

УДК 523.42—852:52.65

Оценки изменений оптической толщины облачного слоя Венеры по данным спускаемых аппаратов «Венера-13» и «Венера-14»

Ж. М. Длугач

На основе решения уравнения переноса излучения в атмосфере Венеры получены количественные оценки возможных быстрых (примерно 1 ч) изменений оптической толщины ее облачного слоя. В качестве исходных наблюдательных данных использованы ранее опубликованные результаты телевизионного и спектрофотометрического экспериментов, проведенных с помощью СА «Венера-13» и «Венера-14». Для длины волны $\tilde{\lambda}=0.62$ мкм выполнено сравнение оптических параметров атмосферы Венеры, полученных ранее по спектрофотометрическим измерениям в предположении о стационарном состоянии атмосферы и найденных в настоящей работе с учетом возможных изменений, происходивших в атмосфере во время спуска аппаратов.

ESTIMATES OF THE VARIATIONS OF THE OPTICAL THICKNESS OF THE VENUS ATMOSPHERE FROM THE «VENERA-13» AND «VENERA-14» DATA, by Dlugach J. M.—The quantitative estimates of possible transient (~ 1 h) changes of the optical thickness of the Venus cloud layer are obtained by means of the solution of the radiative transfer equation. The previously published results of «Venera-13» and «Venera-14» television and spectrophotometric measurements are used as the initial experimental data. For $\tilde{\lambda}=0.62$ μm the parameters obtained earlier within the framework of a stationary atmosphere are compared with those of this work which account for possible changes in the atmosphere during the descent of the probes.

Многочисленные наблюдения Венеры наземными и космическими средствами свидетельствуют об активных динамических процессах, происходящих в ее атмосфере. В частности, хорошо изучено примерно 4-суточное обращение верхней части облачного слоя в экваториальной области, обнаруженное наземными наблюдениями и по измерениям, выполненным на орбитальных космических аппаратах (подробнее см. [5, 11]). Исследования вариаций линии CO_2 на длине волны $\lambda=0.8689$ мкм, проведенные в [12], позволили авторам сделать вывод о том, что и в этом случае обнаруживается приблизительно 4-суточная периодичность. С другой стороны, в результате телевизионного эксперимента, выполненного на поверхности Венеры с помощью спускаемых аппаратов «Венера-13, -14», получены данные, свидетельствующие о быстрых (порядка 1 ч) изменениях локальных оптических свойств атмосферы. Были зарегистрированы изменения яркости деталей на поверхности, которые достигали примерно 25 % (см. [8, 9]). В [9] это явление качественно объяснено изменением оптической толщины облачного слоя, но никаких количественных оценок не сделано.

С нашей точки зрения, представляет интерес на основе решения уравнения переноса излучения в атмосфере Венеры дать количественные оценки вариаций оптической толщины τ_0 облачного слоя, которые могли бы привести к упомянутым изменениям освещенности. Кроме того, учитывая, что спуск аппаратов в атмосферу продолжался в течение примерно 1 ч [1], интересно изучить вопрос, как исчет быстрых (происходящих примерно за такой же интервал времени) изменений светового режима в атмосфере может повлиять на определяемые оптические параметры среды. Этим вопросам и посвящена настоящая работа.

Метод расчета. Напомним вкратце суть используемого нами метода расчета поля излучения внутри многослойной среды (подробнее см. [4]). Предположим, что плоская атмосфера оптической толщиной τ_s , состоящая из произвольного числа n слоев, имеющих оптические

