

УДК 523.42—852:52.65

Глобальные вариации оптической толщины атмосферы Венеры.

I. Анализ наблюдений интегрального блеска

В. М. Клименко, Н. Н. Фомин, Э. Г. Яновицкий

Из анализа визуальных измерений блеска Венеры, выполненных Данжоном [8], найдено, что с доверительной вероятностью 92 % звездная величина m планеты испытывает периодические, примерно 4-суточные, изменения с амплитудой 0.03 ± 0.01^m . Установлено, что такие изменения можно объяснить глобальной асимметрией верхней части облачного слоя. При этом среднее значение оптической толщины атмосферы в целом для одной полусферы планеты не менее чем в полтора раза должно превышать среднюю оптическую толщину противоположной полусферы. Обращается внимание на необходимость проведения регулярных фотоэлектрических наблюдений блеска Венеры для уточнения амплитуды его изменений в разных участках спектра.

GLOBAL VARIATIONS OF THE OPTICAL DEPTH OF THE VENUS ATMOSPHERE. I. ANALYSIS OF OBSERVATIONS OF INTEGRAL LIGHT, by Klimenko V. M., Fomin N. N., Yanovitskij E. G.— Visual measurements by Danjon of Venus brightness are analysed. It is found with confidence probability 92 % that the planet magnitude m oscillates with the period of approximately four days. The amplitude of the oscillations is 0.03 ± 0.01^m . It appears that the oscillations may be accounted for by global asymmetry of the upper part of the cloud layer. The mean optical depth of the atmosphere on the whole for one hemisphere of the planet should be at least 1.5 times that for the opposite one. It is noted that the regular photoelectric observation of Venus are necessary in order to define more exactly the brightness oscillation amplitude in various spectral regions.

Введение. В работе [3] выполнены оценки локальных изменений оптической толщины атмосферы Венеры, приводящих к быстрым (порядка 1 ч) изменениям освещенности поверхности планеты. С другой стороны, как уже отмечалось [3], к настоящему времени хорошо изучено примерно 4-суточное обращение верхней части облачного слоя в экваториальной области (суперротация), обнаруженное в УФ-диапазоне спектра как по наземным наблюдениям (см., например, [7]), так и по измерениям, выполненным с помощью орбитальных космических аппаратов (подробнее см. [4, § 2.10]). В то же время исследование вариаций некоторой величины, названной авторами [11] силой линии CO_2 (868.9 нм), позволило сделать вывод о том, что и в этом случае наблюдается 4-суточная периодичность. По мнению авторов [11], она может быть вызвана или изменением концентрации аэрозоля в облачном слое, или же вариацией высоты его верхней границы.

Обнаружение примерно одинаковой периодичности изменений разных наблюдаемых глобальных характеристик атмосферы вблизи границ весьма широкого интервала длин волн (0.35—0.9 мкм) наводит на мысль, что эти вариации представляют собой следствие единого механизма — суперротации верхней части облачного слоя, по-видимому, глобально неоднородной по горизонтали. Для проверки этого предположения нам представляется важным привлечь также многочисленные визуальные [8] и фотоэлектрические [9] измерения звездной величины Венеры. Данные Данжона [8] относятся к средней части отмеченного диапазона длин волн.

Напомним также, что знание оптических свойств атмосферы необходимо, например, для расчетов распределения массы облачного веще-

ства над поверхностью планеты, изменений светового режима в атмосфере и на поверхности, для изучения динамических процессов и др. Поэтому, на наш взгляд, интересно оценить величины изменений оптических свойств атмосферы, которые могли бы объяснить периодические вариации блеска планеты в целом, если последние будут найдены.

Решению этой задачи и посвящена настоящая работа.

Анализ наземных наблюдений вариаций интегрального блеска Венеры в непрерывном спектре. Для их изучения воспользуемся стандартной процедурой спектрального анализа временных рядов (см.,

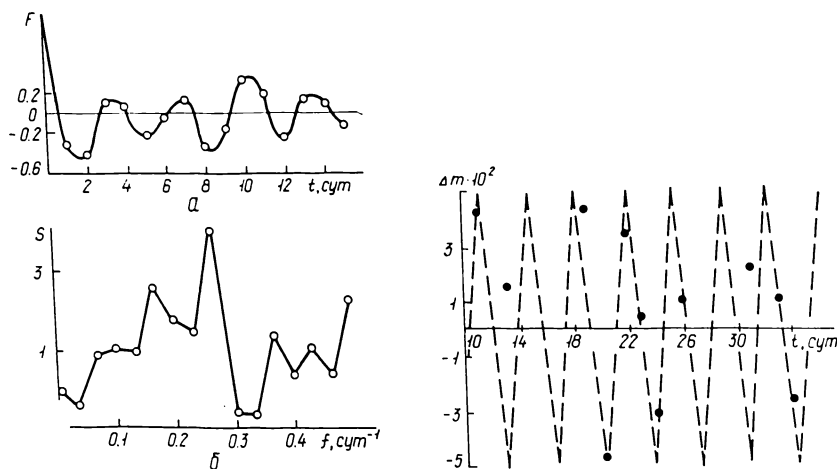


Рис. 1. Автокорреляционная функция временного ряда звездных величин Венеры (а) и его спектр мощности (б)

