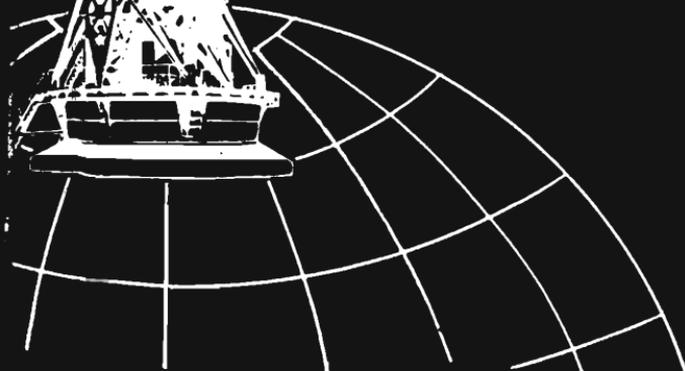


А. Д. КУЗЬМИН

ПЛАНЕТА ВЕНЕРА



А. Д. КУЗЬМИН

ПЛАНЕТА ВЕНЕРА



Москва «Наука»
Главная редакция
физико-математической литературы
1981

22.654
К 89
УДК 523.4

- Кузьмин А. Д.**
К 89 Планета Венера.— М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы. 1981.— 96 с., ил.,— 15 к.

Планета Венера — одна из наиболее интересных планет Солнечной системы. Увлекательно и доступно автор рассказывает о необычной атмосфере Венеры, о ее удивительных облаках, о поверхности и рельефе планеты. Особенно интересны результаты изучения планеты, выполненные советскими космическими аппаратами серии «Венера», побывавшими в атмосфере планеты и на ее поверхности.

К $\frac{20604-105}{053(02)-81}$ БЗ № 87-2-80. 1705050000

ББК 22.654.1
526

К $\frac{20604-105}{053(02)-81}$ БЗ № 87-2--80. 1705050000

© Издательство «Наука»
Главная редакция
физико-математической
литературы, 1981

ПРЕДИСЛОВИЕ

Планета Венера занимает особое место в астрономии. Открытая еще древними, самая близкая к Земле планета Солнечной системы и самое яркое на небе светило после Солнца и Луны, она тем не менее веками оставалась загадочной планетой. Причиной этого являлся плотный облачный слой, делающий ее практически недоступной для оптических наблюдений. Близость размеров и масс Венеры и Земли породили ряд гипотез о сходстве физических условий на Венере с земными. Важную роль в этом сыграло подспудное желание исследователей найти во Вселенной жизнь и даже себе подобных «братьев по разуму». Однако за последние два десятилетия развитие радиоастрономии, а в дальнейшем космической техники, в корне изменили эти представления. Ученые узнали о Венере намного больше, чем за многовековую историю предыдущих исследований. Радиоастрономия и радиолокационная астрономия дали возможность «разглядеть» поверхность загадочной планеты, определить ее температуру, рельеф, скорость вращения вокруг осп. Космические аппараты позволили осуществить зондирование атмосферы Венеры и определить ее состав, давление, распределение температуры по высоте, скорость ветра, освещенность. Оказалось, что Венера — уникальная планета, существенно отличная как от Земли, так и от других планет Солнечной системы. К сожалению, температура поверхности оказалась очень высокой и от мысли о возможности существования жизни на Венере пришлось отказать. Однако изучение Венеры существенно обогатило науку в понимании эволюции планет, планетной климатологии, в том числе и нашей планеты Земля.

Мы постараемся рассказать в этой небольшой книге о новых методах исследования Венеры, основных новых результатах и о том, что мы знаем сейчас о природе этой планеты.

Книга рассчитана на широкий круг читателей и не претендует на исчерпывающее изложение всех данных, известных о планете Венера. Выбор материала и его изложение отражают, естественно, круг интересов автора.

Автор считает также своим долгом отметить, что приведенные в книге данные о планете Венера являются результатом большого труда многих ученых и научно-технических коллективов, перечислить которые в популярной книге не представляется возможным. Автор благодарит советских и зарубежных коллег, приславших материалы для включения в книгу. Автор благодарен В. И. Морозу за деловые замечания, которые помогли улучшить рукопись.

Все пожелания и критические замечания будут приняты с благодарностью.

А. Д. Кузьмин

ГЛАВА I

ВЕНЕРА КАК ПЛАНЕТА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Астрономия — одна из древнейших наук. Она возникла из практических потребностей человека. Кочевникам, скотоводам, путешественникам и особенно мореплавателям нужно было ориентироваться при своих передвижениях. Они заметили, что Солнце, Луна и звезды всегда восходят на востоке, поднимаются выше всего над горизонтом на юге и заходят на западе.

Земледельцы должны были знать сроки проведения полевых работ. Они научились определять наступление различных сезонов года по высоте Солнца и по появлению на ночном небе определенных звезд. Так, еще за 3000 лет до нашей эры египетские жрецы подметили, что разливы Нила наступали вскоре после того, как самая яркая из звезд — Сириус — появлялась на востоке перед восходом Солнца. Повторяемость фаз Луны, изменения высоты Солнца над горизонтом, положения звезд на небе создали основу для измерения времени и летосчисления.

Все это требовало систематических наблюдений небесных светил и их движения. В процессе наблюдений обнаружилось, что взаимное положение большинства звезд неизменно. Однако несколько ярких звезд оказались блуждающими по небу. По-гречески блуждающий — «плапетас», поэтому эти звезды назвали планетами. Одной из таких планет, перемещение которой среди звезд было наиболее быстрым, дали имя Меркурий в честь мифологического бога торговли, дорог, вестника богов, который отличался большой подвижностью. Другая планета за свой красный цвет была названа по имени бога войны Марсом.

Одна из планет превосходит по своей яркости все звезды и бывает видна даже днем. Вавилоняне описывали эту планету как «яркий факел небес» и называли ее именем матери богов Иштар. Считалось, что Иштар ниспосылает людям изобилие. В связи с красотой этой планеты многие народы ассоциировали ее с женщиной. В Китае ее называли Тай-пи, или Белоликая красавица. В честь римской богини любви и красоты планету называли Венерой.

Непосредственные ощущения человека, его житейский опыт создавали впечатление неподвижности Земли. В наблюдениях небесных явлений тоже не было прямых указаний на движение Земли. Поэтому древние астрономы считали, что Солнце, Луна, звезды и планеты движутся вокруг неподвижной Земли. Наивысшее развитие эта точка зрения получила в труде Птолемея «Альмагест» (II век н. э.).

В основе системы мира Птолемея лежат четыре постулата: 1) центром Вселенной является Земля (поэтому эта система называется *геоцентрической*); 2) Земля неподвижна; 3) все небесные тела движутся вокруг Земли; 4) движение небесных тел происходит по кругам с постоянной скоростью. Однако «блуждания» планет по небу среди звезд имеют весьма сложный вид и не соответствуют указанным постулатам. Венера всегда находится на небе либо в том же созвездии, что и Солнце, либо в соседнем. При этом она может находиться и к востоку и к западу от Солнца, но никогда не удаляется от него дальше, чем на 48° , и поэтому, в частности, никогда не бывает видна поздно ночью.

Марс и Юпитер движутся среди звезд по еще более сложным траекториям, изменяя как скорость, так и направление движения. Для объяснения этого явления Птолемей ввел систему эпициклов, согласно которой планета движется по маленькому кругу — «эпициклу», центр которого в свою очередь вращается вокруг Земли по большому кругу — «деференту», причем для Венеры центр эпицикла всегда находится на прямой линии, соединяющей Солнце и Землю (рис. 1).

Система Птолемея с достаточной для практических потребностей того времени точностью описывала видимое движение планет и объясняла, почему Венера никогда не появляется на большом угловом расстоя-

нии от Солнца и даже позволяла предвычислять положения планет на небе с точностью, удовлетворявшей несовершенным наблюдениям невооруженным глазом.

Религия сделала птолемеевскую геоцентрическую систему мира одним из основных догматов церкви.

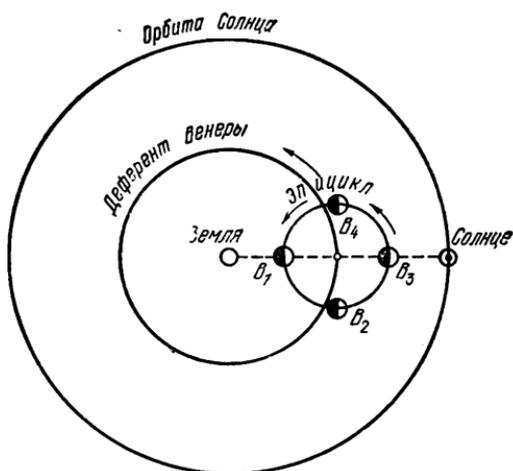


Рис. 1. Движение Венеры вокруг Земли по схеме эпциклов Птолемея.

Господствующее положение церкви в средние века исключало какие-либо другие модели мира, не соответствующие догмату церкви. Поэтому развитие астрономии было заторможено на многие столетия. Расхождения же теории с наблюдениями, которые выявлялись по мере накопления новых наблюдательных данных и повышения их точности, пытались устранить путем усложнения системы Птолемея. Так, например, для объяснения неправильностей в движениях планет был введен второй эпицикл, центр которого движется по окружности первого эпицикла, а планета движется по окружности второго эпицикла. Однако даже при таком усложнении системы она не удовлетворяла требованиям, которые предъявлялись к астрономии жизнью.

И лишь в эпоху великих географических открытий, когда для далеких путешествий через океан потребовались более точные методы ориентировки и

исчисления времени, совершенствование астрономических знаний и теории движения планет, а также накопленный наблюдательный материал подготовили почву для революционной в астрономии. Эту революцию произвел польский ученый Николай Коперник (1473—1543), разработавший *гелиоцентрическую* систему мира. Основными положениями этой системы являются следующие: 1) центром мира является Солнце, а не Земля; 2) Земля и планеты движутся около Солнца и вращаются вокруг своих осей; 3) планеты обращаются вокруг Солнца по круговым орбитам; 4) планеты движутся по орбитам с постоянными скоростями, зависящими от расстояний до Солнца: чем ближе орбита к Солнцу, тем больше скорость движения планеты по орбите.

При этом сложные видимые движения планет можно было просто объяснить как результат сочетания двух действительных движений — движения планеты и движения Земли по орбитам вокруг Солнца.

Планеты, в отличие от звезд, не имеют собственного свечения и подобно Луне лишь отражают солнечные лучи. Освещена лишь половина планеты, обращенная к Солнцу. Поэтому движение Венеры должно сопровождаться непрерывным изменением ее вида для земного наблюдателя. Однако характер этого изменения в системах мира Птолемея и Коперника совершенно различен. В птолемеевской системе (см. рис. 1) Венера видна лишь как серп, когда к Земле обращена часть освещенного полушария планеты (положения B_2 и B_4). В положениях B_1 и B_3 к Земле обращено неосвещенное полушарие и планета окажется невидимой. В виде полного освещенного диска или даже в виде половины его Венера в этой схеме никогда не может быть видна.

В системе Коперника (рис. 2) Венера должна подобно Луне проходить все фазы освещенности от узкого серпа до полностью освещенного диска, подобно Луне в новолуние.

Однако в связи с малым угловым размером Венеры такие изменения вида планеты нельзя увидеть невооруженным глазом. Галилей, впервые применивший телескоп для астрономических наблюдений, провел наблюдения Венеры. По наблюдениям Галилея вид Венеры действительно изменяется и ее фазы анало-

гичны фазам Луны (рис. 3). Более того, так как в положении, когда диск Венеры освещен, она находится на большом расстоянии от Солнца, угловой диаметр диска оказался меньше углового диаметра серпа.

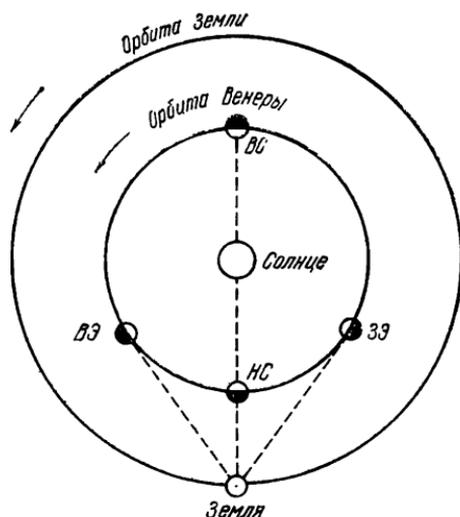


Рис. 2. Схема движения Венеры в системе мира Коперника. *НС* — нижнее соединение, *ВС* — верхнее соединение, *ВЭ* — восточная элонгация, *ЗЭ* — западная элонгация.

Таким образом, наблюдения фаз Венеры, проведенные Галилеем, дали одно из первых экспериментальных подтверждений правильности гелиоцентрической

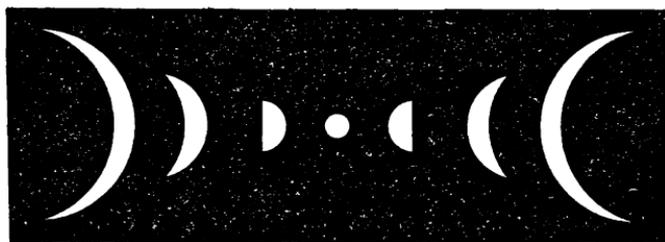


Рис. 3. Фазы Венеры.

системы Коперника. В 1609—1618 гг. система Коперника была усовершенствована Кеплером, который показал, что планеты движутся не по круговым, а по

эллиптическим орбитам, в одном из фокусов которых (общем для всех планет) находится Солнце, причем квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца пропорциональны кубам больших полуосей их эллиптических орбит.

Знание законов движения планет в сочетании с накопленными наблюдательными данными дали возможность установить, что Венера обращается вокруг Солнца по эллиптической орбите, плоскость которой наклонена к плоскости земной орбиты на $3^{\circ} 24'$. Однако эксцентриситет столь мал (0,0068), что орбита Венеры является почти круговой. Период обращения планеты вокруг Солнца, т. е. длительность венерианского года (сидерический период) составляет 224,7 земных суток. Следовательно, большая полуось орбиты Венеры a_2 меньше большой полуоси орбиты Земли a_{\oplus} в

$$\sqrt[3]{\left(\frac{T_{\oplus}}{T_{\varphi}}\right)^2} = \sqrt[3]{\left(\frac{365,3}{224,7}\right)^2} = 1,38 \text{ раза,}$$

и равна $a_2 = 0,723$ астрономической единицы.

Аналогичным образом были определены относительные размеры орбит других планет, выраженные в единицах большой полуоси Земли или среднего расстояния от Земли до Солнца, принятого за астрономическую единицу (а. е.). Однако сама величина астрономической единицы и, следовательно, абсолютные значения всех расстояний в Солнечной системе в ту эпоху не были известны.

Один из методов измерения расстояния от Земли до Солнца основан на наблюдении «прохождения» Венеры по диску Солнца.

Положение Венеры на орбите между Землей и Солнцем называется *нижним соединением* (на рис. 2 положение *НС*).

Если бы орбиты Венеры и Земли лежали в одной плоскости, то в каждом нижнем соединении Венера оказывалась бы точно между Землей и Солнцем и для земного наблюдателя «проходила» бы в своем движении по диску Солнца. Для двух наблюдателей, находящихся в двух удаленных точках земного шара, моменты видимого касания Венерой диска Солнца будут различны. По измеренной разности этих момен-

тов и известному расстоянию между пунктами легко вычислить расстояние от Земли до Солнца *). Однако из-за наклона орбиты Венеры к орбите Земли такие прохождения происходят очень редко, примерно два раза в столетие. Одно из них ожидалось 6 июня 1761 г. В числе ученых, принимавших участие в этих наблюдениях, был первый русский академик М. В. Ломоносов.

Проводя наблюдения в Петербурге, М. В. Ломоносов заметил, что в начале прохождения, когда Венера только небольшой частью нашла на солнечный диск, возникло «тонкое как волос сияние», окружившее часть диска планеты, еще не вступившую на солнечный диск. Аналогичное явление наблюдалось и при сходе с солнечного диска, когда диск планеты как бы приподнял солнечный край, в результате чего «появился на краю Солнца пупырь, который тем явственнее учинялся, чем ближе Венера к выступлению приходила». М. В. Ломоносов же дал и правильное объяснение открытому им новому явлению, написав: «Сие ничто иное показывает, как преломление лучей солнечных в Венериной атмосфере».

Отсюда М. В. Ломоносов сделал вывод, что «...планета Венера окружена знатною воздушной атмосферой, таковой (лишь бы не большею), какова обливается около нашего шара Земного». Так была открыта атмосфера Венеры.

Ближайшее прохождение Венеры по диску Солнца произойдет 6 июня 2004 г.

Однако точность определения астрономической единицы описанным методом была низкой. В последующие годы был проведен ряд измерений этой величины другими методами. Но и погрешности этих измерений, как оказалось, достигали $50 \div 70$ тыс. км. Наиболее точные измерения астрономической единицы также были произведены по наблюдениям Венеры с использованием радиолокации этой планеты.

Посылая к Венере импульсный радиосигнал и измеряя запаздывание Δt прихода этого сигнала, отраженного от планеты, можно с высокой точностью (точнее,

*) Наиболее точное на сегодня определение астрономической единицы также произведено по наблюдениям Венеры на основе радиолокации этой планеты.

чем 10 км) определить расстояние до планеты,

$$r = \frac{1}{2} c \Delta t,$$

где c — скорость света, и величину астрономической единицы, $A. E. = 149\,597\,890$ км. Кардинальное уточнение астрономической единицы имело принципиальное значение для космонавтики, так как стало возможным точно выводить космические аппараты к Венере и другим планетам и даже производить их посадку в заданных районах поверхности.

По современным представлениям Солнечная система состоит из одной звезды — Солнца и девяти планет: Меркурия, Венеры, Земли, Марса, Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна и Плутона. Среднее расстояние от Солнца самой близкой планеты Меркурия равно 58 млн. км, самой далекой — Плутона — 5900 млн. км. Среднее расстояние Венеры от Солнца составляет 108 млн. км, средняя скорость ее движения по орбите 35 км/с. В нижнем соединении к Земле обращена темная, не освещенная Солнцем сторона планеты (см. рис. 3). Эта фаза аналогична новолунию. В нижнем соединении Венера ближе всего к Земле, расстояние до нее меньше, чем до Марса в великие противостояния. Положение BC , когда Венера находится для земного наблюдателя за Солнцем (см. рис. 2), называется *верхним соединением*. В этой фазе к Земле обращена освещенная половина Венеры, что аналогично полнолунию. В остальных положениях диск планеты проходит все промежуточные фазы частичной освещенности. Интервал времени между двумя одинаковыми фазами, называемый синодическим периодом, равен в среднем 584 земным суткам, или $\frac{8}{11}$ земного года. Благодаря такому кратному соотношению синодического периода Венеры и земного года каждые 8 лет соединения Венеры повторяются практически в одни и те же даты. Список соединений Венеры с 1956 до 2000 гг., заимствованный нами из книги П. Мура «Планета Венера», дан в табл. 1.