толщины $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ ($\tau_s = \sum_{k=1}^n \tau_k$), освещается параллельными лучами со стороны первого слоя, падающими под углом $\arccos \mu_0$ к внешней нормали при азимуте φ_0 и создающими освещенность π перпендикулярной к ним площадки. Оптические свойства каждого из слоев характеризуются индикатрисой рассеяния χ_k и альbedo частиц λ_k . Пусть $I(\tau, \mu, \mu_0, \varphi - \varphi_0; \tau_s)$ — интенсивность излучения на произвольной глубине τ в направлении $\arccos \mu$ при азимуте φ . Схематично процесс вычисления величины интенсивности можно разделить на два этапа. Вначале с помощью предложенного в [10] метода она рассчитывается на различных глубинах внутри каждого слоя. Затем, используя полученные в [4] для любой гармоникой интенсивности выражения

$$I(\tau, \mu, \mu_0; \tau_k^s) = I(\tau, \mu, \mu_0; \tau_k) + I(\tau_k, \mu, \mu_0; \tau_k^s) \exp[(\tau_k - \tau)/\mu] \times \\ \times \theta(-\mu) + 2 \int_0^1 I(\tau_k - \tau, -\mu, \mu'; \tau_k^s) I(\tau_k, -\mu', \mu_0; \tau_k^s) d\mu', \quad (\tau \in [0, \tau_k]); \quad (1)$$

$$I(\tau_k + \tau, \mu, \mu_0; \tau_k^s) = I(\tau, \mu, \mu_0; \tau_{k+1}^s) \exp(-\tau_k/\mu_0) + \\ + I(\tau_k, \mu, \mu_0; \tau_k^s) \exp(-\tau/\mu) \theta(\mu) + \\ + 2 \int_0^1 I(\tau, \mu, \mu'; \tau_{k+1}^s) I(\tau_k, \mu', \mu_0; \tau_k^s) d\mu', \quad (\tau \in [0, \tau_k^s]), \quad (2)$$

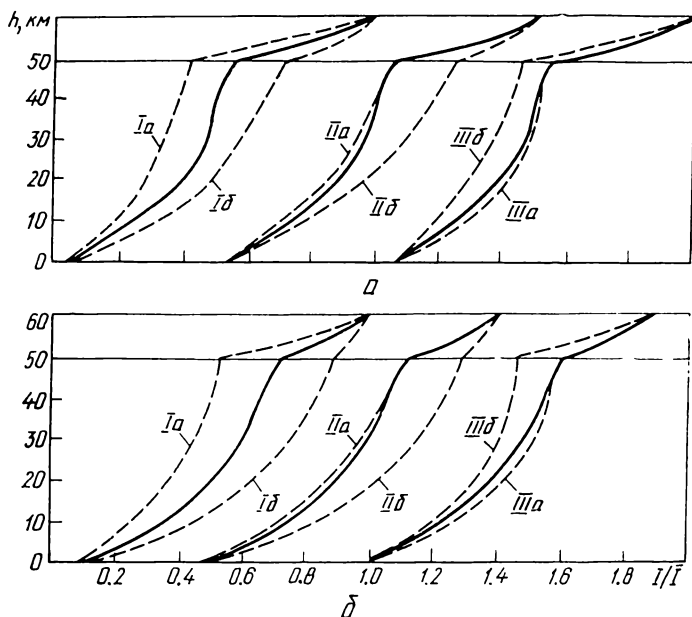
где $\tau_k^s = \sum_{i=k}^n \tau_i$ ($\tau_1^s = \tau_s$), $\theta(\mu)$ — единичная функция скачка, и последовательно полагая $k = n - 1, n - 2, \dots, 1$, можно найти поле излучения на любой глубине внутри всей атмосферы. В работе [4] показана эффективность такого метода расчета поля излучения внутри многослойной атмосферы.

Интерпретация результатов спектрофотометрического и телевизионного экспериментов, проведенных на СА «Венера-13» и «Венера-14». Воспользуемся данными об интенсивности нисходящего излучения на различных высотах в атмосфере, полученными спектрометрами, установленными на СА «Венера-13, -14» [7]. В [2] изложенным выше методом расчета поля излучения в многослойных средах выполнена интерпретация результатов этих измерений (при этом предполагалось, что в течение работы СА свойства атмосферы не изменялись). В результате наилучшее совпадение рассчитанных и измеренных профилей интенсивности нисходящего излучения получено для следующей модели атмосферы Венеры: на интервале высот 70—48 (50) км находится облачный слой, состоящий из частиц радиусом $r \approx 1$ мкм с показателем преломления $m = 1.44$; далее до высоты примерно 32 км расположен слой из газа и частиц радиусом $r \approx 0.1$ мкм; ниже — газовый слой с примесью очень мелкого (рассеивающего свет по закону Рэлея) аэрозоля. Альbedo поверхности полагалось равным 0.1.

