достаточно тонкого облачного приводит к решительному изменению углового распределения отраженного света и к уменьшению интенсивности.

На рис. 2 представлены фазовые кривые отраженного от Венеры света: экспериментальная кривая <sup>(8)</sup>, и вычисленные <sup>(9)</sup> в случаях полубесконечной чисто релеевской (кривая 2) и чисто облачной (кривая 3) атмосфер. Кривая 4 рис. 2 представляет предварительные данные наших расчетов при  $\tau_p = 20$ ,  $\tau_0 = 20$ , индикатриссе рассеяния монодисперсного облака при  $\rho = 2\pi r / \lambda = 30$ , где  $r$  — радиус капель. Экспериментальная кривая лежит между крайними случаями кривых 2 и 3 и при фазовых углах  $60^\circ \leq \alpha \leq 140^\circ$  хорошо согласуется с данными двухслойной модели, что свидетельствует о влиянии нижнего релеевского слоя.

Рассмотрим как формируется альбеда двухслойной атмосферы. Прежде всего заметим, что в пределах длин волн видимого света  $6 \leq \tau_{p,\lambda} \leq 70$  ( $0,4 \leq \lambda \leq 0,75 \mu$ ). Плоское альбеда чисто релеевской атмосферы при  $\tau_p$ , заключенном в этих пределах, и  $\mu_0 = 1$  представлено пунктирной кривой на рис. 3. По данным измерений (см., например, <sup>(8)</sup>) интегральное

сферическое альbedo в видимой области  $A_{сф} = 0,8$ . Напомним, что

$$A_{сф} = 2 \int_0^1 A(\mu_0) \mu_0 d\mu_0.$$

По нашим расчетам,  $A_{сф} \approx 1,1 A(1)$ . Рис. 3 показывает, что молекулярная составляющая венерианской атмосферы заведомо может обеспечить измеренное значение  $A_{сф}$ .

Рассматривая кривые 1—5 рис. 3, видим, как изменяется альbedo, если к релеевскому подслою заданной толщины добавлять облачный слой все

возрастающей толщины. Обнаруживается интересный, ранее как будто незамеченный эффект: с увеличением оптической толщины облака, а вместе с ней и общей оптической толщины атмосферы  $(\tau_p + \tau_0)$  альbedo сначала

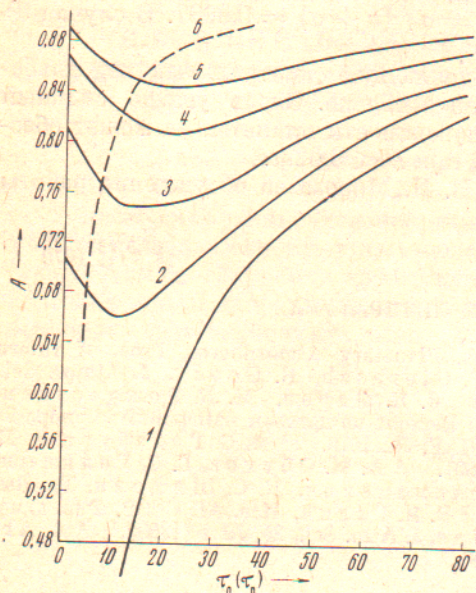


Рис. 3. Зависимость альbedo двухслойной атмосферы от оптической толщины облачного слоя при  $\mu_0 = 1$  и при заданной релеевской толщине: 1— $\tau_p = 0$ ; 2—5; 3—10; 4—20; 5— $\tau_p = 30$ ; 6—чисто релеевская атмосфера  $\tau_0 = 0$ , в этом случае по оси абсцисс отсчитывается  $\tau_p$

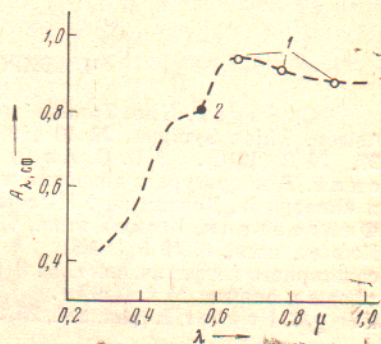


Рис. 4. Спектральное сферическое измеренное альbedo Венеры: 1—наши расчеты в двухслойной модели при  $\omega = 1$ ; 2—расчет при  $\omega = 0,9987$

убывает до некоторого значения  $A_{min}$  и только затем начинает расти. Качественно этот эффект связан с двумя формами влияния облачного слоя: изменение углового распределения рассеянного света — вытянутость индикатрисы, приводящая к уменьшению альbedo, и увеличение суммарной оптической толщины атмосферы, вызывающее рост альbedo. Первое влияние, очевидно, превалирует при  $\tau_0 < \tau_p$ . В точной аналитической форме уменьшение альbedo с ростом  $\tau_0$  выявляется в приближении однократного рассеяния.