Венера — самое яркое светило на небе после Солнца и Луны — хорошо видна невооруженным глазом. Условия ее видимости зависят от фазы планеты. Около соединений Венера находится в том же направле-

Таблица 1

Данные о соединениях Венеры с 1956 по 2000 гг.

Нижние соединения			Верхние соединения		
Год	Дата	Видимый диаметр, угловые секунды	Год	Дата	Видимый диаметр
1956	22 июня	58	1957	14 апреля	10"
1958	28 января	63	1958	11 ноября	10
1959	1 сентября	59	1960	22 июня	10
1961	11 апреля	59	1962	27 января	10
1962	12 ноября	63	1963	30 августа	10
1964	19 июня	58	1965	12 апреля	10
1966	26 января	63	1966	9 ноября	10
1967	29 августа	59	1968	20 июня	10
1969	8 апреля	59	1970	24 января	10
1970	10 ноября	63	1971	27 августа	10
1972	17 июня	58	1973	9 апреля	10
1974	23 января	63	1974	6 ноября	10
1975	27 августа	59	1976	18 июня	10
1977	6 апреля	59	1978	22 января	10
1978	7 ноября	63	1979	25 августа	10
1980	15 июня	58	1981	7 апреля	10
1982	21 января	63	1982	4 ноября	10
1983	25 августа	58	1984	15 июня	10
1985	3 апреля	60	1986	19 января	10
1986	5 ноября	62	1987	23 августа	10
1988	13 июня	58	1989	5 апреля	10
1990	19 января	63	1990	1 ноября	10
1991	22 августа	58	1992	13 июня	10
1993	1 апреля	60	1994	17 января	10
1994	2 ноября	62	1995	20 августа	10
1996	10 июня	58	1997	2 апреля	10
1998	16 января	63	1998	30 октября	10
1999	20 августа	58	2000	11 июня	10

нии, что и Солнце и скрыта в его лучах. Самое благоприятное время для наблюдений Венеры — по вечерам после наибольшей восточной элонгации, происходящей примерно за 2,5 месяца до нижнего соединения. Приблизительно за 1,5 месяца до нижнего соединения Венера достигает наибольшей яркости и ее можно увидеть даже днем невооруженным глазом, если точно знать ее положение на небе. После нижнего соединения аналогичные условия видимости планеты наступают по утрам в западной элонгации. В эти наиболее благоприятные для наблюдений интервалы Венера хорошо видна на небе выше Солнца как очень яркая звезда. В городе ее можно принять за электрическую лампочку на башенном кране. Многие принимали Венеру за «летающую тарелку», а в 1945 г. на американском атомном полигоне в Лос-Аламосе ее даже обстреляли из зенитных орудий. Ближайшее нижнее соединение Венеры будет 21 января 1982 г. Этому соединению будет предшествовать очень благоприятный период вечерней видимости Венеры в декабре 1981 г. в западной стороне неба. В конце лета и осенью 1982 г. Венера вновь будет удобна для наблюдений по утрам, а затем будет невидимой до середины 1983 г. (см. «Астрономический Календарь» на соответствующие годы).

Наблюдения М. В. Ломоносова прохождения Венеры по диску Солнца в 1761 г., открывшие атмосферу Венеры, были первой работой по изучению физических условий на планете Венера. Однако открытая им атмосфера Венеры оказалась столь «знатною», что многочисленные попытки исследования поверхности Венеры с помощью оптических телескопов, принимавшиеся в течение двух последних столетий, оказались безрезультатными. В телескопы видно лишь, что Венера постоянно покрыта сплошным облачным слоем.

Поэтому не были определены такие фундаментальные характеристики планеты, как температура, агрегатное состояние вещества, рельеф и топография, не были известны даже диаметр, направление и скорость вращения планеты вокруг оси. Поэтому о физических условиях на поверхности строились только гипотезы. Наиболее распространенными были следующие три гипотезы.

1) Условия на Венере аналогичны тем, которые имели место на Земле в каменноугольный период, иными словами, на всей планете был теплый влажный

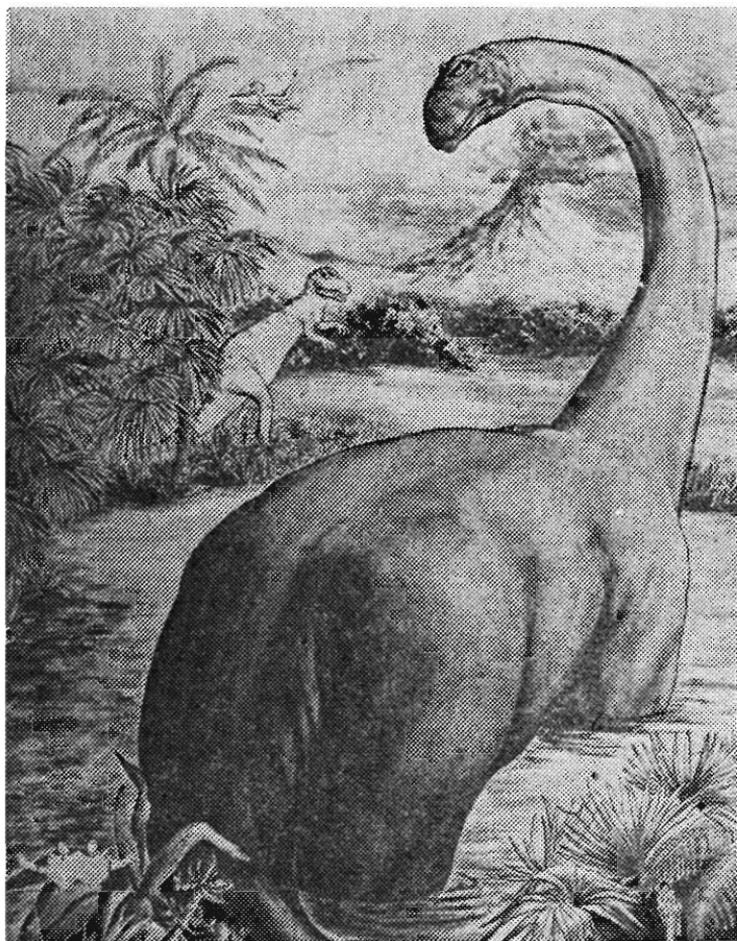


Рис. 4. Палеозойская эра.

климат, а ее органический мир находился примерно на такой же ступени развития, что и на Земле в конце палеозойской эры (рис. 4).

2) Поверхность Венеры — сплошная абсолютно безводная пустыня.

3) Поверхность Венеры — сплошной океан. Предполагалось даже, что океан на Венере может быть нефтяным и облака Венеры также состоят из капель нефти.

Столь значительное различие гипотез показывало, как скудны были наши сведения о Венере. Недаром ее называли планетой загадок.

При всем различии и противоречивости указанных гипотез в них есть одна общая черта — подобие с палеозойской эрой Земли, пустыней Земли, земным океаном и другими земноподобными условиями. Это подобие основано на внешнем сходстве Венеры с Землей по размерам, массе, средней плотности, расстоянию от Солнца.

Размеры, масса и плотность планет Солнечной системы изменяются в очень широких пределах. Так, диаметр Юпитера больше земного в 10,5 раза, а масса в 318 раз больше массы Земли, диаметр Меркурия в 2,5 раза, а масса в 18 раз меньше массы Земли. Расстояние Плутона от Солнца примерно в 100 раз больше, чем Меркурия.

Видимый с Земли угловой диаметр Венеры изменяется от 63" в нижнем соединении до 10" в верхнем соединении, что соответствует радиусу около 6100 км. Этот радиус, определенный из оптических наблюдений, не является, однако, радиусом самой планеты, так как оптически наблюдается не поверхность планеты, а ее облачный слой. Поэтому 6100 км — радиус облачного слоя, а не твердого тела планеты. Для определения истинного радиуса планеты были использованы радиоволны, которые, в отличие от электромагнитного излучения видимой части спектра, проникают через облака. На основе радиоастрономических и радиолокационных измерений радиус Венеры найден равным 6050 км. Подробно о методах и результатах радиоастрономических исследований и планетной радиолокации будет рассказано ниже. Таким образом, радиус Венеры близок к радиусу Земли, а площадь ее поверхности и объем составляет соответственно 90 и 86% земных.

Наиболее точные определения массы Венеры получены по результатам измерений, выполненных с космическим аппаратом «Маринер-10», пролетевшим около планеты в 1974 г. В соответствии с этими резуль-

татами отношение массы Солнца к массе Венеры было найдено равным $408\,523,9 \pm 1,2$, т. е. масса Венеры составляет 81,5% массы Земли. Из приведенных данных нетрудно определить, что средняя плотность Венеры равна $5,27 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ (для Земли соответствующая величина равна $5,52 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$).

Ускорение свободного падения у поверхности на экваторе Венеры равно $8,87 \text{ м/с}^2$. Вторая космическая скорость — $10,3 \text{ км/с}$. Таким образом, по размерам, массе, плотности Венера весьма близка к Земле. Незначительно различаются для этих двух планет и потоки солнечной энергии, что дало основание называть Венеру близнецом Земли и предполагать, что физические условия на обеих планетах очень похожи. Из сходства этих внешних данных делался далеко не очевидный и, как выяснилось в дальнейшем, даже ошибочный вывод о том, что температура, давление и состав атмосферы на Венере тоже мало отличаются от земных, а если это так, то не исключалась и возможность жизни на Венере, в том числе ее высших форм.

Какова же действительная природа Венеры? Каковы ее поверхность, атмосфера? Из чего состоят облака? Что происходит под ее облачным слоем?

ГЛАВА II

ПОВЕРХНОСТЬ ВЕНЕРЫ

Температура

Один из основных параметров, характеризующих физические условия на планете — температура ее поверхности. В частности, температура является важнейшим фактором, определяющим возможность возникновения и развития жизни. Основным источником знаний об окружающем нас мире служит эксперимент. Однако до постановки эксперимента ученые обычно производят оценку того, что они ожидают получить, основываясь на уже имеющихся данных и общих законах физики.

Такая оценка была произведена и для ожидавшейся температуры Венеры. Температура планеты устанавливается в результате равновесия двух противоположных процессов: нагрева планеты Солнцем и ее охлаждения за счет теплового излучения самой планеты (как нагретого тела) в окружающую среду. В установившемся режиме энергия теплового излучения планеты должна быть равна энергии, получаемой планетой от Солнца. Аналитически уравнение теплового баланса можно записать в виде

$$E/\Delta^2 = \sigma T^4,$$

где Δ — расстояние планеты от Солнца в долях астрономической единицы, E — плотность потока энергии излучения на расстоянии Земли от Солнца (эта величина называется солнечной постоянной), σ — постоянная Стефана — Больцмана, T — температура планеты. Подставляя в это соотношение величину $E = 1,98$ кал/(см² · мин), среднее расстояние Венеры

от Солнца $\Delta = 0,723$ а. е., определим равновесную температуру

$$T_1 = \sqrt[4]{\frac{E}{4\sigma\Delta^2}} = 330 \text{ К.}$$

При выводе последнего соотношения было принято постоянство температуры планеты на всей ее поверхности, что может иметь место при высоких теплопроводности или теплоемкости и быстром вращении. Поэтому считалось, что излучение планеты в окружающее пространство с температурой T происходит со всей ее поверхности. В другом крайнем случае медленного вращения и малой теплопроводности и теплоемкости температура освещенной Солнцем дневной стороны планеты может быть существенно выше, чем у не освещенной Солнцем ночной стороны. В этом случае собственное излучение планеты будет определяться в основном более горячей дневной полусферой и ее равновесная температура будет в $\sqrt{2}$ раз больше температуры изотермической поверхности, т. е. будет равна 460 К.

Очевидно, что найденные выше для двух крайних случаев равновесные температуры Венеры $T_1 = 330$ К и $T_2 = 460$ К являются минимальным и максимальным значениями температуры планеты.

Полученные оценки были «привлекательны» и психологически, так как этот интервал температур более или менее соответствует возможности существования на Венере жизни, а человечеству всегда хотелось и хочется иметь «братьев по разуму», хотя бы младших.

Следующее слово должен был сказать эксперимент. Но как это сделать? На первый взгляд может оказаться непонятным, как можно с Земли экспериментально измерить температуру планеты, отдаленной от нас на десятки миллионов километров. Для ответа на этот вопрос вспомним, что такое температура и как она измеряется.

Как известно, температура есть мера внутренней энергии тела, и поэтому ее нельзя измерить непосредственно. Для определения температуры выбирается какая-либо другая удобная для измерения физическая величина, связанная с температурой известной физи-

ческой закономерностью. Так, например, в медицинском термометре измеряется высота ртутного столбика, изменяющаяся при тепловом расширении ртути. В технике для измерения температуры часто используют другую физическую закономерность — зависимость от температуры сопротивления проводника электрическому току. В этом случае непосредственно

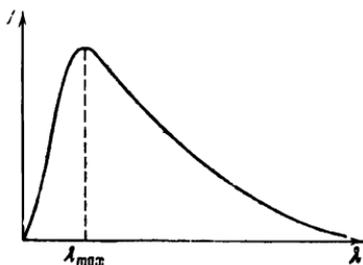


Рис. 5. Спектр теплового излучения нагретого тела.

измеряемой величиной является электрический ток.

Для работы термометров указанных типов нужен тепловой контакт с измеряемым телом. Поэтому для измерений на расстоянии они непригодны. А нельзя ли для нахождения температуры использовать какой-либо другой физический эффект, также связанный определенной

закономерностью с температурой, но проявляющийся на расстоянии от исследуемого тела?

Такое явление есть. Это электромагнитное излучение.

Всякое тело, находящееся при температуре T , отличной от абсолютного нуля (-273°C), излучает электромагнитные волны. Спектр этого излучения (зависимость интенсивности от длины волны) описывается формулой Планка

$$I(\lambda) = \frac{2hc}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hv/kT) - 1}$$

Здесь h — постоянная Планка, c — скорость света, λ и ν — длина волны и частота излучения, k — постоянная Больцмана. Характерный вид этой зависимости приведен на рис. 5.

Тепловое электромагнитное излучение занимает широкий спектральный интервал от ультрафиолетовых лучей до радиоволн. Полная энергия теплового излучения по всему спектру равна σT^4 . Длина волны, соответствующая максимальной интенсивности излучения λ_{max} , связана с температурой T излучающего тела законом Вина:

$$\lambda_{\text{max}} T = 2897 \text{ мкм} \cdot \text{K} = \text{const.}$$

В соответствии с этим максимум электромагнитного излучения Солнца, видимая поверхность которого (фотосфера) имеет температуру около 6000 К, приходится на спектральный интервал видимого излучения. Планеты имеют более низкие температуры и максимум их излучения соответствует инфракрасной части спектра.

Видимое и инфракрасное электромагнитное излучение непосредственно воспринимается нашими органами чувств в виде света или тепла соответственно. Из опыта мы знаем, что интенсивность излучения зависит от температуры: от ярко горящего костра жар больше, чем от тлеющего. Следовательно, измеряя интенсивность электромагнитного излучения, можно определить температуру излучающего тела, и, что важно для нашей задачи, сделать это на расстоянии без прямого контакта с исследуемым телом. Такой принцип применяют для лабораторных и технических измерений температуры пирометрическими приборами, когда по условиям эксперимента не может быть осуществлен прямой контакт с объектом исследования. Можно использовать его и для измерения температуры планеты. Различие здесь чисто техническое: из-за большого расстояния интенсивность излучения планеты мала и для ее регистрации нужны большие телескопы и чувствительные приемники.

Измерения температуры Венеры по ее излучению в инфракрасной части спектра были проведены в 1930 г. Е. Петтитом и С. Николсоном, которые нашли, что температура излучающего тела равна 230 К. Таким образом, температура Венеры, измеренная в инфракрасном диапазоне, близка к земной и, казалось бы, шансы существования на планете жизни увеличиваются.

Именно так использовали эти данные многие писатели-фантасты, например, А. Казанцев в книге «Планета бурь». Однако радость оказалась преждевременной. Как упоминалось выше, планета Венера покрыта сплошным облачным слоем, а облака непрозрачны для инфракрасного излучения. Следовательно, в эксперименте Е. Петтита и С. Николсона была определена температура облачного слоя, а не поверхности планеты. Как же добраться до самой поверхности?

Облака прозрачны для радиоволн. Мы можем слушать радиопередачи, смотреть телевизор и в облачную погоду. Радиолокаторы обнаруживают самолеты, летящие над облаками, а посадка самолетов на аэродром при отсутствии видимости производится по радиомаякам. Поэтому именно радиоволны явились первым источником информации о поверхности Венеры. В радиодиапазоне, где $h\nu \ll kT$, формула Планка упрощается и принимает вид

$$I(\lambda, T) = \frac{2kT}{\lambda^2},$$

т. е. интенсивность излучения прямо пропорциональна температуре.

По аналогии с оптическими телескопами приборы, с помощью которых улавливается и регистрируется радиоизлучение небесных тел, называются радиотелескопами. Подобно оптическому телескопу, содержащему зеркало, собирающее видимое излучение наблюдаемого объекта в фокусе телескопа, где установлен приемник излучения (фотографическая пластинка, фотоэлемент, спектрограф), основной частью радиотелескопа является большая приемная антенна, собирающая радиоизлучение исследуемого объекта в фокус, где установлен радиоприемник.

Из приведенной выше формулы следует, что интенсивность теплового излучения в радиодиапазоне обратно пропорциональна квадрату длины волны, т. е. в радиодиапазоне интенсивность теплового электромагнитного излучения планеты на несколько порядков меньше, чем в инфракрасном. Следовательно, практическая реализация такого эксперимента особенно сложна. Для приема радиоизлучения планеты необходимы очень большие радиотелескопы и сверхчувствительные радиоприемники. Поэтому первый эксперимент по измерению излучения Венеры в радиодиапазоне был проведен лишь в 1956 г. К. Майером, Т. Мак-Калуфом и Р. Слонейкером на самом крупном в то время радиотелескопе диаметром 15 м Морской исследовательской лаборатории США.

Измеренная ими интенсивность излучения Венеры в сантиметровом диапазоне привела к температуре излучающего тела около 600 К. Если излучающим телом служит поверхность планеты, то ее температура вдвое больше расчетной равновесной, физиче-

ские условия резко отличаются от земных и жизнь на планете невозможна, так как белок, являющийся основой жизни, разрушается, а вода, входящая в состав живой клетки, не может существовать в жидком состоянии.