Чтобы оценить быстрые (примерно 1 ч) вариации оптической толщины облачного слоя Венеры, рассмотрим несколько вариантов возможного состояния ее атмосферы во время работы СА.

С л у ч а й 1. Предположим, что в течение всего времени снижения СА атмосфера планеты оставалась стационарной, т. е. приведенные в [7] высотные профили интенсивности излучения правильно отражают состояние атмосферы во время спуска аппаратов. Оценим, как должна была измениться после посадки оптическая толщина облачного слоя, чтобы произошли зарегистрированные изменения освещенности на поверхности. Отметим, что поскольку данные, приведенные в [8, 9], относятся лишь к видимой области спектра, в дальнейшем будем пользоваться результатами из [7] лишь для одной длины волны $\tilde{\lambda} = 0.620$ мкм.

На рисунке (а — «Венера-13», б — «Венера-14») сплошными линиями показаны полученные в [7] высотные профили I/\bar{I} (I — интенсивность излучения на высоте $h=62$ км) для $\tilde{\lambda}=0.620$ мкм. В таблице представлены найденные в [2] для этой длины волны значения оптических параметров атмосферы. Отметим, что мы приводим данные лишь



Зависимость интенсивности излучения от высоты в атмосфере Венеры по данным СА «Венера-13» (а) и «Венера-14» (б). Сплошные линии — данные измерений для $\tilde{\lambda}=0.620$ мкм, полученные в [6]; штриховые — найденные высотные профили для различных вариантов возможного состояния атмосферы. Для каждого из рассмотренных случаев сделан сдвиг по оси абсцисс на пять (а) и на четыре (б) деления

для высот менее 60 км, где непосредственно проведены измерения. Штриховые кривые Ia и Ib (рисунок) показывают полученные нами зависимости интенсивности от высоты в предположении, что ее величина на поверхности соответственно на 25% меньше и больше, чем в момент посадки. Поясним, как были получены эти кривые. Считаем, что рассеяние в атмосфере близко к консервативному. Тогда, согласно [3], отношение интенсивности излучения внутри слоя (кроме самого верхнего) к интенсивности на его нижней границе — величина, не за-

Оптические параметры атмосферы Венеры

h, км	Данные из [2]		Случай I			Случай II.1		
	τ	λ	τ		λ	τ		λ
			а	б		а	б	
								СА
60—49	42	1.0	69	13	1.0	52	17	1.0
49—32	4.2	1.0	4.2	4.2	1.0	10.0	10.0	1.0
32—0	11.6	0.9996	11.6	11.6	0.9996	15.5	15.5	1.0
								СА
60—50	18	1.0	43	6	1.0	23	5	1.0
50—32	5.9	1.0	5.9	5.9	1.0	8.0	8.0	1.0
32—0	11.6	1.0	11.6	11.6	1.0	12.2	12.2	1.0

висящая от свойств вышележащей среды. Ввиду сделанного предположения, что в рассматриваемом случае изменяются лишь свойства облачного слоя (его оптическая толщина), для нижележащей атмосферы значения этих отношений могут быть легко вычислены по данным измерений (т. е. с использованием сплошных линий на рисунке *a, б*). После этого, учитывая, что величина I на поверхности должна изменяться на 25 % по сравнению с измеренной, легко найти интенсивность излучения на любой высоте в атмосфере, лежащей ниже облачного слоя. Для облачного слоя соответствующие кривые построены «на глаз» с учетом нормировки на высоте $h \approx 60$ км. Отметим, что для нахождения оптической толщины облачного слоя определяющую роль в первом случае играет высотный профиль в нижележащей атмосфере, так как всегда можно согласовать расчетные и измеренные данные для облачного слоя, выделяя в нем несколько слоев различной оптической плотности.