Рис. 2. Выборка значений Δm из ряда наблюдений Данжона [8] (точки), полученных в июле—августе 1943 г., когда моменты наблюдений были достаточно регулярны. Штриховая линия — произвольная периодическая зависимость с периодом 3.5 сут

например, [2]). Наиболее пригодной для этого оказалась часть наблюдений Данжона [8], выполненных в 1943 г. Это ряд из 70 достаточно регулярно расположенных по времени измерений. К сожалению, наблюдения Данжона в другие периоды, а также фотоэлектрические данные [9] оказались непригодными для такого анализа ввиду слишком больших промежутков между измерениями. Об этом, в частности, можно судить по результатам соответствующего анализа, предпринятого в работе [10].

Предварительная отфильтровка долгопериодических трендов из отобранного ряда, обязательная для спектрального анализа, проводилась нами в два этапа. Сначала вычитался тренд, обусловленный фазовым ходом блеска планеты. Оказалось, что во вновь образованном ряде имеются также вариации с характерным временем более 15 сут. В частности, отмечается явно выраженная 60-суточная периодичность изменения наблюдаемого блеска планеты. Такие вариации были также отфильтрованы, для чего применялся фильтр первых разностей (см. [2, гл. 7]). Затем вычислялись автокорреляционная функция ряда (рис. 1, а) и спектр мощности (рис. 1, б). Из рисунков видно, что гармоническая составляющая ряда с периодом примерно 3.5 сут проявляется достаточно четко (соответствующий пик на спектре мощности, относящийся к периоду 3.75 сут, значим на уровне 92%). Для иллюстрации на рис. 2 изображены отрезок ряда Δm (точки), для которого моменты наблюдений достаточно регулярны, а также произвольная периодическая функция с периодом 3.5 сут (штриховая линия). Оказалось, что амплитуда периодических колебаний блеска Δm составляет 0.03 ± 0.01^m , т. е. полный размах изменения m равен 0.06 ± 0.02^m .

Таким образом, визуальные наблюдения Венеры в непрерывном спектре также показывают наличие примерно 4-суточного периода изменения ее блеска. Однако такой вывод нуждается в дальнейшем подтверждении с более высокой степенью достоверности. Для этого желательно провести регулярные длительные фотоэлектрические измерения в разных участках спектра, что позволило бы также уточнить амплитуду процесса.

Оценка изменений оптической толщины облачного слоя. Предположим, что найденные изменения Δm звездной величины в непрерывном спектре обусловлены изменением оптической толщины τ_0 облачного слоя. Оценим величину $\Delta \tau_0$ ее возможных вариаций. Разумеется, изменения блеска могут быть с равным успехом объяснены соответствующим изменением поглощающих свойств атмосферы. Однако в таком случае, принимая во внимание наличие в атмосфере достаточно развитой меридиональной циркуляции (см., например, [4, § 2.09]), трудно объяснить стабильную локализацию поглощающего вещества. Другой, более веский, довод в пользу того, что изменения интегрального блеска Венеры вызваны именно изменением оптической толщины ее атмосферы, а не поглощающих свойств, приведем в следующей части настоящей работы.

Для грубой оценки $\Delta \tau_0$ примем простейшую модель атмосферы: она представляет собой оптически толстый однородный плоский слой при почти консервативном рассеянии ($1 - \lambda \ll 1$, где λ — альbedo однократного рассеяния), прилегающий к изотропно отражающей поверхности с заданным альbedo A .

Как известно (см. [5, гл. IX, § 2]), звездная величина планеты $m(\alpha)$ в зависимости от фазового угла α определяется по формуле

$$2.512^{m_{\odot} - m(\alpha)} = \sigma^2 H(\alpha), \quad (1)$$

где

$$H(\alpha) = \int_{\alpha - \pi/2}^{\pi/2} \cos(\alpha - \omega) \cos \omega d\omega \int_0^{\pi/2} \bar{\rho}(\mu, \mu_0, \varphi) \cos^3 \psi d\psi; \quad (2)$$