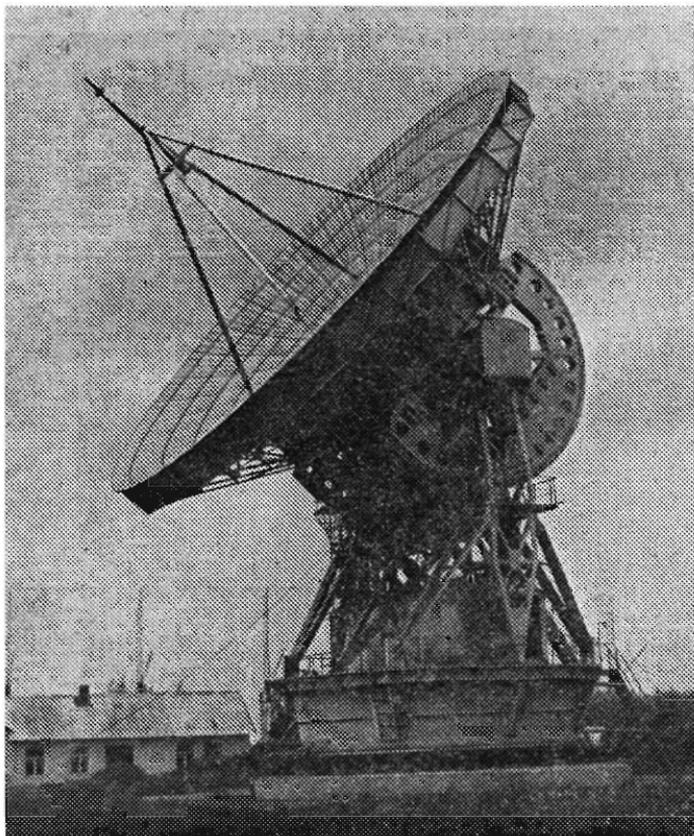


Рис. 6. Радиотелескоп РТ-22 Радиоастрономической станции ФИАН СССР им. П. Н. Лебедева.

В 1959 г. на Радиоастрономической станции ФИАН СССР им. П. Н. Лебедева был создан первый крупный советский радиотелескоп диаметром 22 м (рис. 6). Одной из первых работ, проведенных на этом радиотелескопе, было измерение радионизлучения Венеры. Используя высокоточную поверхность этого

радиотелескопа, А. Д. Кузьмин и А. Е. Саломонович измерили радиоизлучение Венеры на миллиметровых волнах и получили значительно более низкую температуру излучающего тела — около 400 К. Отличие найденной ими температуры от определенной К. Майером и др. они объяснили тем, что на разных волнах излучение выходит с разных уровней: на сантиметровых волнах излучает горячая поверхность планеты, а на миллиметровых — более холодная атмосфера, непрозрачная для этих волн. Однако такая интерпретация не однозначна. Д. Джонс предложил прямо противоположную модель, в которой предполагалось, что радиоизлучение поверхности наблюдается в миллиметровом диапазоне, а К. Майер и др. в сантиметровом диапазоне зарегистрировали излучение плотной поносферы ($N_0 = 10^9 - 10^{10} \text{ см}^{-3}$), имеющей более высокую температуру, чем поверхность. В этом случае температура поверхности составляет около 400 К. Психологически вторая модель была более привлекательна, так как сохраняла возможность существования на Венере жизни.

В течение нескольких лет обе указанные гипотезы «горячей» и «холодной» поверхности Венеры конкурировали. Для устранения неоднозначности был необходим эксперимент, который смог бы окончательно решить, какой гипотезе следует отдать предпочтение.

Такой эксперимент был проведен в 1964 г. А. Д. Кузьминым и Б. Кларком. Идея эксперимента состояла в том, что для наклонной поверхности коэффициенты отражения, и следовательно, излучающая способность зависят от поляризации излучения этой поверхности. Поэтому радиоизлучение Венеры должно быть поляризовано на краях видимого диска, если оно исходит от поверхности, и неполяризовано, если его источником является поносфера.

Как упоминалось выше, угловой диаметр видимого диска Венеры не превышает 60". Поэтому для выделения радиоизлучения краев диска был необходим радиотелескоп, обладающий разрешением в несколько угловых секунд. В качестве такого радиотелескопа они использовали радиоинтерферометр Калифорнийского технологического института, состоящий из двух антенн диаметром 27 м, установленных на рельсовых путях и передвигаемых таким образом, что расстоя-

ние между ними может изменяться от 30 до 1400 м (рис. 7). На волне 10 м, на которой проводились измерения, такое разнесение антенн интерферометра соответствует угловому разрешению около $10''$.

Измерения показали, что радионизлучение краев диска планеты поляризовано. Это доказало, что излу-

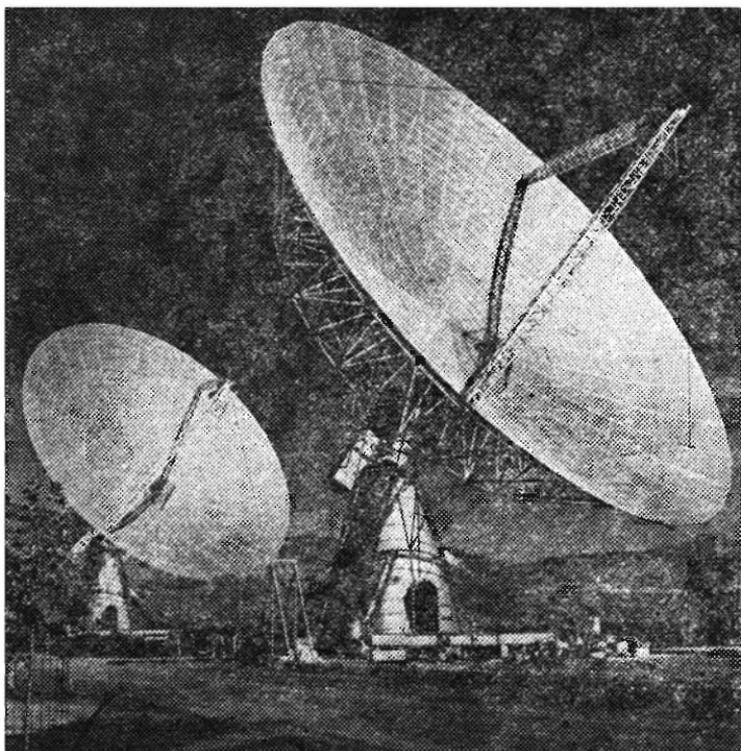


Рис. 7. Радиointерферометр Калифорнийского технологического института.

чает поверхность планеты. Ее температура по выполненным измерениям составила 650 ± 70 К.

Принципиальная важность полученного результата для физики и биологии Венеры диктовала необходимость независимого определения температуры поверхности Венеры методом, в котором связь непосредственно измеряемого параметра с температурой не за-

висела бы от выбора модели атмосферы планеты. Возможность таких измерений открылась с началом программы прямого зондирования атмосферы Венеры спускаемыми аппаратами советских автоматических межпланетных станций (АМС) серии «Венера» (рис. 8).

Первые прямые определения параметров атмосферы Венеры были произведены советским спускаемым аппаратом АМС «Венера-4» 18 октября 1967 г. Осуществление этого эксперимента стало выдающимся достижением советской науки и техники. Были реализованы запуск с Земли автоматической межпланетной станции, вывод ее с высокой точностью на расчетную орбиту полета к Венере, контроль ее работоспособности, корректировка траектории в процессе полета, отделение спускаемого аппарата, его вход в атмосферу и спуск на парашюте, передача на Землю данных приборов.

Особо сложной научно-технической задачей оказалось создание спускаемого аппарата. Как следовало из радиоастрономических измерений, спускаемый аппарат должен был работать при температурах до 600 — 700 К, что выше температуры плавления свинца. Поэтому парашют для спускаемого аппарата был изготовлен из термостойкого материала, способного противостоять температурам до 800 К, а в конструкцию самого спускаемого аппарата была введена теплозащита. Большая неопределенность возникла с оценкой ожидаемого давления атмосферы на Венере и выбором прочностных характеристик спускаемого аппарата. По данным наземных наблюдений Венеры оценки давления ее атмосферы варьировали от 3 до 1000 атм. Напомним, что на нашей планете давления в 1000 атм достигаются лишь в двух глубоководных впадинах мирового океана. Проникнуть в эти впадины удалось лишь сравнительно недавно с помощью специально созданного глубоководного батискафа. Какую же величину заложить в конструкцию спускаемого аппарата? При ориентации на малые давления спускаемый аппарат можно сделать относительно легким, за счет этого большую массу выделить на научную аппаратуру, сделать эксперимент более информативным, если, конечно, оценка ожидаемого давления правильна. Если же давление атмосферы больше того,

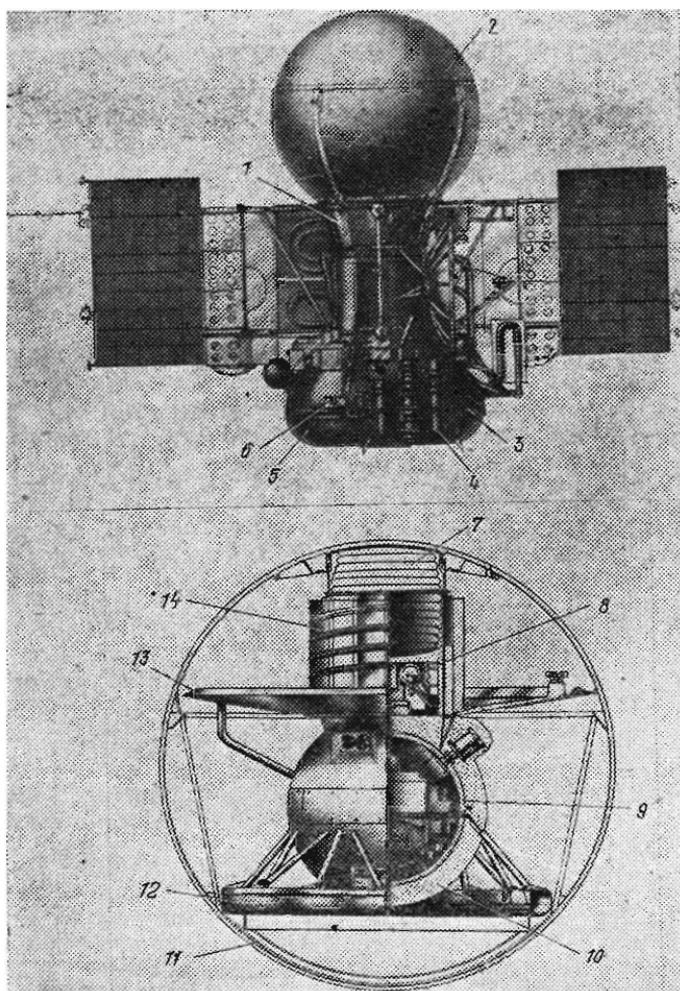


Рис. 8. Автоматическая межпланетная станция «Венера-9» (вверху) и ее спускаемый аппарат (внизу).

1 — орбитальный аппарат, 2 — спускаемый аппарат, 3 — научная аппаратура, 4 — приборы ориентации на звезды, 5 — приборный отсек, 6 — научная аппаратура, 7 — отсек парашютной системы, 8 — отсек научной аппаратуры, работающей в облачном слое, 9 — прочный корпус, 10 — термоизоляция, 11 — теплозащитный корпус, 12 — посадочное устройство, 13 — аэродинамическое тормозное устройство, 14 — антенны,

на которое рассчитана прочность спускаемого аппарата, то последний окажется просто раздавленным и ни о какой информативности речи не будет. Если подстраховаться и ориентироваться на большие давления, то возникнет другая проблема — большое увеличение массы аппарата. Так, массы батискафов, аппаратов для исследования больших морских глубин, составляют десятки тонн. Аналогия с батискафом здесь вполне уместна, так как максимальная ожидаемая оценка давления атмосферы Венеры 1000 атм соответствует давлению воды в океане на глубине 10 км. Однако при такой массе самого спускаемого аппарата не только ничего не останется на установку на нем научной аппаратуры, но и сам запуск столь тяжелого аппарата с Земли и вывод его на орбиту к Венере станут весьма сложными, а подчас и нерезальными.

При недостаточной ясности обстановки нужна разведка. Такую разведку произвел первый спускаемый аппарат АМС «Венера-4». На этом аппарате В. С. Авдуевским, М. Я. Маровым, М. К. Рождественским, В. В. Михневич и В. А. Соколовым впервые были проведены прямые измерения температуры и давления атмосферы Венеры и получено распределение этих параметров по высоте. В ходе спуска аппарата в интервале высот 28 км температура непрерывно росла от 300 до 535 К, после чего спускаемый аппарат прекратил работу (на высоте около 26 км над поверхностью Венеры).

Анализ химического состава атмосферы, выполненный группой под руководством А. П. Виноградова и Ю. А. Суркова, показал, что основной компонентой атмосферы Венеры является углекислый газ.

Найденные данные о распределении температуры и давления в атмосфере по высоте и особенно о ее химическом составе позволили увереннее интерпретировать результаты радиоастрономических измерений и получить более точные данные о температуре поверхности. В 1970 г. Ю. П. Ветухновская, А. Д. Кузьмин, А. П. Наумов и Т. В. Смирнова с учетом поглощения радиозлучения в атмосфере установили, что температура поверхности Венеры равна 705 ± 30 К. А в декабре того же года В. С. Авдуевский, М. Я. Маров и М. К. Рождественский со спускаемого аппарата АМС

«Венера-7» произвели измерения температуры атмосферы Венеры вплоть до ее поверхности. В месте посадки АМС «Венера-7» температура околоповерхностной атмосферы была найдена равной 740 ± 30 К.

Таким образом, представление о Венере как о планете с очень горячей поверхностью нашло окончательное подтверждение.

В последующие годы прямые измерения температуры околоповерхностной атмосферы были проведены еще четырьмя спускаемыми аппаратами АМС «Венера-9», «Венера-10», «Венера-11» и «Венера-12». Данные этих измерений приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2
Данные измерений температуры околоповерхностной атмосферы Венеры

АМС	Температура околоповерхностной атмосферы, К	Широта места посадки
«Венера-7»	740	—5°
«Венера-9»	728	32°
«Венера-10»	737	16°
«Венера-11»	731	—14°
«Венера-12»	732	—7°

Ограниченность данных измерений АМС локальной областью посадки спускаемого аппарата неизбежно вызывает вопрос о том, сколь характерны параметры, измеренные в данной области, для всей планеты в целом. Для пояснения сказанного предположим, что гипотетические инопланетяне направили автоматическую межпланетную станцию «Земля» для исследования планеты, на которой мы живем. Предположим далее, что станция совершила посадку в Антарктиде и, измерив температуру поверхности, нашла ее равной 200 К. Можно ли на основе этого эксперимента делать вывод, что Земля — ледяная планета и что температура ее поверхности 200 К? На основе наших географических знаний мы отвечаем — нет. Но для получения этих знаний потребовались сотни географических экспедиций. Аналогично, инопланетянам для решения вопроса с помощью космических аппаратов понадобятся сотни таких аппаратов,

чтобы показать, что наряду с Антарктидой есть Сахара, где температура почти на 100 К выше, что различие дневной и ночной температур достигает десятков градусов, а сезонные изменения температуры еще больше.

На Венере также можно ожидать различия температур поверхности, обусловленного, например, суточными или широтными вариациями освещенности Солнцем.

Наземные радиоастрономические измерения дают температуру, усредненную по всей видимой с Земли полусфере планеты, и позволяют определить, таким образом, температуру, характерную для планеты в целом. Проводя подобные измерения при разных условиях освещения планеты Солнцем, радиоастрономы установили, что температура поверхности практически не изменяется от дня к ночи. Малые суточные вариации температуры на первый взгляд представляются неожиданными, так как Венера вращается вокруг своей оси очень медленно: длительность солнечных венерианских суток составляет 117 земных суток. Поэтому следовало ожидать, что в течение долгого дня, длящегося 58,5 земных суток, освещенная часть планеты сильно нагреется Солнцем, а в течение ночи, длящейся также 58,5 суток, сильно остынет. Так, на Луне при продолжительности солнечных суток всего 28 земных, различие дневной и ночной температур поверхности составляет около 300 К, а на Меркурии, для которого продолжительность солнечных суток равна 176 земных, различие дневной и ночной температур достигает 400 К.

Однако Луна и Меркурий практически не имеют атмосферы. Массивная же атмосфера Венеры обладает очень большой тепловой инерцией, сглаживающей суточные вариации температуры. Расчет теплового режима, проведенный В. И. Морозом и М. Я. Маровым, показал, что вследствие большого теплосодержания плотной атмосферы Венеры ожидаемое изменение температуры околоповерхностной атмосферы от дня к ночи не превышает 1 К. При наличии массивной атмосферы трудно ожидать также значительных изменений температуры по широте. Действительно, данные табл. 2 не показывают широтных вариаций температуры поверхности, превышающих 12 К в интер-

вале широт от -14° до 32° . А радиоастрономические измерения, проведенные с высоким разрешением, тоже показали, что разность температур полюсов и экватора не превышает 12 К. В связи с малым углом наклона экватора планеты к плоскости ее орбиты, времена года и, следовательно, сезонные изменения температуры на Венере также не должны быть сильно выражены.

Наконец, прямые измерения температуры со спускаемых аппаратов АМС серии «Венера» были проведены в четырех различных районах (на рис. 9 эти районы отмечены крестиками) и заметных различий данных обнаружено не было.

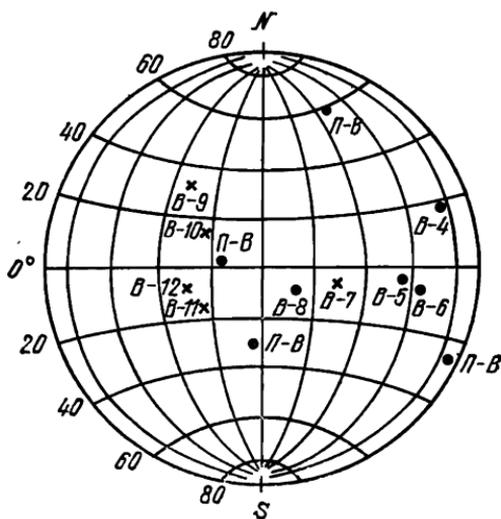


Рис. 9. Районы посадки спускаемых аппаратов «Венера-4» — «Венера-12» и «Пионер-Венера». (П—В).

Крестиками отмечены места, в которых произведены измерения температуры околоповерхностной атмосферы,

Специальный эксперимент для определения суточных и широтных вариаций температуры был поставлен на американском аппарате «Пионер—Венера». Для этого был произведен спуск четырех посадочных аппаратов в экваториальной и полярной областях на дневной и ночной сторонах. К сожалению, температурные датчики всех четырех аппаратов отказали на

высоте 12—14 км и измерения температуры поверхности не были проведены.

Итак, благодаря массивной атмосфере с большой тепловой инерцией Венера имеет, по-видимому, примерно одинаковую температуру около 730 К по всей поверхности без заметных суточных, сезонных и широтных варпаций. Единственной причиной варпаций могут быть изменения высот. Ниже будет показано, что с изменением высоты на 1 км температура атмосферы Венеры изменяется на 9 К. Поэтому на возвышенных участках (а по данным радиолокационных измерений на Венере есть горы высотой до 10 км) температура поверхности может быть на несколько десятков градусов выше, чем на среднем уровне.

Вращение

Астрономические наблюдения показали, что все планеты, так же как и Земля, вращаются вокруг своей оси.

Видимое проявление вращения Земли состоит в кажущемся движении Солнца. Положение Солнца на небе определяет физические условия и биологические процессы на Земле, жизненный ритм и активность людей. Поэтому солнечные сутки были приняты в качестве основной меры отсчета времени.