Затем с помощью принятого метода проведены расчеты внутреннего поля излучения в атмосфере при разных значениях τ_0 . Для нижележащих слоев использована модель, полученная в [2] и приведенная в таблице. Из условия наилучшего согласия расчетных результатов с кривыми *Ia* и *Iб* (рисунок) определены величины τ_0 , соответствующие 25 %-ному уменьшению и увеличению освещенности на поверхности. Полученные значения τ для высот 60—49 (50) км приведены в таблице (случай *Ia* и *Iб*).

С л у ч а й II. Исходя из того, что после посадки СА в атмосфере Венеры происходили явления, вызвавшие изменения освещенности на поверхности, есть основания предполагать, что нечто подобное могло быть и в процессе спуска аппаратов в атмосфере. Тогда, учитывая, что приведенные в [7] данные охватывают временной интервал продолжительностью примерно 1 ч, они должны соответствовать некоторой «усредненной» среде. Поэтому необходимо попытаться как-то подкорректировать данные из [7], построив две зависимости интенсивности от высоты, соответствующие началу и концу измерений.

Предположим, что в течение работы спектрометров на обоих СА в атмосфере Венеры происходили явления, которые привели к тому, что полученные в [7] при посадке величины I на поверхности оказались на 25 % больше по сравнению с моментом начала измерений. На рисунке штриховыми кривыми *Ia* нанесены полученные нами высотные профили интенсивности излучения, соответствующие началу, а кривыми *Iб* — концу измерений (сплошные линии — данные из [7]). При построении кривых *Ia* принято во внимание, что, согласно [1], в облачном слое спуск аппаратов продолжался примерно 10 мин. Ввиду относительной малости этого промежутка времени мы допустили, что за это время свойства атмосферы не изменялись, так что данные из [7], отно-

Случай II. 2			Случай III. 1			Случай III. 2		
τ		λ	τ		λ	τ		λ
<i>a</i>	<i>б</i>		<i>a</i>	<i>б</i>		<i>a</i>	<i>б</i>	

«Венера-13»

22	9	1.0	31	50	1.0	28	46	1.0
3.0	3.0	1.0	5.0	5.0	1.0	4.0	4.0	1.0
8.7	8.7	0.99	9.3	9.3	1.0	8.7	8.7	0.999

«Венера-14»

13	3	1.0	16	30	1.0
4.0	4.0	1.0	3.0	3.0	1.0
8.7	8.7	0.994	8.7	8.7	1.0

сящиеся к облачному слою, правильно отражают состояние атмосферы в момент начала измерений, т. е. кривая *IIa* для облачного слоя совпадает со сплошной линией. Что же касается нижележащей атмосферы, то для нее профили *IIa* найдены с учетом предположения, что в момент начала измерений величина *I* на поверхности была на 25 % меньше, чем во время посадки, т. е. измеренное значение интенсивности на поверхности сдвинуто на 25 % влево. При получении высотных зависимостей *IIб* (соответствующих концу измерений) интенсивность на поверхности полагалась равной измеренной, а для других высот они определялись с помощью кривых *IIa* точно таким же способом, как описано выше для случая I.

С помощью кривых *IIa* определены оптические параметры атмосферы Венеры в момент начала измерений на СА. Проводилось это так же, как в [2], т. е. выполнены расчеты внутреннего поля излучения на разных высотах в атмосфере для большого числа моделей и из условия наилучшего совпадения (минимального отклонения) расчетных данных и кривых *IIa* определялись оптические характеристики атмосферы. При этом размер частиц в облачном слое и подоблачной дымке (до высоты $h=32$ км) по аналогии с [2] принимался равным 1 и 0.1 мкм соответственно, а альbedo однократного рассеяния $\lambda=1$. Что же касается нижележащей атмосферы, то поскольку, учитывая полученные в [2] данные, нельзя исключить наличие в ней поглощения (т. е. величина λ может быть отлична от единицы), мы рассмотрели две модели, отражающие два крайних случая: 1) рассеяние в атмосфере ниже 32 км — консервативное ($\lambda=1$), оптическая толщина слоя не известна; 2) нижний слой — чисто газовый, т. е. его оптическая толщина известна, но не известно значение λ .