$\bar{\rho}(\mu, \mu_0, \varphi)$ — коэффициент отражения соответствующей точки на диске планеты; σ — ее видимый радиус; m_{\odot} — звездная величина Солнца. Воспользуемся строгой асимптотической формулой [6] для коэффициента отражения $\bar{\rho}$ излучения от оптически толстой ($\tau_0 \gg 1$) однородной атмосферы при почти консервативном рассеянии:

$$\bar{\rho}(\mu, \mu_0, \varphi) = \rho_0(\mu, \mu_0, \varphi) - \frac{4k}{3 - x_1} u_0(\mu) u_0(\mu_0) \operatorname{cth} k \left[\tau_0 + \frac{6\gamma_0}{3 - x_1} + \frac{4A}{(3 - x_1)(1 - A)} \right], \quad (3)$$

где $\rho_0(\mu, \mu_0, \varphi)$ — коэффициент отражения света от полубесконечной атмосферы при консервативном рассеянии ($\lambda = 1$); $u_0(\mu)$ — функция выхода в консервативной задаче Милна; $\gamma_0 = 2 \int_0^1 u_0(\mu) \mu^2 d\mu$; $k^2 = (1 - \lambda)(3 - x_1)$; x_1 — коэффициент при первом члене разложения индикатрисы рассеяния в ряд по полиномам Лежандра.

Обозначим $m(\alpha, \tau_1, \lambda)$ звездную величину планеты, окруженной атмосферой оптической толщиной $\tau_1 \gg 1$ при альbedo однократного рассеяния λ . Тогда из выражений (1) — (3) после некоторых преобразований легко получить ($i = 1, 2$)

$$2.512^{m(\alpha, \tau_2, \lambda) - m(\alpha, \tau_1, \lambda)} = \frac{1 - \psi_0(\alpha) \sqrt{1 - \lambda} \operatorname{cth}(l_1 \sqrt{1 - \lambda})}{1 - \psi_0(\alpha) \sqrt{1 - \lambda} \operatorname{cth}(l_2 \sqrt{1 - \lambda})}, \quad (4)$$

где

$$\psi_0(\alpha) = \frac{\frac{4}{\sqrt{3-x_1}} \int_{\alpha-\pi/2}^{\pi/2} \cos(\alpha-\omega) \cos \omega d\omega \int_0^{\pi/2} u_0(\mu) u_0(\mu_0) \cos^3 \psi d\psi}{\int_0^{\pi/2} \cos(\alpha-\omega) \cos \omega d\omega \int_0^{\pi/2} \rho_0(\mu, \mu_0, \varphi) \cos^3 \psi d\psi}; \quad (5)$$

$$l_i = \sqrt{3-x_1} \left(\tau_i + \frac{6\gamma_0}{3-x_1} + \frac{4A}{(3-x_1)(1-A)} \right). \quad (6)$$

В частности, при консервативном рассеянии из (4) следует совсем простое выражение:

$$2.512^{m(\alpha, \tau_2, 1) - m(\alpha, \tau_1, 1)} = \frac{1 - \psi_0(\alpha)/l_1}{1 - \psi_0(\alpha)/l_2}. \quad (7)$$

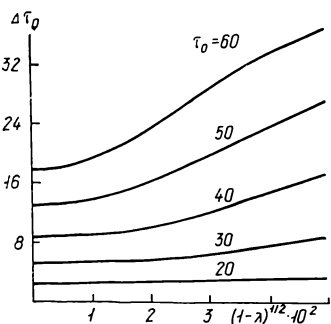
Пусть Δm и $\Delta \tau_0$ — амплитуды колебаний $m(\alpha)$ и τ_0 соответственно. Тогда, обозначив $\tau_2 = \tau_0 + \Delta \tau_0$, $\tau_1 = \tau_0 - \Delta \tau_0$ и $m(\alpha, \tau_2, \lambda) - m(\alpha, \tau_1, \lambda) = -2\Delta m$, с помощью формулы (4) может определить величину $\Delta \tau_0$, соответствующую колебаниям m с амплитудой Δm при любом угле фазы.

Как и в работе [1], мы взяли модель индикатрисы рассеяния в облачном слое, для которой $x_1 = 2.17$, и положили $\gamma_0 = 0.71$. Там же [1] для указанной индикатрисы приведены численные значения функции $\psi_0(\alpha)$.

α , град	0	20	40	60	80	100	120	140	160	170
$\psi_0(\alpha)$	3.74	4.59	5.03	4.95	4.46	3.55	2.25	0.87	0.12	0.02

Обратим внимание, что функция $\psi_0(\alpha)$ в интервале углов фазы $0 < \alpha < 120^\circ$ изменяется сравнительно медленно. Для простоты мы положили $A=0$, поскольку (см. [4, с. 40]) эта величина в рассматриваемом интервале длин волн равна 0.05—0.07. Кроме того, примем во внимание, что по данным различных космических экспериментов значение τ_0 может изменяться в широких пределах (согласно сводке [4], $20 \lesssim \tau_0 \lesssim 60$), а рассеяние в атмосфере может отличаться от консервативного.