Однако из-за орбитального движения Земли вокруг Солнца солнечные сутки не равны истинному периоду ее вращения вокруг собственной оси относительно неподвижной системы координат. В качестве такой системы можно выбрать звезды. Период вращения Земли относительно звезд, или звездные сутки T_* , связан с солнечными сутками T_\odot соотношением

$$\frac{1}{T_*} = \frac{1}{T_\odot} + \frac{1}{P},$$

где P — период обращения Земли по орбите вокруг Солнца, равный земному году. Звездные сутки на Земле составляют 23 ч 56 мин.

Определение вращения Венеры, Марса, Юпитера и других планет наблюдателем, находящимся на Земле, является более трудной задачей. Для этого следует отыскать на планете какую-либо характерную деталь,

выделяющуюся внешним видом, и проследить ее движение по видимому диску планеты. Интервал между двумя последовательными прохожденьями этой детали через центр видимого диска будет периодом вращения планеты относительно Земли T' . С истинным периодом вращения T (относительно звезд) он связан соотношением

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T'} + \frac{1}{P}$$

где P — период обращения планеты.

Для решения этой задачи необходимо наличие на поверхности планеты долгоживущей характерной детали, которую можно наблюдать с Земли.

На Юпитере одной из таких деталей является известное «Красное пятно». Ряд долгоживущих характерных образований был выявлен и на Марсе. Поэтому периоды вращения этих планет были определены еще в прошлом веке. Попытки определить таким же образом период вращения Венеры, предпринимавшиеся рядом наблюдателей еще с XVIII века, в течение более 200 лет оказались, однако, безрезультатными. Вместе с тем история этих попыток весьма любопытна и поучительна, показывая влияние существующих представлений об объекте исследования на результаты его наблюдений.

Основным правилом ученых является объективный анализ фактов. Однако ученые тоже люди и ничто человеческое им не чуждо, в том числе и эмоции.

«Если очень ждешь своего друга, легко принять стук своего сердца за топот копыт его лошади» (восточная поговорка). Наглядным примером влияния «стука своего сердца» на результаты научных наблюдений служит определение периодов вращения Венеры и Меркурия. Первые попытки измерения периода вращения Венеры были предприняты Д. Кассини и И. Шретером. Опираясь на движение постоянных, по их мнению, деталей на диске планеты, они определили период вращения Венеры равным 23 ч 15 мин — 23 ч 21 мин. Вскоре И. Шретер предпринял попытку определения периода вращения Меркурия и получил 24 ч 00 мин 53 с. Показательна близость «измеренных» периодов Венеры и Меркурия, каждый из которых в свою очередь близок к единственному извест-

ному этим наблюдателям периоду вращения планеты Земля — 24 ч.

В течение последующих 80 лет все наблюдатели получали для Венеры и Меркурия периоды вращения около 24 ч, либо вообще не могли различить никаких деталей.

Кардинальное изменение оценки периода вращения Венеры и Меркурия было произведено Дж. Скиапарелли в конце XIX века. По его наблюдениям как на Венере, так и на Меркурии детали на диске планеты неподвижны относительно терминатора — линии, разделяющей освещенную и неосвещенную части планеты. Отсюда он сделал вывод, что Венера и Меркурий всегда обращены к Солнцу одной стороной, т. е. период вращения Венеры и Меркурия точно равен периоду их обращения около Солнца, т. е. 225 и 88 земных суток соответственно. В последующие годы заключение Дж. Скиапарелли о синхронном вращении Венеры и Меркурия подтвердили такие известные исследователи планет, как Э. Антониади и А. Дольфюс.

На самом же деле ни одно из приведенных выше значений периодов вращения Венеры и Меркурия не является правильным.

Основная причина описанных казусов лежит в крайней трудности оптических наблюдений Венеры и Меркурия. Указанные наблюдения проводились визуально в телескоп и, естественно, не были свободны от психологических особенностей восприятия. Напомним, кстати, что психологические особенности восприятия изображения Марса привели известного астронома П. Ловелла к сенсационному в свое время выводу о наличии на Марсе каналов и, следовательно, о возможности разумной жизни.

Объективный способ регистрации — фотографирование исследуемого объекта, но при фотографировании в видимом свете Венеры с помощью земных телескопов изображение получается слишком размытым и никакие детали обнаружить нельзя. Однако фотосъемка в ультрафиолетовых лучах неожиданно выявила на Венере устойчивые образования, имеющие вид положенной на бок буквы грек (рис. 10). Последовательное фотографирование через интервалы времени в несколько часов показало, что это образование перемещается по видимому диску Венеры со скоростью

около 350 км/ч, соответствующей периоду вращения около 4 суток. Однако последующие измерения показали, что Венера вращается значительно медленнее, а видимое перемещение Y-образования является движением венерианских облаков. Это не значит, что на

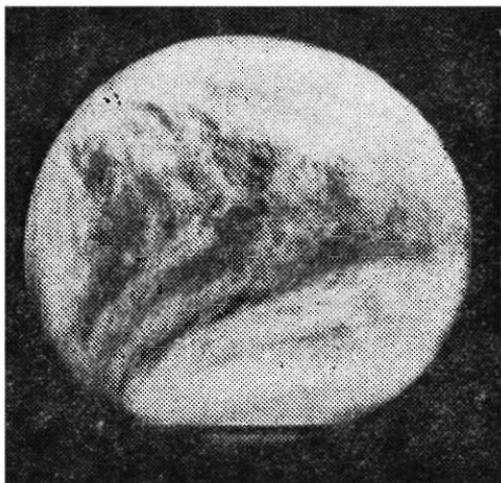


Рис. 10. Фотография Венеры в ультрафиолетовых лучах.

поверхности Венеры свирепствует ураган, так как облака находятся на высоте около 70 км над поверхностью планеты. Заметим, что в стратосфере Земли скорость ветра также достигает 150 км/ч.

Действительный период вращения Венеры вокруг своей оси и длительности венерианских дня и ночи были определены сравнительно недавно с помощью радиолокации.

Известно, что вследствие эффекта Доплера частота волн, излучаемых или отражаемых движущимся предметом, изменяется. Величина этого изменения равна

$$\Delta v = v_0 \frac{v}{c},$$

где v — скорость движения предмета, c — скорость света. При вращении планеты вокруг оси O (рис. 11) один ее край (точка A) движется в направлении на-

наблюдателя, а другой край (точка B) — от него. Такое движение также приводит к изменению частоты отраженного радиосигнала. Самую высокую частоту

$$v_{\max} = v_0 + \Delta v = v_0 \left(1 + \frac{\omega R}{c} \right)$$

(ω — угловая скорость вращения, а R — радиус планеты) будет иметь излучение, отраженное от экваториальной точки, находящейся на крае, движущемся на наблюдателя, самую низкую

$$v_{\min} = v_0 - \Delta v = v_0 \left(1 - \frac{\omega R}{c} \right),$$

— излучение, отраженное от экваториальной точки, находящейся на крае, движущемся от наблюдателя.

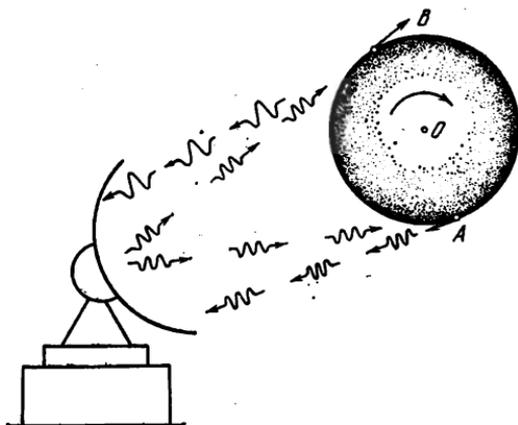


Рис. 11. Схематическое представление доплеровского изменения частоты при отражении от вращающейся планеты.

Излучение, отраженное от всех других точек поверхности планеты, будет иметь частоты в интервале от v_{\max} до v_{\min} . Отсюда, измерив v_{\max} и v_{\min} , можно определить угловую скорость вращения планеты:

$$\omega = \frac{c}{2R} (v_{\max} - v_{\min}).$$

Измерения вращения Венеры таким методом были проведены в 1961—1964 гг. в СССР в Институте радиотехники и электроники АН СССР под руководством В. А. Котельникова, в США в Линкольнской лаборатории Массачусетского технологического института, в Лаборатории реактивного движения Калифор-

нийского технологического института и на обсерватории Аресибо Корнельского университета; они показали, что период вращения Венеры $T = 244,3 \pm 2$ суток, направление вращения обратное, т. е. противоположное направлению обращения планеты вокруг Солнца.

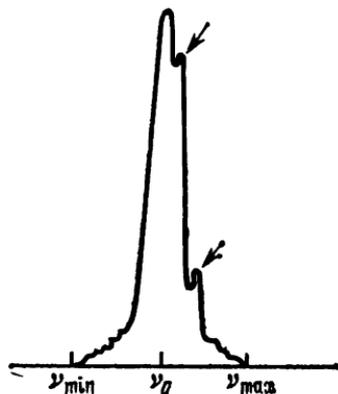


Рис. 12. Спектр отраженного излучения.

Стрелками отмечены детали, соответствующие областям повышенного отражения.

Радиолокационные измерения выявили также, что на поверхности Венеры имеются области повышенного отражения. В спектре отраженного сигнала (рис. 12) областям повышенного отражения соответствуют участки локального увеличения интенсивности. При вращении планеты положение этих участков изменяется, что также дает возможность определить скорость вращения.

Наиболее точные данные об элементах вращения Венеры получены на основе измерения времени появления указанных деталей в течение нескольких соединений. Так, по наблюдениям деталей повышенного отражения, проведенным на обсерватории Аресибо и в Лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института около нижних соединений 1962, 1964, 1966, 1967 и 1969 гг., период вращения Венеры равнялся $243,0 \pm 0,1$ земных суток. В 1970 г. Международный Астрономический союз утвердил рекомендацию принять сферический период вращения Венеры равным 243,0 земных суток.

Как говорилось выше, направление вращения Венеры вокруг своей оси — обратное, т. е. противоположное направлению ее обращения около Солнца. У всех других планет (исключая Уран), включая и нашу Землю, направление вращения — прямое, т. е. совпадает с направлением обращения планеты около Солнца.

При обратном направлении вращения сидерический период вращения 243 суток соответствует продолжительности солнечных суток на Венере, равной 117 земных суток. Таким образом, венерианский год (225 земных суток) состоит примерно лишь из двух солнечных венерианских суток.

Наклон экватора планеты к плоскости орбиты не превышает 6° (для Земли 23°). Поэтому сезонные вариации, аналогичные земным временам года, на Венере не должны быть ярко выражены.

Интересно отметить, что период вращения Венеры очень близок к периоду так называемого резонансного вращения планеты относительно Земли, равному 243,16 земных суток. При резонансном вращении между каждым нижним и верхним соединением Венера делает относительно Земли точно один оборот, и поэтому в соединении она всегда обращена к Земле одной и той же стороной.

Радиолокация дала также возможность определить и действительный период вращения Меркурия, оказавшийся равным 59 земным суткам. Однако в этом случае данные оптических и радиолокационных измерений удалось согласовать. Дело в том, что при оптических наблюдениях период вращения определялся по моментам совпадения видимых изображений. Однако найденное таким образом значение периода нельзя считать однозначным, так как изображения могут совпадать при периодах, задаваемых соотношением

$$T = \frac{\Delta t}{n + \psi/3600},$$

где Δt — интервал времени между сопоставляемыми наблюдениями, n — число полных оборотов планеты за это время, ψ — изменение разности эклиптических долгот Земли и Меркурия за то же время. Кроме 88 суток совпадение изображений удовлетворяет также периоду 58,4 суток, хорошо согласующемуся с данными радиолокационных измерений.

Как и для Венеры, было найдено и объяснение, почему период вращения Меркурия именно такой. Дж. Коломбо показал, что если момент инерции Меркурия не изотропен (не одинаков во всех направлениях) вследствие большого эксцентриситета его орбиты, то возможен устойчивый режим, при котором период вращения составляет точно $\frac{2}{3}$ периода обращения, т. е. 58,6 земных суток.

Физико-химические свойства и состав поверхности

Наряду с измерением периода вращения, радиолокация дала возможность определить свойства поверхности планеты и начать исследование ее топографии и рельефа.

Интенсивность отраженного планетой радиолокационного сигнала зависит от коэффициента радиолокационного отражения \mathcal{R} , который в свою очередь определяется диэлектрической проницаемостью ε материала поверхности планеты:

$$\mathcal{R} = \left(\frac{\sqrt{\varepsilon} - 1}{\sqrt{\varepsilon} + 1} \right)^2$$

Диэлектрическая проницаемость силикатных пород связана с их плотностью ρ эмпирической зависимостью

$$\rho \sim 2(\sqrt{\varepsilon} - 1),$$

полученной В. Д. Кротиковым на основе лабораторных исследований.

Следовательно, измерив по интенсивности отраженного сигнала коэффициент отражения \mathcal{R} , можно определить диэлектрическую проницаемость

$$\varepsilon = \left(\frac{1 + \sqrt{\mathcal{R}}}{1 - \sqrt{\mathcal{R}}} \right)^2,$$

и далее по предыдущей формуле найти плотность ρ .

Измерения показали, что коэффициент радиолокационного отражения поверхности Венеры $\mathcal{R} = 0,14 \pm \pm 0,03$, что приводит к диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 4,7 \pm 0,8$. Это соответствует сухим силикатным породам типа гранита, базальта и другим сухим породам земного типа. Напомним, что для воды

$\epsilon = 80$, поэтому низкая диэлектрическая проницаемость материала поверхности решительно исключает гипотезу Д. Мензела и Ф. Уиппла, согласно которой Венера сплошь покрыта водой. Возможность существования на поверхности воды в жидкой фазе исключает также высокая температура поверхности.

Для сухих силикатных пород величине $\epsilon = 4,7 \pm 0,8$ соответствует плотность $\rho = 2,3 \pm 0,4 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, что близко к плотности земных поверхностных пород. Это также указывает на близость материала поверхности Венеры к сухим земным поверхностным породам. Прямое измерение плотности поверхностных пород Венеры было произведено радиационным плотномером, установленным на спускаемом аппарате АМС «Венера-10». Плотность грунта в месте посадки оказалась равной $2,7 - 2,9 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, что хорошо согласуется с оценкой, полученной радиолокационными измерениями. Плотность поверхностных пород, значительно меньшая средней плотности планеты в целом ($5,2 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$), дает основание полагать, что Венера, так же как и Земля, прошла стадию расплавления и дифференциации, в процессе которой всплыли легкие материалы, образовавшие кору планеты, более легкую, чем ее ядро.

Разумеется, приведенные выше значения ϵ и ρ являются усредненными по видимой поверхности планеты.

Определение химического состава пород поверхности Венеры стало возможным после успешной посадки на планету спускаемых аппаратов серии «Венера». На АМС «Венера-8», «Венера-9» и «Венера-10» были установлены гамма-спектрографы для анализа в венерианском грунте естественных радиоактивных элементов урана, тория и изотопа калия ^{40}K . По результатам измерений 22 июля 1972 г. А. П. Виноградов, Ю. А. Сурков, Ф. Ф. Киризов и В. Н. Глазов установили, что в венерианской породе содержится $0,4 - 4\%$ изотопа калия ^{40}K , $(0,5 - 2) \cdot 10^{-4}\%$ урана и $(0,7 - 7) \cdot 10^{-4}\%$ тория, что близко к их содержанию в магматических породах Земли типа базальтов, в которых концентрация этих элементов составляет $0,8\%$, $0,9 \cdot 10^{-4}\%$ и $2 \cdot 10^{-4}\%$ соответственно. Это так же свидетельствует в пользу подобия процессов формирования Венеры и Земли как процессов дифферен-

циации и образования вторичных пород, отличающихся от протопланетного облака солнечного состава. Действительно, в хондритах, имеющих первичный солнечный состав, отношение содержания калия и урана составляет около 10^3 , т. е. на порядок больше, чем для Земли и Венеры.

Топография

Итак, жидкой воды, а следовательно, морей и океанов на Венере нет и ее поверхность — это сплошной материк. Что же представляет собой этот материк, сколь он однороден по слагающим породам, есть ли там горы и другие особенности рельефа? Из-за облачного покрова мы не можем видеть непосредственно детали рельефа поверхности Венеры, как, например Луны. Поэтому ответ на вопросы о топографии Венеры получен только на основе радиолокационных измерений.

Для выявления на планете особенностей рельефа необходимо высокое пространственное разрешение. Так, например, чтобы различить детали размером $d = 10$ км даже при наблюдении в нижнем соединении, когда Венера ближе всего к Земле, необходимо угловое разрешение

$$\varphi = r_{\varphi} \frac{d}{R_{\varphi}} = 30'' \frac{10 \text{ км}}{6050 \text{ км}} = 0'',05,$$

где R_{φ} — радиус Венеры в км, r_{φ} — видимый угловой радиус.

Для радиотелескопа угловое разрешение равно отношению длины волны принимаемого радиоизлучения λ к диаметру радиотелескопа D . Следовательно, даже на волне 10 см, на которой атмосфера планеты еще прозрачна, для получения разрешения $0'',04$ необходим радиотелескоп диаметром около 850 км. Очевидно, что создание радиотелескопа такого размера совершенно не реально. Для решения указанной задачи Р. Голдстейн и Г. Петтенгил разработали оригинальный метод, позволяющий получить высокое пространственное разрешение с антеннами, не обладающими высоким разрешением. Изящество этого метода заслуживает того, чтобы рассказать о нем более подробно.

В связи с конечностью скорости распространения электромагнитных колебаний и протяженностью планеты по лучу зрения отраженный сигнал будет растягиваться во времени. Очевидно, что первым вернется к земному наблюдателю и будет зарегистрировано излучение от ближайшей к нему точки поверхности

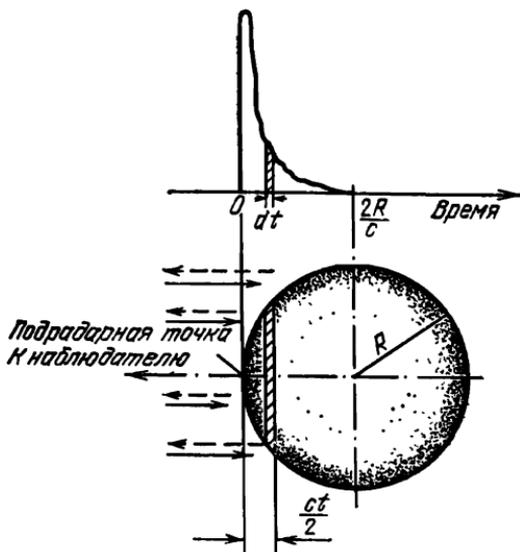


Рис. 13. Схематическое представление растягивания импульсного уширения во времени при отражении от планеты.

планеты. Эта точка (рис. 13) называется обычно *подрадарной точкой*. Через время t , отсчитываемое от начала импульса отраженного сигнала, принимаемая энергия будет обусловлена уже отражением от точек поверхности, находящихся на расстоянии $ct/2$ по лучу зрения за подрадарной точкой. Очевидно, что эти точки лежат на окружности, центр которой находится на прямой, проходящей через подрадарную точку и центр сферы планеты, на расстоянии $ct/2$ от подрадарной точки.