Таким образом, для первой модели определены такие оптические параметры, как оптические толщины облачного слоя (ниже 60 км), подоблачной дымки и нижней атмосферы Венеры, которые приведены в таблице (случай II.1a). Во втором случае найдены оптические толщины облачного и подоблачного слоев, а также поглощение в нижней атмосфере (случай II.2a). Все эти данные относятся к моменту начала измерений на СА. Видно, что полученные значения параметров существенно зависят от принятой модели нижней атмосферы. Именно, в случае II.1 все выделенные в атмосфере Венеры слои оказались существенно более плотными. Кроме того, найденная величина оптической толщины слоя, лежащего ниже 32 км, свидетельствует о том, что в нем должно содержаться значительное количество мелкого аэрозоля. Следует отметить, что трудно оценить, какая из полученных моделей более достоверна. Эта неоднозначность связана, в частности, с тем, что телевизионный эксперимент относится лишь к видимому участку спектра. Поэтому мы не можем проверить, насколько полученные модели удовлетворяли бы наблюдениям для других длин волн. Что касается $\lambda=0.620$ мкм, то высотные профили интенсивности, рассчитанные с параметрами модели II.2 (т. е. с поглощением в нижнем слое), лучше согласуются с кривыми *IIa* (особенно для СА «Венера-13»), чем для модели II.1.

Чтобы выяснить, как могла измениться величина τ_0 к моменту посадки СА, нами проведены расчеты поля излучения в атмосфере, у которой варьировались значения τ_0 , а характеристики нижележащих слоев оставались такими, как и для начала измерений. Полученные из условия наилучшего совпадения расчетных данных с кривыми *IIб* величины τ приведены в таблице (случаи II.1б и II.2б). Легко видеть, что изменения τ весьма значительны.

С л у ч а й I I I. Допустим, что процессы, происходившие во время спуска аппаратов, привели к тому, что представленные в [7] интенсивности излучения на поверхности оказались на 25 % меньше, чем в начале измерений. Как и в случае II, мы построили высотные профили ин-

тенсивности для начала (кривая IIIa) и конца (IIIб) измерений и определили соответствующие им параметры атмосферы. Все эти данные также приведены в таблице. Обратим внимание, что в этом случае для СА «Венера-14» атмосфера, лежащая ниже высоты $h=32$ км, оказалась чисто газовой с консервативным рассеянием. Что же касается результатов, полученных на СА «Венера-13», то и для них параметры моделей III.1 и III.2 мало различаются между собой.

Прокомментируем полученные результаты. В первую очередь необходимо еще раз подчеркнуть, что наши оценки имеют приближенный характер. Связано это, по крайней мере, с тем, что трудно сказать, насколько корректны все «исправленные» высотные профили интенсивности излучения. Определенным критерием достоверности результатов могут служить найденные ранее из нефелометрических экспериментов, проведенных на СА «Венера-9» — «Венера-14» и «Пионер-Венера», оценки величины оптической толщины ($\tau=10-30$) для интервала высот $h \approx 60-48$ км и $\lambda=0.6$ мкм (см., например, [5, 6]). Полученные нами возможные вариации оптической толщины облачного слоя, как видно из таблицы, охватывают существенно более широкий диапазон значений τ . Однако приведенные в [5] данные для СА «Венера-13, -14» (с учетом пересчета на длину волны $\lambda=0.62$ мкм) хорошо согласуются с нашими результатами для случаев II.2a («Венера-13») и III.1a («Венера-14»). На этом основании вполне возможно, что во время спуска аппаратов оптические свойства атмосферы Венеры были близки к полученным нами для случаев II.2 и III.1 соответственно.