Второй интересный факт, обнаруживаемый на рис. 3, состоит в том, что в случае чистого рассеяния молекулярный подслой влияет на отражательную способность атмосферы, по крайней мере, до значений  $\tau_0 \leq 80$ .

Рассмотрим теперь экспериментальную кривую  $A_{\lambda,сф}$  из (8), представленную на рис. 4. Сравнивая с этими данными вычисленные в двухслойной модели значения  $A_{\lambda,сф}$  попытаемся

- 1) оценить оптическую толщину облачного слоя;
- 2) объяснить поведение  $A_{\lambda,сф}$  при  $\lambda \geq 0,62$ ;
- 3) оценить коэффициент поглощения  $\alpha_{\lambda}$  при  $\lambda < 0,62 \mu$ .

Для первой оценки предположим, что при  $\lambda = 0,62 \mu$ , где  $A_{\lambda,сф} = A_{\lambda, макс} = 0,94$  и  $\tau_p = 10$ , отсутствует поглощение. В этом случае, согласно рис. 3, должно быть  $\tau_0 = 60$  (вспомним, что  $A_{сф} = 1,1 A(1)$ ). Так как при  $\lambda = 0,62$  возможно и поглощение, можно лишь утверждать, что  $\tau_0 \geq 60$ .

Ограничиваясь гипотезой чистого рассеяния при  $0,62 \leq \lambda \leq 1 \mu$ , положим  $\tau_0 = 60$  и вычислим альbedo двухслойной атмосферы в этом спектральном интервале. При соответствующих значениях  $\tau_{p, \lambda}$  получим значения  $A_{\lambda, \text{сф}}$ , представленные на рис. 4, 1. Таким образом, поведение  $A_{\lambda, \text{сф}}$  при  $0,62 \leq \lambda \leq 1 \mu$  объясняется убыванием с длиной волны оптической толщины молекулярной атмосферы.

Обращаясь к третьей оценке, рассмотрим две возможности: а) поглотитель содержится в облаке, б) в подоблачной атмосфере.

В случае а) расчеты при  $\lambda = 0,52 \mu$ ,  $\tau_p = 20$ , дают экспериментальные значения альbedo  $A_{\lambda, \text{сф}} = 0,8$ , если  $\omega = \sigma / (\sigma + a) = 0,9987$ . В случае б) при  $\omega \geq 0$  расчеты дают  $A_{\lambda, \text{сф}} \geq 0,85$ .

Таким образом, поглотитель, определяющий спектральный ход альbedo планеты, должен быть сосредоточен в облаке. Сколь угодно сильный поглотитель, расположенный вблизи поверхности планеты, не может обеспечить наблюдаемое уменьшение  $A_{\lambda, \text{сф}}$  при  $\lambda < 0,62 \mu$ .

В заключение авторы благодарят В. И. Мороза за обсуждение работы и полезные советы.

Поступило  
13 VIII 1970

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> C. Sagan, The Trouble with Venus. Planetary Atmospheres, Proc. of Intern Astron. Union Sympos., № 40 (1970). <sup>2</sup> P. Gierasch, R. Goody, J. Atmos. Sci., 27, № 2 (1970). <sup>3</sup> В. С. Авдучевский, М. Я. Маров, М. К. Рождественский, Температура и давление атмосферы Венеры по данным измерений «Венера-5» и «Венера-6», Доклад на XIII сессии КОСПАР, Л., 1970. <sup>4</sup> А. С. Гинзбург, Е. М. Фейгельсон, Космич. иссл., 7, в. 2 (1969). <sup>5</sup> А. М. Обухов, Г. С. Голицын, Космич. иссл., 6, № 5 (1968). <sup>6</sup> И. Л. Зельманович, К. С. Шифрин, Тр. Высокотемпературного геофизич. инст., в. 8 (1968). <sup>7</sup> В. Я. Галин, Изв. АН СССР, Физ. атмосферы и океана, № 11 (1970). <sup>8</sup> W. Irvine, J. Atm. Sci., 25, № 4 (1968). <sup>9</sup> A. Arking, J. Potter, J. Atm. Sci., 25, № 4 (1968).