В интервале от t до $t + dt$ наблюдатель регистрирует отражение от кольца с угловой шириной $d\theta$, определяемой соотношением

$$d\theta = \frac{c}{2R \sin \theta} dt.$$

Таким образом, выбирая временной селекцией из отраженного импульса интервалы, соответствующие различным задержкам, можно выделить отражение от разных областей планеты, осуществив, таким образом, пространственную селекцию. В проекции на видимый диск планеты это концентрические кольца. Пространственное разрешение такой селекции определяется

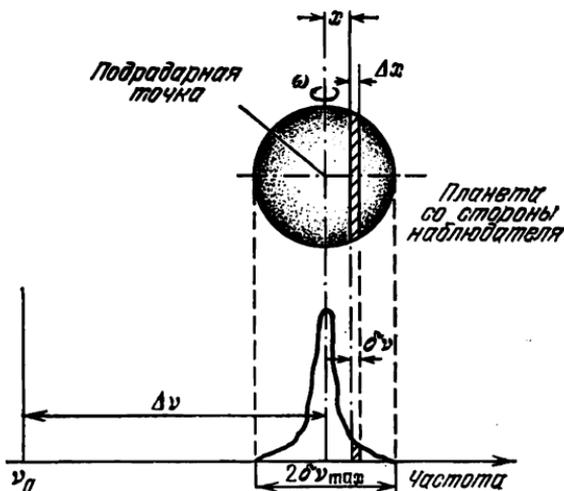


Рис. 14. Схематическое представление доплеровского уширения спектра при отражении от вращающейся планеты.

шириной кольца и лимитируется длительностью импульса, посылаемого радиолокатором. Отраженный сигнал отличается от излученного и частотным спектром. Как уже упоминалось выше, вращение планеты вокруг своей оси вызывает доплеровское уширение спектра радиолокационного сигнала. В проекции на видимый диск планеты (рис. 14) геометрическими местами точек, имеющих одинаковую линейную скорость по лучу зрения на наблюдателя и, следовательно, одинаковое доплеровское смещение, служат прямые, параллельные оси вращения и находящиеся от нее на расстоянии

$$x = \frac{c \Delta \nu}{2\omega v_0}$$

В полосе частот $\delta\nu$ принимается сигнал, отраженный от полосы шириной Δx , равной

$$\Delta x = \frac{c\Delta\nu}{2\omega\nu_0} \delta\nu.$$

Применяя селекцию по частоте, можно выделить на поверхности планеты область, соответствующую указанной полоске на видимом диске.

Читатель уже догадывается, что одновременной селекцией и по времени и по частоте (рис. 15) соответствует пересечение колец и полосок, что позволяет

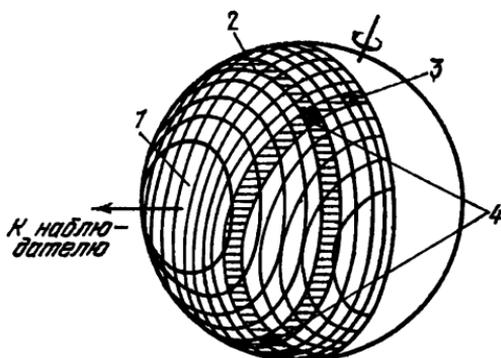


Рис. 15. Схематическое представление увеличения пространственного разрешения за счет селекции по времени и частоте на видимом диске планеты.

1 — подрадарная точка; 2 — кольцо, выделяемое селекцией по времени; 3 — полоска, выделяемая селекцией по частоте; 4 — области, выделяемые селекцией по времени и по частоте.

разрешать на видимом диске относительно малые области. На рис. 15 эти области зачернены.

Описанная методика была применена Р. Голдстейном, Р. Гринном и Х. Рамсеем для радиолокационных измерений Венеры на обсерватории Аресибо, располагающей очень большой антенной диаметром 300 м и сверхмощными радиопередающими устройствами. Разрешение по поверхности планеты составляло 10 км. На рис. 16 приведена полученная ими карта отражательных свойств Венеры. На ней видны наиболее яркие и крупные области повышенного отражения. Отношение интенсивностей отраженного излучения «ярких» и «темных» областей достигает 20. Эти области имеют округлую форму и поперечный

размер около 1 000 км. На рис. 17 приведена более крупномасштабная карта области Венеры диаметром около 1 500 км. В этой области обнаружен ряд кратеров диаметром от 30 до 150 км, несколько похожих по виду на кратеры на Луне, но относительно менее глубоких. Так, один из кратеров диаметром 150 км

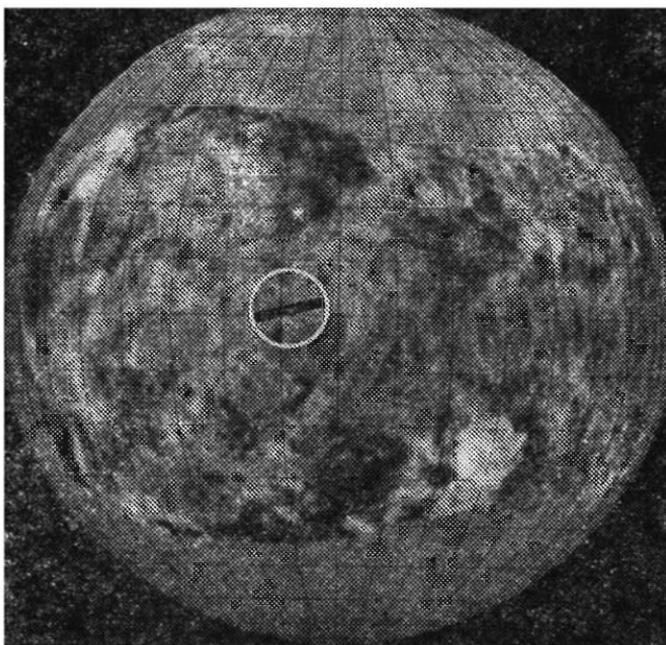


Рис. 16. Карта отражательных свойств поверхности Венеры.

имеет глубину всего 500 м. По-видимому, есть и более мелкие кратеры, но их нельзя было обнаружить в этом эксперименте из-за ограниченной разрешающей способности. Интересно отметить, что из четырех тел Солнечной системы — Луны, Меркурия, Марса и Венеры, поверхность которых сильно кратерирована, наиболее глубокие кратеры обнаружены на Луне и Меркурии, практически не имеющих атмосферы, более мелкие кратеры на Марсе, окруженном разреженной атмосферой, и самые мелкие — на Венере, планете с плотной атмосферой. Такая последовательность дает основание предполагать, что указанное различие глу-

бин кратеров на Луне, Меркурии, Марсе и Венере обусловлено главным образом влиянием атмосфер. По мнению Р. Голдстейна, большие кратеры на Венере образовались в то время, когда у планеты не было плотной атмосферы. Увеличение плотности атмосферы привело к развитию ветровой эрозии, сглаживающей рельеф.

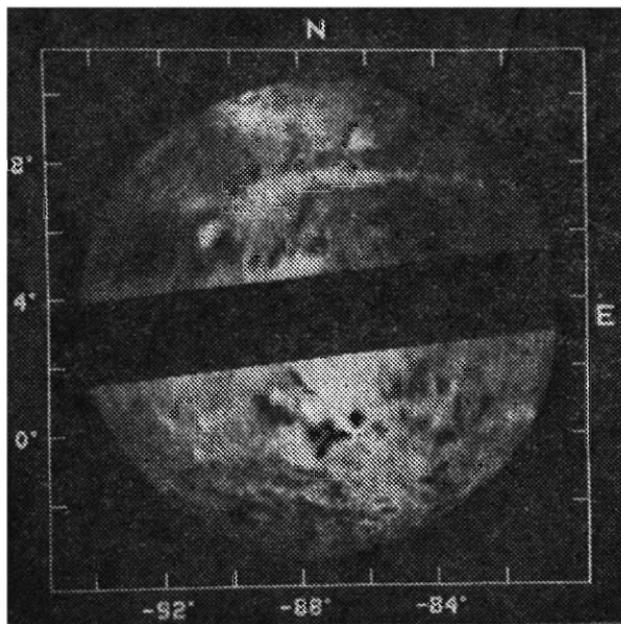


Рис. 17. Крупномасштабная радиолокационная карта участка поверхности Венеры, отмеченного на рис. 16 кружком.

Однако нельзя исключить и вулканическую гипотезу образования кратеров, также сглаживаемых при их последующей эволюции в результате ветровой эрозии. Наряду с атмосферной эрозией малая глубина кратеров на Венере может обуславливаться также заполнением их лавой в процессе вулканической активности. Из указанной последовательности выпадает Земля, которая при плотности атмосферы, промежуточной между плотностями атмосферы Марса и Венеры, имеет лишь сильно сглаженные остатки метеоритных кратеров. Возможно, причиной этой особенности может быть участие в образовании земного рельефа водной

эрозии, преобладающей над ветровой эрозией на Марсе и Венере.

Обнаружены перепады высот в несколько километров, в том числе плато протяженностью около 150 км, возвышающееся на 2 км. Однако фактические перепады высот могут быть гораздо больше, но не выявляются из-за усреднения по большой площади.

Очевидно, что с близкого расстояния можно различить более мелкие детали. Для сокращения расстояния до планеты можно установить радиолокатор на космическом аппарате, пролетающем около Венеры. Такой эксперимент был осуществлен М. А. Колосовым, А. И. Кучарявенко, О. Е. Милехиным, Е. П. Молотовым, А. Г. Павельевым и О. И. Яковлевым в 1975 г. на АМС «Венера-9» и «Венера-10». В ходе эксперимента было обнаружено, что поверхность довольно неоднородна по физическим свойствам: диэлектрическая проницаемость изменяется от 3 до 9, что соответствует изменению плотности от $1,5$ до $4 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$. Обнаружены горные образования высотой 1—3 км с крутизной склонов $6-7^\circ$ и протяженностью 1—3 км.

Подробные данные о кратерах и других образованиях на поверхности Венеры были получены также Г. Петтенгилом, Г. Мазурским и другими радиолокационным методом, но с установкой радиолокатора на космическом аппарате «Пионер—Венера», выведенном на орбиту искусственного спутника планеты.

Наиболее интересным результатом этого эксперимента является обнаружение больших гор, по-видимому, вулканического происхождения. Местонахождение одной из этих гор совпадает с областью повышенного радиолокационного отражения (см. рис. 12), названной Максвелл. Эта гора возвышается на 6 км над протяженным плато, которое в свою очередь выше окружающей равнины на 3—5 км. Таким образом, по высоте эта гора равна примерно Эвересту. Протяженность плато составляет около 3000×1500 км, что примерно вдвое больше Гималайского плато. Плато пересекают три горных хребта с высотой от 3 до 6 км. Наиболее высокий хребет, на котором находится гора (Максвелл), имеет протяженность от 500 до 1000 км. На севере и западе плато окаймлено хребтами несколько меньшей высоты (2—3 км). Столь сложный гористый

рельеф указывает на тектоническую активность планеты Венера.

Другая большая гора, имеющая двуглавую форму, также совпадает с двумя областями повышенного радиолокационного отражения, названными Гаусс и Герц. Протяженность горы у основания около 1500 км.

По аналогии с земными геологическими образованиями можно предположить, что горы на Венере имеют вулканическое происхождение. Можно ожидать, что в ближайшем будущем будет составлена карта всей поверхности Венеры с разрешением около 10 км.

Показательно, что Международный астрономический союз еще в 1975 году создал специальную комиссию по наименованиям гор, кратеров и других образований на Венере. Учитывая, что Венера — единственная большая планета с названием женского рода, комиссия рекомендовала называть образования на Венере женскими именами.

Вместе с тем, отмечая большую роль радиоастрономии и радиолокации в исследовании этой планеты, в порядке исключения отдельным образованиям на Венере можно давать мужские имена — ученых, специалистов в области радиотехники и радиолокации.

Возвышенные области имеют более неровную и неоднородную поверхность, что вполне естественно, если эти возвышенности являются горами.

Обнаружена долина, вытянутая в восточно-западном направлении с перепадами высот до 7 км, имеющая, по-видимому, тектоническое происхождение. В ходе наземных радиолокационных измерений выявлено еще два разлома длиной 850 и 1500 км, вытянутых в долготном направлении. Глубины этих долин около 1,5 км. Не исключено, что вулканическая деятельность на Венере происходит и в настоящее время.

Как «выглядит» поверхность Венеры

Первые исследования «фактуры» поверхности Венеры, выяснение того, является ли она гладкой или неровной, также основаны на радиолокационных измерениях. В основе метода лежит определение направления излучения, отраженного поверхностью планеты. Известно, что для гладкой поверхности отражение имеет зеркальный характер, при котором при узкой



Рис. 18. Часть панорамы поверхности Венеры в месте посадки спускаемого аппарата АМС «Венера-9».

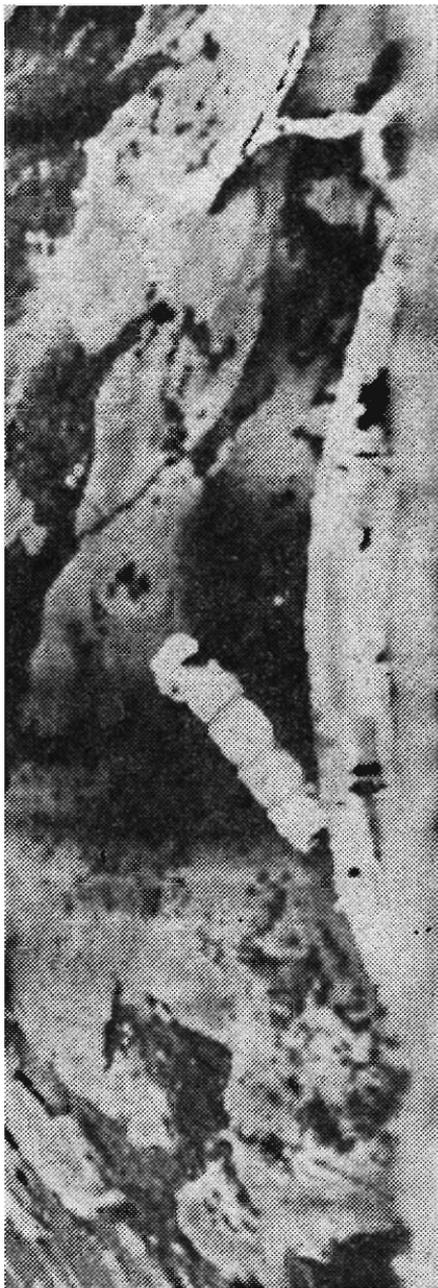


Рис. 19. Часть панорамы поверхности Всперы в месте посадки спускаемого аппарата АМС «Венера-10».

направленности падающего луча отраженный луч также имеет узкую направленность, а угол падения равен углу отражения. Отражение от шероховатой (в масштабе длины волны падающего излучения) поверхности имеет диффузный характер и качественно отличается от зеркального: разные неровности поверхности отражают падающий луч в различных направлениях, поэтому даже при узконаправленном падающем луче отражение происходит в очень широком телесном угле φ (по закону Ламберта диаграмма направленности отраженного излучения описывается функцией $\cos^2 \varphi$). Из измерений следует, что наряду с зеркальной компонентой отраженный сигнал имеет и диффузную компоненту, показывающую, что примерно 5% поверхности планеты имеет неровности с характерным размером от нескольких сантиметров до нескольких дециметров. Это могут быть мелкие кратеры или камни.

Определенные таким способом характеристики Венеры являются среднестатистическими и малоинформативны для установления того, как выглядит поверхность планеты. Действительно, представьте себе, что ваш друг, «из дальних странствий возвратясь», говорит, что в месте, в котором он был, 5% поверхности имеют бугорки (камни) или ямки размером от нескольких сантиметров до нескольких дециметров. Едва ли вы сможете представить себе, где он был и как выглядит это место. Другое дело, если бы он привез фотографии.

Получить фотографию венерианского пейзажа — давняя мечта астрономов. Однако ее осуществление — проблема большой технической сложности. Неизвестны освещенность поверхности и спектральный состав освещения, цвет поверхности и контрасты элементов рельефа, степень замутненности приповерхностной атмосферы. Приборы должны работать при температуре около 720 К и давлении около 90 атм. Группа инженеров под руководством А. С. Селиванова разработала специальные телевизионные камеры, которые были установлены на спускаемых аппаратах АМС «Венера-9» и «Венера-10». После посадки на поверхность в течение 30 мин были переданы панорамы поверхности планеты в местах посадки спускаемых аппаратов. В месте посадки спускаемого аппарата АМС «Венера-9»

(рис. 18) поверхность планеты довольно камениста; характерные размеры камней — несколько десятков сантиметров. Многие камни имеют острые грани, что свидетельствует об относительной молодости этого участка поверхности.

В месте посадки спускаемого аппарата АМС «Венера-10» (рис. 19) рельеф более гладкий, выходы скальных пород имеют сглаженные грани и пятнистую изъеденную поверхность. Пространство между скальными выходами покрыто слоем мелкозернистого грунта. Эти особенности обусловлены, по-видимому, эрозией и свидетельствуют об относительно большом геологическом возрасте горных пород.

ГЛАВА III

АТМОСФЕРА

Атмосфера — газовая оболочка планеты. Ее роль в физике самой планеты, и особенно в возможности возникновения и развития жизни на планете трудно переоценить. Действительно, атмосфера существенно влияет на тепловой баланс и температуру планеты. Она сглаживает разность дневной и ночной температур, определяет климат и погоду. Атмосфера защищает планету от бомбардировки метеорным веществом и метеоритами, от прямого воздействия высокоэнергетических космических лучей, от ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца. Поэтому важность изучения атмосферы не вызывает сомнения.

Давление, температура, плотность, ветер

Как уже упоминалось, атмосфера Венеры была открыта М. В. Ломоносовым в 1761 г., т. е. более 200 лет назад. Однако многочисленные попытки определить ее давление, химический состав и другие параметры с помощью астрономических наблюдений с Земли оказались малоэффективными. Полученные данные носили скорее качественный характер и не давали сколько-нибудь полной картины состава и структуры атмосферы. Однозначные надежные данные об атмосфере Венеры поступили только с началом исследования планеты с космических аппаратов, произведших спуск в ее атмосферу и осуществивших прямые измерения ее параметров.

Первые прямые измерения давления в атмосфере Венеры были проведены в 1967 г. В. С. Авдуевским, М. Я. Маровым и М. К. Рождественским на спускае-

мом аппарате АМС «Венера-4». В ходе спуска аппарата давление непрерывно увеличивалось от 0,6 до 7,2 атм, после чего прибор зашкалил. На основании полученных результатов конструкции последующих АМС серии «Венера» были модифицированы. В спускаемых аппаратах были установлены приборы, рассчитанные на больший интервал изменения давления и температуры. Был также усилен корпус спускаемого аппарата. С помощью аппаратов АМС «Венера-7» и «Венера-8» 15 декабря 1970 г. и 22 июля 1972 г. В. С. Авдучевский, М. Я. Маров и М. К. Рождественский произвели прямые измерения температуры и давления на всем участке спуска от высоты 55 км вплоть до поверхности. Давление атмосферы у поверхности оказалось равным 93 атм, т. е. примерно в 90 раз больше, чем на Земле, а температура 740 К. Для того чтобы попытаться «прочувствовать» эти параметры, произведем некоторые оценки. Из уравнения состояния

$$pV = \frac{1}{\mu} RT$$

(где p — давление, V — объем газа), определим плотность атмосферы ρ .