Приняв $\Delta m = 0.03^m$, с помощью формул (4) и (6), а также данных таблицы функции $\psi_0(\alpha)$ для различных значений τ_0 ($20 \leq \tau_0 \leq 60$) мы



рассчитали зависимости $\Delta \tau_0$ от $\sqrt{1-\lambda}$, которые для $\alpha = 40^\circ$ представлены на рис. 3. Как видно, изменение звездной величины Венеры на $\Delta m = \pm 0.03$ может быть объяснено изменениями оптической толщины облачного слоя, амплитуда которых увели-

Рис. 3. Амплитуда изменения $\Delta \tau_0$ средней оптической толщины τ_0 атмосферы, соответствующая амплитуде звездной величины $\Delta m = 0.03^m$, для различных значений τ_0 и альбедо частиц λ

чивается по мере увеличения τ_0 и $\sqrt{1-\lambda}$. Например, если принять $2\Delta m = 0.06 \pm 0.02$, то значения величины $\tau_{\max}/\tau_{\min} = (\tau_0 + \Delta \tau_0)/(\tau_0 - \Delta \tau_0)$ будут составлять не менее 1.41 ± 0.16 , 1.55 ± 0.22 и 1.69 ± 0.29 для значений τ_0 , равных соответственно 30, 40 и 50. Здесь для расчета $\Delta \tau_0$ мы пользовались формулой (7).

Заключение. Итак, можно сделать вывод, что найденные периодические колебания звездной величины Венеры в визуальной области спектра могут быть объяснены глобальной асимметрией атмосферы:

средняя ее оптическая толщина для одной полусферы не менее чем в полтора раза превышает оптическую толщину другой (противоположной) полусферы. Согласно измерениям с КА «Пионер-Венера» на высотах около 70 км над поверхностью скорость зонального ветра соответствует обращению слоя атмосферы вокруг планеты за 3.2—4.5 сут, а по данным различных КА на высотах около 60 км этот период составляет 4.5—9 сут (подробнее см. [4, § 2.09]). Поэтому наблюдаемые периодические колебания звездной величины полностью объясняются, если предположить, что верхние слои облачного слоя Венеры (на высотах примерно 60—70 км) глобально неоднородны. Разумеется, описанную модель следует рассматривать пока лишь как рабочую гипотезу, основную идею которой в явной или неявной форме можно встретить в работах многих авторов (см., например, обзор [4, главы II, III]).

Более подробно как глобальную, так и локальную неоднородность облачного слоя Венеры мы предполагаем изучить в следующей части настоящей работы на основании данных наблюдений эквивалентных ширин слабых полос поглощения в ближнем ИК-участке спектра. Одновременно будет изложена строгая асимптотическая теория формирования слабых линий поглощения в оптически толстой атмосфере.

1. Аниконов А. С. Интерпретация слабых линий поглощения в спектре Венеры // Астрон. журн.— 1977.—54, вып. 1.— С. 169—177.
2. Дженкинс Ж. М., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения: В 2 т.— М.: Мир, 1971—1972.— Т. 1.—1971.—316 с.; Т. 2.— 1972.—287 с.
3. Длугач Ж. М. Оценки изменений оптической толщины облачного слоя Венеры по данным спускаемых аппаратов «Венера-13» и «Венера-14» // Кинематика и физика небес. тел.— 1989.— 5, № 1.— С. 38—44.
4. Ксанфомалити Л. В. Планета Венера.— М.: Наука, 1985.—376 с.
5. Соболев В. В. Рассеяние света в атмосферах планет.— М.: Наука, 1972.—335 с.
6. Яновицкий Э. Г. Поле излучения в оптически толстой атмосфере при почти консервативном рассеянии // Физика атмосферы и океана.— 1980.—16, № 8.— С. 807—815.
7. Boyer Ch., Camichel H. Observations photographiques de la planète Vénus // Ann. Astrophys. 1961.—24, N 6.— P. 531—535.
8. Danjon M. A. Photométrie et colorimétrie des planètes Mercure et Vénus // Bull. Astron. Publié par l'observatoire de Paris.— 1949.—14.— P. 315—345.
9. Irwine W. M., Pikoos C., Young A. T. Multicolor photoelectric photometry of the brighter planets. III. Observations from Boyden observatory // Astron. J.— 1968.— 73, N 9.— P. 807—828.
10. Young A. T. An improved Venus cloud model // Icarus.— 1977.—32, N 1.— P. 1—26.
11. Young L. G., Young A. T., Young J. W., Bergstrahl J. T. The planet Venus: a new periodic spectrum variable // Astrophys. J.— 1973.—181, N 1.— P. L5—L8.

Глав. астрон. обсерватория АН УССР,
Киев

Поступила в редакцию
20.01.88