Кроме того, наши количественные оценки показывают, что зарегистрированные в результате телевизионного эксперимента изменения освещенности на поверхности Венеры действительно можно объяснить значительными быстрыми изменениями оптической толщины только облачного слоя. Такие явления весьма вероятны из-за больших скоростей ветра в облачном слое и его возможной ячеистой структуры (см. [9]). Действительно, изменение освещенности в течение 1 ч (при скорости ветра примерно 80 м/с в облачном слое на высотах 50—60 км) целиком можно объяснить существованием в нем ячейки радиусом не менее 260 км.

Следует особо обратить внимание на различия оптических параметров атмосферы, найденных в [2] при условии стационарности среды и полученных в настоящей работе с учетом возможных быстрых изменений светового режима в процессе спуска аппаратов. При этом существенно различаются оценки оптических параметров для всей атмосферы. Это свидетельствует о том, что возможность существования в атмосфере Венеры быстротечных процессов делает весьма проблематичным корректное определение ее структуры по данным одних лишь спектрофотометрических измерений на разных высотах. Наконец, полученные оценки, с нашей точки зрения, дают представление о том, как вообще могут повлиять погрешности таких измерений на точность определения параметров атмосферы.

1. Авдудевский В. С., Добров А. В., Иванов Н. М. и др. Анализ траекторий снижения спускаемых аппаратов «Венера-13» и «Венера-14» в атмосфере планеты // Космич. исслед.— 1983.—21, вып. 2.— С. 163—170.
2. Длугач Ж. М. Структура атмосферы Венеры по данным оптических измерений, проведенных на СА «Венера-11, 13, 14» // Астрон. вестн.— 1988.—22, № 3.— С. 262—271.
3. Длугач Ж. М., Яновицкий Э. Г. Поле излучения в атмосфере Венеры для двухслойной модели ее строения // Физика планетных атмосфер.— Киев: Наук. думка, 1981.— С. 3—27.
4. Длугач Ж. М., Яновицкий Э. Г. Рассеяние света в многослойных атмосферах. I. Задача о диффузном отражении // Астрофизика.— 1985.—23, вып. 2.— С. 337—348.
5. Ксанфомалити Л. В. Планета Венера.— М.: Наука, 1985.—376 с.

6. Маров М. Я., Бышев Б. В., Баранов Б. П. и др. Исследования структуры облаков Венеры при помощи нефелометров на станциях «Венера-13» и «Венера-14» // Космич. исслед.—1983.—21, вып. 2.— С. 269—278.
7. Мошкин Б. Е., Экономов А. П., Мороз В. И. и др. Спектрофотометрический эксперимент на спускаемых аппаратах «Венера-13» и «Венера-14». I. Методика, результаты и предварительный анализ измерений // Там же.— С. 236—245.
8. Селиванов А. С., Гектин Ю. М., Герасимов М. А. и др. Продолжение телевизионного исследования поверхности Венеры со спускаемых аппаратов // Там же.— С. 176—182.
9. Селиванов А. С., Гектин Ю. М., Нараева М. К. и др. О динамических явлениях, зарегистрированных на панорамах поверхности Венеры, переданных АМС «Венера-13, 14» // Там же.— С. 200—204.
10. Яновицкий Э. Г. Принципы инвариантности и интегральные соотношения для полей излучения в плоской атмосфере // Астрон. журн.—1979.—56, вып. 4.— С. 833—844.
11. Boyer Ch., Camichel H. Observations photographiques de la planète Vénus // Ann. Astrophys.—1961.—24, N 6.— P. 531—535.
12. 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 27.10.87,
после доработки 14.12.87

Научные конференции

СИМПОЗИУМ МАС № 140 «МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В ГАЛАКТИКАХ»

Состоится 19—23 июня 1989 г. в Бонне или Гейдельберге (ФРГ). Научная программа: магнитные поля в Галактике и других галактиках; межгалактические магнитные поля; методы измерения магнитных полей.