По данным АМС серии «Венера» основной компонентой атмосферы планеты является углекислый газ, поэтому молекулярная масса $\mu = 44$. При этих параметрах плотность атмосферы у поверхности будет равна

$$\rho_0 = 67 \cdot 10^{-3} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3} = 67 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3},$$

что лишь в 15 раз меньше плотности воды и в 50 раз больше плотности атмосферы Земли на уровне моря.

Аэродинамическое сопротивление газообразной среды движущемуся в ней телу пропорционально плотности среды и квадрату скорости. Следовательно, сопротивление «воздуха» в атмосфере Венеры при движении со скоростью v будет таким же, как в атмосфере Земли при движении со скоростью $\sqrt{50} v \approx 7v$. Например, пешеход, идущий со скоростью 6 км/ч, должен будет преодолевать в атмосфере Венеры такое же сопротивление воздуха, как мотоциклист, едущий на Земле со скоростью 42 км/ч. Столь большое сопротивление воздуха, по-видимому, сделает для

человека невозможным бег на Венере. Действительно, спринтер, пробегающий на Земле 100 м за 10 с (скорость 36 км/ч) при попытке бежать с такой же скоростью в атмосфере Венеры должен был бы преодолеть сопротивление, соответствующее в земных условиях воздушному потоку, движущемуся со скоростью 250 км/ч. Поэтому даже для автомобиля на Венере скорость около 30 км/ч окажется, по-видимому, предельной.

Из сказанного выше следует также, что воздействие ветра на какие-либо предметы в атмосфере Венеры будет гораздо сильнее, чем на Земле. Так, не очень сильный по земным понятиям ветер со скоростью около 10 м/с в атмосфере Венеры будет подобен земному урагану, имеющему скорость 70 км/ч. Однако, к счастью, у поверхности планеты ветровые движения очень медленны, типичные скорости ветра в этой области составляют 1—2 м/с. Эти результаты первоначально были получены с помощью очень оригинального метода (предложенного В. В. Кержановичем), о котором следует рассказать более подробно.

При снижении спускаемого аппарата на парашюте, кроме вертикальной составляющей движения, появляется горизонтальная составляющая, обусловленная ветром. Так как спускаемый аппарат практически полностью увлекается ветром, то скорость его горизонтального движения равна скорости ветра. Следовательно, измерив горизонтальную составляющую скорости движения спускаемого аппарата, можно определить скорость (и направление) ветра. Выше мы уже излагали метод определения скорости движения, основанный на доплеровском эффекте изменения частоты отраженного сигнала. Подобный метод применим и для определения скорости движения спускаемого аппарата. Установив на нем радиопередатчик и измеряя изменения частоты $\Delta\nu$, из соотношения

$$\Delta\nu = v_0 \frac{v}{c}$$

можно определить скорость движения аппарата v . Более того, так как на спускаемом аппарате уже есть радиопередатчик для передачи на Землю по телеметрическому каналу данных научных приборов, то такие измерения можно провести и без специального

радиопередатчика. Однако выполнение этого эксперимента связано со значительными методическими и техническими трудностями. Методически для выделения горизонтальной составляющей скорости движения спускаемого аппарата в атмосфере Венеры необходимо вычесть скорости взаимного движения Венеры и Земли и их вращения, а также учесть вертикальную компоненту скорости спуска на парашюте в спокойной атмосфере.

Технически для результативного осуществления этого эксперимента необходима высокая стабильность частоты излучения радиопередатчика, установленного на спускаемом аппарате, так как изменение его частоты $\delta\nu$, обусловленное нестабильностью, нельзя отделить от измеряемого доплеровского смещения.

Результаты измерений описанным методом показали, что у поверхности Венеры скорость ветра мала. С увеличением высоты она монотонно возрастает. Наиболее быстрое ее возрастание происходит в интервале высот от 10 до 20 км, где скорость ветра увеличивается примерно от 10 до 30—40 м/с.

В последующем этот метод был развит С. Конселманом и другими американскими исследователями, которые дополнили доплеровские измерения, определяющие скорость космического аппарата по лучу зрения, измерениями углового смещения луча зрения по двум ортогональным координатам, чтобы в итоге можно было найти все три компоненты скорости ветра, определив ее величину и направление. Это усовершенствование, очевидное по замыслу, чрезвычайно сложно, однако, для практической реализации, так как требует очень высокого углового разрешения антенной системы, на которую производится прием радиоизлучения. К счастью, такая система уже была разработана, хотя и для других целей. В радиоастрономии для исследования детальной структуры квазаров был создан радиоинтерферометр со сверхдлинной базой (РСДБ). Идея этого радиоинтерферометра, предложенная советским ученым Л. И. Матвеевко, состоит в том, что на каждой из антенн регистрация и измерение фазы радиоизлучения наблюдаемого радиосточника производятся независимо друг от друга. Это открывает возможность увеличения расстояния L между антеннами до нескольких тысяч километров

в соответствующего увеличения угловой разрешающей способности, определяемой отношением λ/L , где λ — длина волны принимаемого излучения.

Для измерения скорости ветра в атмосфере Венеры была использована система, включающая четыре антенны станций слежения за космическими объектами, находящиеся в США, Австралии, Чили и на о. Гуам. Данные измерений скорости ветра ниже облачного слоя в основном согласуются с изложенными выше результатами советских исследователей. В середине облачного слоя получены скорости ветра до 70 м/с, что также согласуется со скоростью перемещения Y-образной детали облачного слоя, наблюдаемой на фотографиях Венеры в ультрафиолетовой области спектра. Согласуется и направление ветра, соответствующее движению Y-образования в направлении обратного вращения планеты.

Прямые измерения скорости ветра были произведены анемометрами спускаемых аппаратов АМС «Венера-9» и «Венера-10» во время их работы на поверхности планеты. По этим данным скорость ветра у поверхности планеты составляет всего около 1 м/с.

Характерной чертой экспериментов, проводимых на космических аппаратах серии «Венера», было результативное извлечение информации не только из данных измерений, выполненных научной аппаратурой, но и из служебных измерений качества работы аппаратуры, а также использование различного рода побочных эффектов. Один из таких примеров — определение скорости ветра по измерению изменения частоты бортового передатчика телеметрических данных — был приведен выше. Другой не менее яркий пример приводится ниже.

На спускаемых аппаратах АМС «Венера-9» и «Венера-10» были установлены фотометры для измерения освещенности на разных уровнях атмосферы Венеры. Для определения радиационного баланса в атмосфере измерялось независимо излучение, идущее сверху вниз и снизу вверх. О результатах этих измерений мы поговорим ниже. Сейчас же речь пойдет о том, что непосредственно после посадки на поверхность фотометры зарегистрировали резкое ослабление излучения, идущего снизу, а спустя известное время — некоторое менее значительное ослабление излучения, идущего

сверху. Через короткое время интенсивность излучения вновь увеличивалась и выходила на стационарный уровень (рис. 20).

Таким образом, в момент посадки возникает, а затем пропадает некоторый фактор, уменьшающий излучение атмосферы, попадающее на фотометры, установленные на спускаемом аппарате.

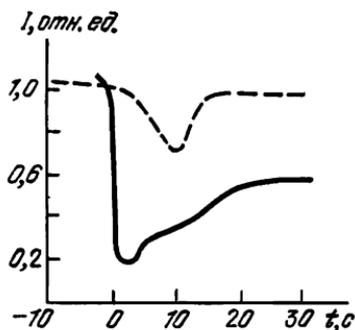


Рис. 20. Изменение световых потоков, зарегистрированных спускаемым аппаратом АМС «Венера-10» в момент посадки на поверхность.

Сплошная кривая — восходящий, пунктир — нисходящий потоки.

оценить скорость ветра у поверхности, которая найдена равной 0,5—1 м/с, что хорошо согласуется с данными прямых измерений.

Этот эксперимент показал также наличие пыли на поверхности Венеры. Средняя толщина слоя пыли оценена в 0,1—0,01 мм, а поверхностная ее плотность — в 0,01—0,001 г·см⁻². Мало это или много? При такой запыленности пола в квартире площадью 50 м² при уборке пылесосом было бы собрано от 0,5 до 5 кг пыли!

Большая плотность атмосферы существенно изменяет условия падения тел на поверхность планеты.

Скорость установившегося движения при падении тела с учетом аэродинамического торможения среды плотностью ρ определяется соотношением

$$v = \sqrt{2Mg/(C_x S \rho)},$$

где M — масса тела, g — ускорение свободного паде-

ния, S — площадь поперечного сечения тела, C_x — аэродинамический коэффициент сопротивления.

В атмосфере Венеры можно безопасно прыгнуть с самолета с зонтиком ($S \approx 0,5 \text{ м}^2$), причем скорость приземления будет такой же ($v \approx 2 \text{ м/с}$), как при прыжке в земных условиях со стула, конечно, при условии, что зонтик не сломается в этом смелом эксперименте. Но даже если зонтик сломается, можно не отчаиваться. Скорость установившегося свободного падения человека в атмосфере Венеры будет в семь раз меньше, чем в атмосфере Земли и составит около 10 м/с . Это обстоятельство было использовано при посадке спускаемых аппаратов АМС «Венера-9», «Венера-10», «Венера-11» и «Венера-12». Для уменьшения времени спуска и предотвращения перегрева спускаемых аппаратов спуск на парашюте производился только в облачном слое. Ниже его, на высоте около 50 км , парашют отделялся и спускаемый аппарат свободно падал. Даже в таких условиях спуск от момента отделения парашюта до момента достижения поверхности занимал более 50 мин , а скорость посадки аппарата на поверхность составляла всего около 8 м/с , т. е. была такой же, как если бы в отсутствие атмосферы аппарат был сброшен с высоты 4 м .

Выше были приведены данные измерения параметров околоповерхностной атмосферы Венеры. А каковы условия на больших высотах? Как изменяются температура и давление с высотой?

Качественный ответ на этот вопрос можно дать, также исходя из общих законов физики. Давление атмосферы создается столбом вышележащего газа. При увеличении высоты на величину Δh имеем

$$\Delta p = -g\rho\Delta h,$$

где ρ — плотность газа.

Переходя последовательно от одного слоя к другому, получим распределение давления по высоте в виде известной формулы, называемой барометрической *):

$$p(h) = p_0 \exp\left(-\frac{gH}{RT}h\right) = p_0 \exp\left(-\frac{h}{H}\right).$$

*) При выводе этой формулы не учитывалась зависимость плотности от температуры.

Таким образом, распределение давления по высоте в атмосфере планеты должно описываться экспоненциальной функцией. Стоящее в показателе экспоненты отношение

$$H = \frac{RT}{\mu g}$$

(R — универсальная газовая постоянная), определяющее скорость уменьшения давления, называют *шкалой высот*. На высоте $h = H$ давление атмосферы уменьшается в $e = 2,718$ раза. Чем больше H , тем медленнее уменьшается давление с высотой, тем более протяженна атмосфера планеты. В атмосфере Земли $H = 8$ км; отсюда нетрудно оценить, что на вершине Эльбруса ($h = 5,6$ км) давление должно составлять

$$p = 1 \text{ атм} \cdot \exp\left(-\frac{5,6}{8}\right) = 0,5 \text{ атм},$$

а на вершине высочайшей горы Земли Эвереста ($h = 8,8$ км) $p \approx 0,3$ атм.

Шкала высот определяется отношением температуры T к молекулярной массе атмосферы μ . Поэтому у поверхности Венеры, где температура выше земной почти в 2,5 раза, а молекулярная масса атмосферы больше лишь в 1,5 раза, шкала высот больше, чем у Земли в 1,85 раза и составляет примерно 15 км.

Изменение температуры атмосферы с высотой также может быть оценено из общефизических соображений. Температура атмосферы должна уменьшаться с высотой. Для пояснения этого переместим некоторую массу «воздуха» по высоте и посмотрим, как при этом изменится его температура. Выше было показано, что при подъеме вверх давление уменьшается, газ расширяется, при расширении совершает работу и, следовательно, тратит энергию и его температура уменьшается. Для количественной оценки этого процесса в первом приближении можно принять, что источником нагрева атмосферы служит поверхность планеты, которую солнечные лучи достигают, не поглощаясь в атмосфере.

Тогда, за исключением приповерхностного слоя, атмосфера не имеет *) источников притока или расхо-

*) При указанном выше предположении об отсутствии поглощения теплового излучения в атмосфере.

да тепла, т. е. происходящие в ней процессы будут адиабатическими. Связь между основными параметрами газа описывается в этом случае уравнением состояния

$$pV = \frac{1}{\mu} RT.$$

В адиабатическом процессе работа, затраченная на расширение газа $A p \Delta V$, уменьшает энергию молекул газа и, следовательно, температуру на

$$\Delta T = \frac{A p \Delta V}{C_V}.$$

Здесь A — тепловой эквивалент работы, C_V — теплоемкость при постоянной объема. Используя уравнение состояния и проводя ряд промежуточных преобразований, можно получить соотношение, описывающее распределение температуры по высоте

$$T(h) = T_0 \left[\frac{p(h)}{p_0} \right]^{\frac{C_p - C_V}{C_p}} = T_0 \left[\frac{p(h)}{p_0} \right]^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}},$$

где T_0 и p_0 — температура и давление у поверхности, $\gamma = C_p/C_V$ — отношение теплоемкостей газа при постоянном давлении и при постоянном объеме.

Скорость уменьшения температуры по высоте, называемая *температурным градиентом*, определяется соотношением

$$\beta = \frac{\Delta T}{\Delta h} = - \frac{A g}{C_p}.$$

Такова теория. А каково фактическое состояние? Ответ на этот вопрос также дали измерения на космических аппаратах, советских серии АМС «Венера» и американских серии «Маринер» и «Пионер».

Как уже упоминалось выше, спускаемые аппараты серии «Венера» производили измерения температуры и давления в интервале высот от 55 км до поверхности планеты. В этом интервале распределение температуры и давления по высоте хорошо согласуется с расчетным для атмосферы, состоящей в основном из углекислого газа. Выше указывалось, что шкала высот атмосферы Венеры $H = 15$ км, а на Земле $H = 8$ км, т. е. в атмосфере Венеры давление уменьшается с высотой медленнее, чем на Земле, и, следо-

вательно, атмосфера Венеры более протяженна, чем земная. Температурный градиент β атмосферы Венеры в указанном интервале высот составляет около -9 К/км. В атмосфере Земли (в тропосфере) $\beta = -9,8$ К/км.

Измерение параметров атмосферы Венеры на больших высотах было произведено американским космическим аппаратом «Маринер-5», который пролетел около планеты на следующий день после спуска в ее атмосфере АМС «Венера-4». В отличие от советского космического аппарата, аппарат «Маринер-5» не имел спускаемого аппарата и измерение параметров атмосферы Венеры производилось косвенным методом так называемого радиопросвечивания. Суть этого метода заключается в следующем.

При изменении показателя преломления среды, в которой распространяется электромагнитное излучение, изменяется и направление его распространения. Это явление называется *рефракцией*. Показатель преломления зависит от плотности. Поэтому в атмосфере планеты, плотность которой изменяется по высоте, траектория распространения излучения искривляется. Если какой-либо источник излучения находится для земного наблюдателя за атмосферой планеты, его излучение проходит сквозь атмосферу (просвечивает ее) и поступает к земному наблюдателю не по прямой, а по искривленной, т. е. более длинной траектории. Таким источником может быть радиопередатчик, установленный на космическом аппарате, траектория которого выбрана так, чтобы для земного наблюдателя он «заходил» за планету. При движении космического аппарата излучение источника просвечивает области с разной плотностью и, следовательно, с разными показателями преломления. За счет этого длина пути радиосигнала изменяется, что эквивалентно для земного наблюдателя видимому смещению источника излучения*). Возникающий при этом эффект Доплера изменяет частоту принимаемого излучения, а по ее величине, решая обратную задачу, можно определить показатель преломления атмосферы и при известном

*) Действительное смещение, обусловленное движением аппарата и движением Земли, учитывается и исключается по внесателенным наблюдениям.

химическом составе атмосферы — распределение температуры и давления по высоте.

В качестве источника излучения на аппарате «Маринер-5» использовался бортовой радиопередатчик для передачи на Землю показаний научных приборов. Это еще один пример эффективного использования аппаратуры, установленной на космическом аппарате, масса которого ограничена.

В результате измерений, проведенных А. Клином, Дж. Филдбо и др., были определены высотные профили температуры и давления в интервале высот от 90

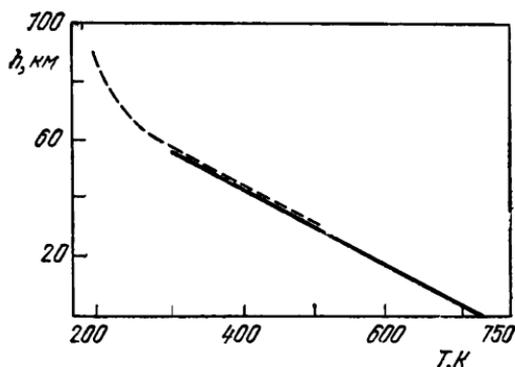


Рис. 21. Высотный профиль температуры в атмосфере Венеры. Сплошная крива — измерения АМС серии «Венера», пунктир — измерения «Маринер-5» и «Маринер-10».

до 35 км. Напомним, что спускаемые аппараты АМС серии «Венера» произвели измерения в интервале высот от 55 км до поверхности планеты. В интервале высот от 55 до 35 км, где измерения АМС «Венера» и аппарата «Маринер» перекрываются, полученные данные находятся в хорошем согласии.

Определенные по этим данным высотные профили температуры и давления атмосферы Венеры приведены на рис. 21 и 22. Характеристики атмосферы на высотах более 90 км определялись по измерениям свечения верхней атмосферы, по торможению спускаемых аппаратов при входе в атмосферу, по затмению Венерой звезд и по модельным расчетам. Полученные данные в сочетании с изложенными выше приводят к структуре атмосферы Венеры, изображенной на рис. 23. Как и в атмосфере Земли, в атмосфере Венеры

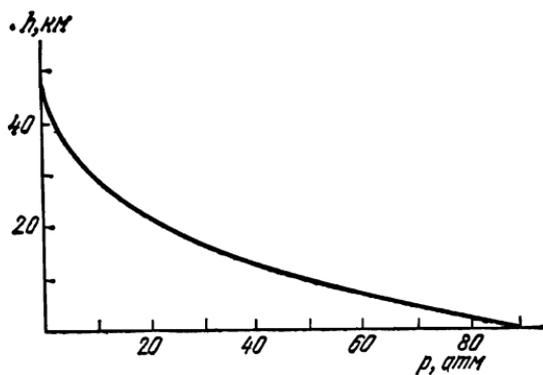


Рис. 22. Высотный профиль давления в атмосфере Венеры.

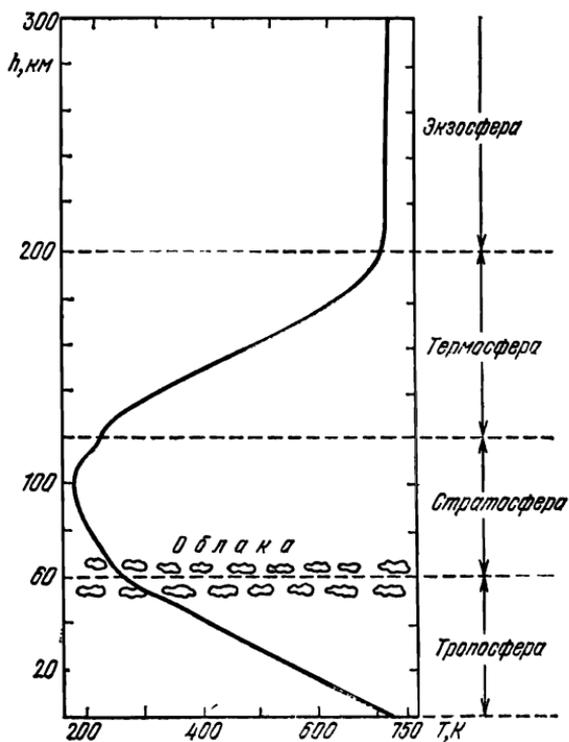


Рис. 23. Структура атмосферы Венеры. Показано высотное распределение температуры и облачный слой.

выделяются области с различным характером зависимости температуры от высоты. От поверхности до высоты около 60 км температура монотонно уменьшается с примерно одинаковым отрицательным градиентом $\beta = -9 \text{ К/км}$, соответствующем адиабатическому градиенту. Это область конвективного перемешивания атмосферы, соответствующая земной *тропосфере*. Выше 60 км расположена область примерно постоянной температуры около 200 К, соответствующая земной *стратосфере*. На высотах более 110 км начинается *термосфера*, в которой температура увеличивается с высотой. Наконец, с высоты примерно 200 км начинается экзосфера — область приблизительно постоянной температуры, в которой длина свободного пробега частиц больше шкалы высот атмосферы, и где может происходить диссипация атомов и молекул в околопланетное пространство.

Мы уже указывали, что измерения высотных профилей температуры и давления методом радиопросвечивания проводились в интервале высот от 90 до 35 км. Природа ограничения сверху довольно очевидна: на больших высотах плотность атмосферы слишком мала, чтобы можно было измерить изменение траектории луча за счет рефракции и вызываемое этим изменение частоты радиосигнала. А что ограничивает эти измерения снизу? Почему нельзя исследовать атмосферу до поверхности планеты? Ответ на этот вопрос приводит к еще одной интересной особенности атмосферы Венеры — явлению сверхрефракций.

О рефракции в атмосферах планет и ее причине — изменении плотности и показателя преломления с высотой — мы уже говорили. Так как плотность уменьшается с высотой, то знак рефракции таков, что траектория луча в атмосфере искривляется в сторону планеты (рис. 24). За счет этого источник электромагнитного излучения кажется наблюдателю выше его истинного положения. Кривизна траектории увеличивается с увеличением плотности и зенитного угла наблюдения z . Радиус кривизны r достигает максимального значения r_{\max} у поверхности планеты при наблюдении в горизонтальном направлении ($z = 90^\circ$). Однако в атмосфере Земли значение r_{\max} остается больше радиуса Земли. Поэтому на Земле можно видеть объекты, принимать посылаемое ими радиоизлуче-

ние и направлять ответные сигналы под очень малыми углами к горизонту. В атмосфере Венеры из-за значительно большей ее плотности величина r_{max} меньше радиуса планеты. На планете с более плотной атмосферной радиус кривизны траектории луча может на некотором уровне сравняться с радиусом планеты (рис. 25). Тогда направленный горизонтально луч должен обогнуть планету и замкнуться в том

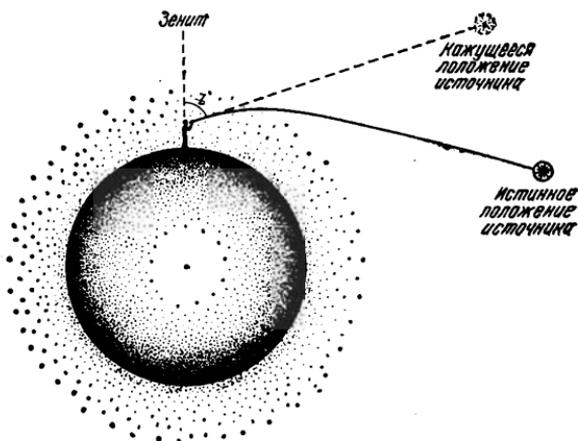


Рис. 24. Рефракция в атмосфере планеты.

же месте, откуда он вышел. В этом случае, соответствующем критической рефракции, если не учитывать поглощение излучения в атмосфере, можно в принципе увидеть свой собственный затылок. На меньших высотах и соответственно при больших плотностях атмосферы радиус кривизны траектории луча меньше радиуса планеты, и при горизонтальном направлении визирования луч будет отклоняться вниз, попадая на поверхность планеты (сверхрефракция). Поэтому при радиопросвечивании атмосферы планеты зондирующий радиосигнал, не искривленная рефракцией траектория которого в точке, наиболее близкой к поверхности, горизонтальна, в области сверхрефракции попадет на поверхность и до земного наблюдателя радионизлучение с космического аппарата не дойдет.

В атмосфере Венеры уровень критической рефракции находится на высоте около 35 км, что как раз

соответствует нижней границе интервала высот, в котором производились измерения параметров атмосферы методом радиопросвечивания.

К сожалению, увидеть свой собственный затылок на Венере не удастся и, таким образом, не реализуется заманчивая возможность с одного места видеть всю

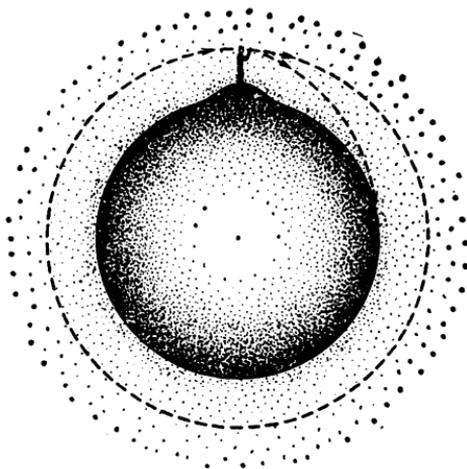


Рис. 25. Критическая рефракция и сверхрефракция в очень плотной атмосфере планеты.

поверхность планеты и все находящиеся на ней предметы. В приложении к Земле это означало бы возможность, поднявшись на такую горку, чтобы ближайшие дома или деревья не загромождали обзора, и вооружившись хорошей подзорной трубой, увидеть Эйфелеву башню в Париже, лондонский Биг Бэн, римский Колизей и много других интересных мест. Если бы это было так, свет электрической лампы, помещенной на той же горке, можно было бы увидеть в Париже, Лондоне, Риме и т. д. Очевидно, однако, что распространенный на такую большую площадь световой поток лампы будет ничтожно мал, ниже чувствительности глаза. Кроме того, дальность прямой видимости определяется не только отсутствием препятствий на луче зрения, но и поглощением и рассеянием излучения. Даже в 60 раз менее плотной атмосфере Земли в обычных условиях видимость состав-

ляет 5—10 км и лишь в относительно редких случаях очень чистой атмосферы увеличивается примерно до 30 км. В области сверхрефракции в атмосфере Венеры к указанным факторам добавится рефракционное ослабление.

Химический состав

Химический состав атмосферы планеты определяется условиями ее формирования и эволюцией. Согласно наиболее принятым представлениям первичные атмосферы планет образовались после окончания формирования самих планет захватом газа либо из протопланетной туманности, либо из солнечного ветра, который в то время мог быть более интенсивным, либо из какого-либо внешнего источника.

Самым распространенным элементом Вселенной является водород, относительное содержание которого (по числу атомов) составляет 90%, второй по распространенности элемент — гелий, его относительное содержание 9%. Доля всех других элементов составляет около 1%. Из них наиболее распространены во Вселенной кислород, азот, углерод, неон и железо. Поэтому можно было бы ожидать, что первичную атмосферу планеты, если она формируется из протопланетного сгустка, образуют герчисленные элементы, а также их соединения, такие как H_2 , N_2 , O_2 , H_2O , NH_3 , CH_4 , CO_2 . Однако есть ряд факторов, действие которых может изменить первоначальный состав атмосферы. Одним из них является диссипация атмосферы. Атомы и молекулы газа находятся в постоянном тепловом движении. Часть из них, имеющая скорости, превышающие вторую космическую

$$v_2 = \sqrt{\frac{2GM}{R}},$$

где G — гравитационная постоянная, M — масса планеты, R — расстояние от ее центра, может преодолеть притяжение планеты и уйти в межпланетную среду. Однако в нижних плотных слоях атмосферы, где число молекул очень велико (у поверхности Венеры в 1 см^3 содержится около 10^{21} молекул), процессу ускользания молекул препятствуют их частые столкновения (длина свободного пробега составляет лишь около 10^{-7} см). С увеличением высоты число молекул

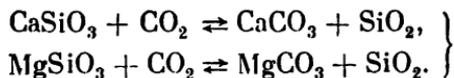
уменьшается, расстояния между ними и длина свободного пробега увеличиваются и молекулы могут покидать атмосферу.

Средняя скорость теплового движения определяется соотношением

$$V_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}},$$

где T — температура, m — масса молекул, k — постоянная Больцмана. Вторая же космическая скорость определяется гравитацией, т. е. массой планеты. Поэтому наибольшие скорости и, следовательно, наибольшие возможности для ускользания из атмосферы имеют легкие газы — водород и гелий. Удержать их может только планета с большой массой, испытывающая сильное гравитационное взаимодействие. Действительно, как показали измерения, атмосферы больших планет Юпитера и Сатурна состоят в основном из водорода и гелия и в них присутствуют водородсодержащие газы аммиак и метан. В атмосфере Венеры легкие газы за время существования Солнечной системы, исчисляемое несколькими миллиардами лет, не могли сохраниться.

Другим фактором, влияющим на состав атмосферы, являются химические реакции, связывающие «первичные» газы. В частности, кислород активно вступает в химические соединения с кремнием и металлами, образуя различные силикаты и оксиды, входящие в состав твердого тела планеты. Углекислый газ также связывается с силикатами поверхностных пород согласно реакции так называемого волластонитового равновесия



Равновесие этой реакции зависит от температуры. При температурах, характерных для Земли, равновесие смещается вправо и углекислый газ связывается в породах земной коры. По оценке А. П. Виноградова, общее количество углекислоты, связанной в земных осадочных породах, составляет $4 \cdot 10^{17}$ т.

Таким образом, из перечисленных газов протопланетной туманности не диссипирует в межпланетную среду и, по-видимому, не будет связан поверхностны-

ми породами лишь азот. Поэтому первоначально предполагалось, что основной компонентой атмосферы Венеры является азот. Это предположение делалось так же на основании аналогии с Землей, атмосфера которой почти на 80% состоит из азота.

В процессе формирования планеты из протопланетного облака она должна была разогреваться сначала из-за выделения гравитационной энергии, а затем за счет радиоактивного излучения слагающих пород. При этом происходило выделение вторичных газов из недр планеты, в основном выброс их при вулканических процессах. Исследование химического состава атмосферы дает ключ к пониманию всей совокупности указанных проблем и является одной из важных задач физики Венеры.

Первые попытки исследования химического состава атмосферы Венеры были предприняты в 20-х годах нашего века на основе развитых к этому времени методов применения спектроскопии для исследования химического состава небесных тел. Однако возможности спектрального метода ограничены компонентами, имеющими спектральные линии в видимой и инфракрасной части спектра, доступной для наблюдения с Земли. Азот, к сожалению, не относится к их числу. Больше повезло углекислому газу. В 1932 г. В. Адамс и М. Данхэм обнаружили в спектре инфракрасного излучения Венеры полосы поглощения, соответствующие этому газу. Однако оценки его относительного содержания варьировали в широких пределах и основной компонентой по-прежнему считали азот.

Эффективное и плодотворное исследование химического состава атмосферы Венеры стало возможным практически лишь с помощью космических аппаратов, спускаемых в атмосфере планеты и производящих ее прямой химический анализ.

Содержание азота, измеренное советскими АМС серии «Венера» и американскими космическими аппаратами серии «Пионер — Венера», оказалось действительно близким к земному. Его масса, отнесенная ко всей массе планет, для Венеры, как и для Земли, равна примерно $2 \cdot 10^{-6}$ г/г, а так как массы обеих планет мало отличаются друг от друга, то примерно одинаково и абсолютное количество азота в их атмосферах. Однако масса всей атмосферы Венеры значитель-

но больше массы атмосферы Земли, и поэтому азот не является основной компонентой атмосферы Венеры; его относительное содержание составляет лишь около 3%.

Вопрос об основной компоненте атмосферы Венеры был решен первым космическим аппаратом, осуществившим спуск в ее атмосфере. Это был советский космический аппарат «Венера-4», о котором мы уже говорили выше. Анализ химического состава атмосферы, проведенный группой советских ученых под руководством А. П. Виноградова и Ю. А. Суркова, показал, что такой компонентой является углекислый газ. Его концентрация составляет около 96%.

Существовавшее до этого представление об азоте как основной компоненте (как и об умеренной температуре поверхности) было столь живучим, что полученный результат сначала озадачил ученых. Но замешательство продолжалось недолго. А. П. Виноградов и В. П. Волков, обратившись к реакции воластаонитового равновесия, указали, что при высокой температуре Венеры эта реакция сильно смещается влево и углекислый газ, связанный в поверхностных породах, освобождается в атмосферу. Как упоминалось выше, в земной коре связано около $4 \cdot 10^{17}$ т углекислого газа. При температуре поверхности 720 К количество углекислого газа, выделившееся в атмосферу, должно соответствовать парциальному давлению около 100 атм. Таким образом, эволюционно атмосфера Венеры отличается от земной тем, что в связи с большей близостью к Солнцу и обусловленной этим более высокой температурой, углекислый газ не был связан поверхностными породами планеты и образовал гораздо более массивную, чем у Земли атмосферу, в которой он оказался основной компонентой.

Интересно отметить, что если бы температура Земли повысилась по каким-либо причинам до венерианской, в ее атмосферу, кроме $4 \cdot 10^{17}$ т углекислого газа, связанного в поверхностных породах, добавилось бы около $15 \cdot 10^{17}$ т водяного пара, образовавшегося вследствие испарения океанов (при средней их глубине 3 км), в результате чего давление атмосферы у поверхности увеличилось бы примерно до 400 атм, т. е. до величины, в четыре раза превышающей давление атмосферы Венеры.

Другим существенным отличием атмосферы Венеры от земной является малое содержание кислорода. В то время как в атмосфере Земли содержится около 20% кислорода, его концентрация в атмосфере Венеры меньше 0,01%. Это различие свидетельствует в пользу гипотезы о том, что в земной атмосфере кислород образовался в результате жизнедеятельности растений.

Особый интерес представляет анализ содержания и изотопного состава в атмосфере Венеры инертных газов. Дело в том, что по своей природе инертные газы не вступают в химические реакции, а физические их свойства таковы, что при температуре атмосферы Венеры они остаются в газообразном состоянии и не переходят в жидкие или твердые аэрозоли, которые могут выпадать на поверхность, уходя при этом из атмосферы. Наконец, молекулы инертных газов (за исключением гелия) достаточно тяжелы, чтобы не диссипировать из атмосферы Венеры в межпланетное пространство. Поэтому инертные газы должны сохраниться в атмосфере планеты со времени ее образования и несут, таким образом, информацию о первичном составе атмосферы.

В атмосфере Земли наиболее распространенный инертный газ аргон, концентрация которого составляет около 1%. Аргон в земной атмосфере представлен в основном радиогенным изотопом ^{40}Ar , рождающимся при радиоактивном распаде калия ^{40}K в литосфере и попадающим в атмосферу в процессе дегазации. Первичного аргона ^{36}Ar в атмосфере Земли в 300 раз меньше, чем ^{40}Ar . Это соотношение свидетельствует о том, что в формировании атмосферы Земли процессы дегазации из литосферы играли важную роль.

В атмосфере Венеры содержание изотопов аргона существенно изменено в пользу нерадиогенного изотопа ^{36}Ar , которого даже несколько больше, чем радиогенного изотопа ^{40}Ar . Следовательно, роль процессов дегазации в формировании ее атмосферы существенно меньше. Основываясь на этом, М. Н. Изаков полагает, что атмосфера Венеры является первичной, т. е. образовалась в результате перетекания (аккреции) газа протопланетной туманности на планету.

Важную роль в физике планет играет вода и водяной пар. Фазовые переходы из жидкого в газооб-

разное и твердое состояния и обратно связаны с поглощением или выделением тепла. Водяной пар поглощает инфракрасное излучение. Оба указанных фактора изменяют тепловой режим планеты.

В атмосфере Земли водяной пар образуется в основном у поверхности в результате испарения воды из водоемов и из почвы. Затем за счет диффузии и турбулентного перемешивания он поднимается в более высокие слои атмосферы. Так как температура атмосферы уменьшается с высотой, максимально возможное давление водяного пара не может превышать давления насыщенного пара. Последнее же быстро уменьшается с уменьшением температуры. Поэтому с увеличением высоты давление водяного пара уменьшается быстрее, чем по барометрической формуле, и относительное его содержание будет уменьшаться. Избыточный водяной пар конденсируется в капли воды, из которых образуются облака. Круговорот воды на Земле завершается осадками в виде дождя или снега, переносящими воду из облаков на поверхность Земли.

На Венере круговорот воды должен существенно отличаться от земного. В атмосфере этой планеты вода не может существовать в жидкой фазе выше 37 км, где температура 430 К и давление 5,5 атм соответствуют критическим параметрам воды. Образование водяного пара из воды может поэтому происходить только выше этого уровня, а не на поверхности, и концентрация водяного пара в атмосфере Венеры, по-видимому, должна быть максимальной не у поверхности планеты, как на Земле, а на высотах около 40 км.

Что же дает эксперимент? Первые измерения концентрации водяного пара, проведенные А. П. Виноградовым и Ю. А. Сурковым на АМС «Венера-4», «Венера-5», «Венера-6» на высотах 55—45 км дали 0,6—1,1%. По оценкам А. Д. Кузьмина и Т. В. Смирновой, основанным на данных радиоастрономических и радиолокационных измерений, относящихся к высотам 30—15 км, относительное содержание водяного пара около 0,1%. Такую же концентрацию водяного пара получил В. И. Мороз, проводивший с группой сотрудников спектроскопические измерения на АМС «Венера-9» и «Венера-10» на высотах 35 ± 10 км.

В. Ояма, Дж. Карл, Ф. Уолер и Дж. Поллак на космическом аппарате «Пионер — Венера» провели

измерения на трех высотах — 54, 44 и 24 км и получили относительное содержание водяного пара 0,06, 0,52 и 0,14% соответственно.

По измерениям спектра солнечного излучения в глубоких слоях атмосферы, выполненным на АМС «Венера-11» и «Венера-12», В. И. Мороз, Н. А. Парфентьев и Н. Ф. Савько пришли к выводу, что объем водяного пара у поверхности на порядок меньше, чем в облачном слое. Так, по их данным относительное содержание водяного пара в облачном слое Венеры составляет 0,02%.

Таким образом, эксперимент, по-видимому, подтверждает предположение о том, что в атмосфере Венеры относительное содержание водяного пара максимально на высоте 40—50 км, и уменьшается как на больших, так и на меньших высотах.

Однако в оценке абсолютных количеств водяного пара в атмосфере Венеры данные разных исследований расходятся.

Облака

Выше уже упоминалось, что Венера покрыта постоянным облачным слоем, закрывающим ее поверхность для земного наблюдателя. Однако проблема природы облаков планеты, их состава очень сложна и до сих пор еще полностью не решена.

Сталкиваясь с новым явлением природы или новым объектом изучения, исследователь начинает обычно с попыток найти аналогии с уже известными ему и применить их в прямой или модифицированной форме для объяснения нового. С астрономической точки зрения наша Земля также является планетой. Поэтому полезно обратиться к облакам в атмосфере Земли, их природе и составу, а также методам, которыми были получены данные о них.

Источником информации о земных облаках служат прежде всего визуальные наблюдения их размеров и формы, исследование выпадающих из облаков осадков, прямые измерения структуры и состава облаков с аэростатов и самолетов. Применяются также инструментальные исследования оптических характеристик (поляризации и направления отраженного света), радиолокационные и радиоастрономические измерения,

Земные облака состоят из мелких капель воды или ледяных кристаллов. Водный состав облаков согласуется и с источником их образования — водяным паром в атмосфере, испаряющимся с поверхности Земли. Наиболее простой механизм образования водяных капель — конденсация водяного пара при адиабатическом охлаждении газа в восходящем воздушном потоке. При температуре ниже точки росы водяной пар становится пересыщенным и переходит в жидкую фазу. Для образования зародыша капли необходимо, чтобы при беспорядочном движении столкнулись и объединились одновременно несколько молекул пара. Однако вероятность таких одновременных столкновений очень мала. Так, даже при двукратном пересыщении в объеме 1 см^3 один зародыш капли образуется за время 10^{62} лет (!), и лишь при четырехкратном пересыщении — за 1 с. Поэтому для самопроизвольного образования из пара жидких капель в чисто газовой среде нужно весьма значительное пересыщение. Процесс конденсации значительно ускоряется, если в газе есть частицы какого-либо твердого или жидкого вещества. Такие частицы играют роль ядер, на которых начинается процесс конденсации пара и образования капель. Особенно эффективно идет конденсация на частицах вещества, адсорбирующего на своей поверхности молекулы водяного пара. Интересно отметить, что одним из наиболее сильных сорбентов для воды является серная кислота. К серной кислоте мы вернемся позднее при рассмотрении вероятного состава облаков Венеры. Особенно эффективно идет конденсация на ядрах вещества, растворимого в воде. При адсорбции воды такой частицей образуется концентрированный раствор. А давление насыщенного пара *над раствором* какого-либо вещества в воде *меньше*, чем над чистой водой. Поэтому на подобном ядре могут образовываться и расти капли даже в ненасыщенном водяном паре. По мере роста капли концентрация раствора убывает и рост капли замедляется.

Нижняя граница большинства типов земных облаков находится приблизительно на уровне начала конденсации, т. е. на высотах 1—4 км. Верхняя граница земных облаков может достигать высоты 8—9 км.

Однако даже земные облака еще недостаточно изучены. Особенно это относится к серебристым обла-

кам, появляющимся иногда на высоте около 80 км. Их природа и состав до сих пор не ясны, что связано с трудностью их исследования и обусловленной этим скудостью наших знаний о таких облаках. Действительно, из серебристых облаков на Землю не выпадают осадки, по составу которых можно было бы определить состав облаков. В серебристые облака нельзя подняться на аэростате или самолете для проведения непосредственных наблюдений в самом облаке. Поэтому исследовать их можно лишь дистанционно на основе измерения различных оптических характеристик. Однако эти облака столь прозрачны, что с Земли их удается наблюдать лишь короткое время в сумерки.

Еще сложнее задача исследования облаков планеты Венеры. Наличие в атмосфере Венеры водяного пара наводит на мысль, что облака Венеры, как и на Земле, могут быть водноледяными. Однако подобная гипотеза встречается с рядом трудностей при объяснении имеющихся экспериментальных данных.

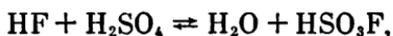
Как показали измерения поляризации солнечного излучения при отражении от облачного слоя Венеры, проведенные Б. Лио, Д. Коффингом, Т. Герлсом, показатель преломления материала частиц облаков $n = 1,44 \pm 0,02$, что значительно отличается от показателя преломления водяных капель и льда ($n = 1,31 - 1,33$). Поэтому для согласования с экспериментом необходимо искать другие вещества или их водные растворы. Из поляриметрических измерений следует также, что частицы имеют сферическую форму, а это свидетельствует в свою очередь в пользу того, что они являются жидкими каплями. Радиус капель около 1 мкм. Однако температура облачного слоя Венеры (230 — 250 К) существенно ниже точки замерзания воды. Следовательно, облака не могут быть чисто водяными, а должны содержать еще какой-то «антифриз». Наконец, в пространстве, окружающем водяные капли, должен находиться водяной пар. Его парциальное давление (давление насыщенного пара) определяется динамическим равновесием процессов парообразования и конденсации и зависит от температуры. Однако измеренная спектроскопически концентрация водяного пара над облачным слоем Венеры (около $10^{-4}\%$) в 100—1000 раз меньше давления насыщен-

ного пара. Для разрешения этого несоответствия необходимо предположить существование вещества, связывающего воду и «высушивающего» атмосферу. Таким образом, наличие чисто водяных облаков не согласуется с наблюдательными данными. Однако подобное несоответствие можно устранить, если предположить, что, кроме воды, в состав капель входит какая-то другая компонента, которая увеличивает показатель преломления, понижает точку замерзания и уменьшает давление водяного пара, т. е. «сушит» атмосферу.

Рассмотрев все указанные соображения, американский ученый А. Янг пришел к выводу, что такой компонентой может быть *серная кислота*.

Действительно, серная кислота очень «охотно» соединяется с водой и водяным паром, «высушивая» атмосферу. Над 75%-ным водным раствором серной кислоты давление водяного пара примерно в 100 раз меньше, чем над водой. Температура замерзания такого раствора примерно на 30 К ниже температуры замерзания воды. Показатель преломления $n = 1,44$ точно равен измеренному в поляриметрическом эксперименте. Более того, спектральные характеристики водного раствора серной кислоты также соответствуют измеренному оптическому спектру Венеры. И, наконец, молекулы серной кислоты служат очень «хорошими» ядрами конденсации водяного пара.

Наличие облачного слоя из серной кислоты может объяснить еще один экспериментальный факт. Наземные спектроскопические измерения, проведенные П. Коном, выявили в атмосфере Венеры небольшие количества паров соляной (HCl) и фтористоводородной (HF) кислот. Однако вопреки практически одинаковой космической распространенности хлора и фтора измеренное П. Коном содержание HF примерно в 100 раз меньше, чем HCl. Объяснение этого различия может быть в том, что HF вступает в реакцию с H_2SO_4



что уменьшает ее содержание в атмосфере.

Косвенные данные о составе облаков Венеры дает анализ функционирования масс-спектрометра большого спускаемого зонда аппарата «Пионер — Венера».

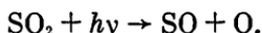
Во время спуска на высоте 51 км прибор перестал работать. По мнению американских ученых, это было вызвано закупоркой отверстий для забора газовых проб каплями жидкости в облачном слое. Через 10 мин спуска на высоте около 25 км капли испарились и прибор возобновил работу. При этом анализ газа показал, что отверстия были закупорены веществом, содержащим соединения серы или соединения серы в смеси с водой.

Естественно задать вопрос: откуда берется серная кислота в атмосфере Венеры? Наиболее вероятный ее источник — вулканические извержения, при которых выделяются серосодержащие газы. Сера — элемент, имеющий довольно большую космическую распространенность. Его относительное обилие лишь в 40 раз меньше, чем у кислорода. Отсюда А. Янг оценил максимально возможное отношение числа молекул $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{CO}_2 = 0,05$; в применении к Венере этого достаточно для образования слоя серной кислоты толщиной 50 м.

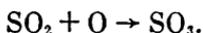
Измерения химического состава атмосферы, проведенные на АМС «Венера-12» и «Пионер — Венера», показали присутствие серосодержащих компонент SO_2 , COS , H_2S и свободной газообразной серы.

Процесс образования серной кислоты можно представить следующим образом.

Под действием света имеющиеся в атмосфере Венеры молекулы двуокиси серы расщепляются согласно фотохимической реакции фотоллиза:



Образующийся свободный кислород быстро окисляет SO_2 в серный ангидрид SO_3 :



Серный ангидрид в свою очередь активно поглощает воду с образованием серной кислоты:



Участие воды в образовании серной кислоты объясняет также непопятный ранее факт резкого уменьшения содержания водяного пара в надоблачном слое Венеры.

Читатель может сказать, что высказанные соображения о распространенности серы и о вулканах применимы и к Земле. А есть ли сернокислотные облака в атмосфере Земли? Читатель прав. В стратосфере Земли в интервале высот от 15 до 30 км аэрозоль действительно состоит главным образом из капелек 75%-ного водного раствора серной кислоты. Эти облака весьма разреженные (содержание H_2SO_4 около $2 \cdot 10^{-7}$ г · м⁻³). Характерно также, что плотность земных сернокислотных облаков резко возрастает после вулканических извержений, достигая максимального значения примерно через год после извержения, а время существования облаков повышенной плотности составляет около трех лет.

Значительно бóльшая плотность сернокислотных облаков Венеры по сравнению с земными свидетельствует, по-видимому, о более интенсивной вулканической деятельности на этой планете.

Вместе с тем на содержание серной кислоты в атмосфере Земли влияют еще два фактора, отсутствующие в атмосфере Венеры. Первым является поступление в атмосферу SO_2 в результате сжигания угля и нефтепродуктов для промышленных и бытовых нужд. Так, только в США в течение года общее количество SO_2 , выбрасываемого в атмосферу, измеряется миллионами тонн. Однако, к счастью, накопление серосодержащих соединений в земной атмосфере приостанавливается действием второго фактора — вымыванием SO_2 дождями и поглощением почвой.

Что же нам известно о высоте, структуре и плотности облаков Венеры?

Верхняя граница облачного слоя Венеры видна непосредственно земному наблюдателю. Поэтому ее высоту можно определить как разность измеренного астрономами радиуса видимого диска Венеры и радиуса планеты, определенного радиоастрономическими и радиолокационными методами. Эта высота (около 70 км) намного больше, чем для земных облаков.

Первое определение высотной структуры облаков было проведено М. Я. Маровым с сотрудниками по измерениям на АМС «Венера-9» и «Венера-10». Метод исследования был основан на активном зондировании атмосферы путем приема и регистрации на спускаемом аппарате рассеянного аэрозольными частицами

излучения искусственного источника света. На рис. 26 приведена найденная в этом эксперименте зависимость коэффициента рассеяния от высоты, которая характеризует число рассеивающих частиц и их массу. Из

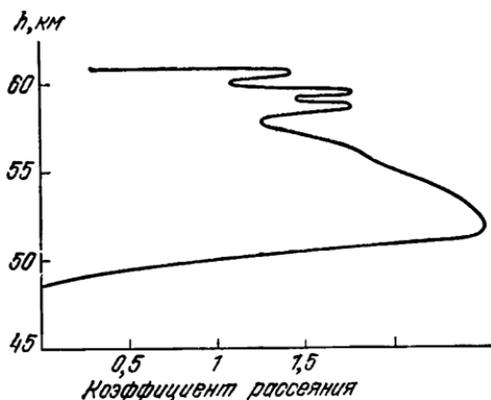


Рис. 26. Зависимость рассеяния в атмосфере от высоты.

полученных данных следует, что облачный слой в атмосфере Венеры имеет довольно четкую нижнюю границу на высоте около 49 км. Наличие ряда максимумов и минимумов указывает на его многослойную структуру. Общая толщина облачного слоя немного больше 10 км.

Измерения рассеяния проводились несколькими приемниками, расположенными под разными углами к источнику света. Полученная таким образом диаграмма рассеяния частиц аэрозоля позволила определить размеры этих частиц: — средний радиус частиц 1—4 мкм, т. е. в 100—1000 раз меньше размера капель в дождевых облаках*). Масса капли пропорциональна кубу ее радиуса, а поперечное сечение квадрату радиуса. Поэтому в соответствии с формулой на стр. 58 капли малого размера не могут быстро падать, и в атмосфере Венеры, по-видимому, не бывает дождей.

По величине рассеяния было определено, что плотность капель в облаках Венеры составляет около 100 см^{-3} , что соответствует содержанию аэрозоля око-

*) Размеры капель в земных дождевых облаках от 0,1 мм в морсящем дожде до 1—2 мм в ливне.

до $10^{-2} \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$. Это довольно прозрачные облака, похожие более на слабый туман или дымку. Расчетная дальность видимости в таких облаках составляет 1—3 км.

Определение степени прозрачности атмосферы Венеры было произведено по измерениям освещенности на разных высотах при снижении спускаемого аппарата. Первый такой эксперимент был проведен В. С. Авдуевским, М. Я. Маровым, Б. Е. Мошкиным и А. П. Экономовым на спускаемом аппарате АМС «Венера-8». Наиболее информативные данные были получены В. И. Морозом, Б. Е. Мошкиным, А. П. Экономовым, Н. Ф. Санько, Н. А. Парфентьевым и Ю. М. Головиным на АМС «Венера-11» и «Венера-12».

Для однородной атмосферы ослабление освещенности определяется массой «воздуха», и поэтому следовало ожидать, что ослабление солнечного излучения будет увеличиваться с увеличением плотности атмосферы, т. е. с приближением к поверхности. Измерения же показали, что на высотах больше 50 км, где заключено лишь около 1% массы атмосферы Венеры, ослабление солнечного света сравнимо с ослаблением в слое от 50 км до поверхности, в котором находится 99% массы атмосферы. Следовательно, выше 50 км ослабление солнечного света на единицу массы примерно в 100 раз больше, чем ниже этого уровня (тоже на единицу массы). Это указывает на наличие выше 50 км какого-то образования, значительно ослабляющего солнечный свет. Таким образованием является облачный слой.

Измерения показали также, что до поверхности Венеры доходит около 5% падающего на планету лучистого потока Солнца. Освещенность у поверхности составляет несколько тысяч люкс, что соответствует освещенности у поверхности Земли в облачный день.

Молнии на Венере

Наличие в атмосфере Венеры аэрозоль и большие скорости ветрового движения в облачном слое создают условия для электризации и разделения зарядов в облаке, а следовательно, и для возникновения электрических разрядов — молний. Для проверки такой

возможности, Л. В. Ксанфомалити провел специальный эксперимент по поиску молний на Венере. Известно, что молния является интенсивным источником радиоизлучения. Во время близкой грозы прием радиостанций происходит с помехами, причем они особенно интенсивны на длинных волнах. Первый радиоприемник изобретателя радио А. С. Попова назывался «грозоотметчиком», так как он регистрировал радиоизлучение грозовых разрядов. По такому же пути пошел и Л. В. Ксанфомалити, установив на спускаемых аппаратах АМС «Венера-11» и «Венера-12» чувствительные радиоприемники сверхдлинноволнового диапазона (частоты 8—90 кГц). При спуске были зарегистрированы радишумы, весьма сходные с земными, возникающими при грозовых электрических разрядах. На высотах ниже 2 км напряженность поля, создаваемого разрядами, резко падает. Кроме радиоприемника, на спускаемых аппаратах были установлены микрофоны для регистрации «грома» при близких грозовых разрядах, но аэродинамический шум при спуске превысил верхний предел чувствительности и прибор зашкалил.

Свидетельства наличия молний в атмосфере Венеры, полученные Л. В. Ксанфомалити, побудили В. А. Краснопольского проанализировать проведенные им ранее оптические измерения на АМС «Венера-9» и «Венера-10» для выявления интенсивных световых вспышек. В области, расположенной на широте 9° S при местном времени 19^h , он обнаружил резкие хаотические изменения светового излучения, состоящие из ряда пиков длительностью около 0,25 с, что соответствует длительности вспышки молнии на Земле. Световая энергия вспышек на Венере определена равной $3 \cdot 10^7$ Дж. При световом выходе молнии $3 \cdot 10^{-3}$ это соответствует полной энергии вспышки молнии на Венере 10^{10} Дж, т. е. такой же, как и для земных молний. Место и время обнаружения вспышки на Венере также согласуется с молниями на Земле, наблюдающимися чаще всего в тропиках и во второй половине суток с максимумом на 17^h местного времени. Однако в связи со значительно большей длительностью венерианских суток, чем земных, последнее сравнение вряд ли приемлемо.

Почему Венера — горячая планета

Существование у Венеры массивной атмосферы, состоящей в основном из углекислого газа, позволяет объяснить высокую температуру ее поверхности, значительно превышающую ожидаемую равновесную температуру, определяемую из условий теплового баланса между получаемым планетой излучением Солнца и собственным тепловым излучением планеты. Выводя уравнение теплового баланса (см. выше) и следующую из него равновесную температуру, мы считали атмосферу планеты прозрачной и поэтому не влияющей на тепловой баланс. Однако на самом деле даже атмосфера Земли, а тем более плотная атмосфера Венеры, поглощают значительную часть проходящего излучения и, что очень важно, это поглощение, т. е. степень непрозрачности, различны в разных участках спектра электромагнитного излучения. Молекулы каждого газа, входящего в состав атмосферы, поглощают излучение на строго определенных частотах, являющихся характеристикой данного газа. Поэтому атмосфера каждой планеты пропускает без существенного ослабления излучение лишь в частотных интервалах, отличных от частот поглощения входящих в нее молекул. Эти относительно свободные от поглощения частотные интервалы называются *окнами прозрачности*.

В атмосфере Земли есть окно прозрачности в интервале длин волн примерно от 0,4 до 0,7 мкм. В этом интервале электромагнитное излучение воспринимается глазом в виде света. Вне окон прозрачности излучение значительно ослабляется, причем величина ослабления зависит от числа поглощающих молекул.

Как уже указывалось, интенсивность излучения Солнца и собственного теплового излучения планеты также зависит от длины волны. Характерной особенностью этой зависимости является наличие максимума на некоторой волне λ_{\max} и быстрое уменьшение интенсивности как с укорочением, так и с удлинением волны (см. рис. 6). Поэтому энергия излучения сосредоточена в основном в относительно небольшом спектральном интервале около λ_{\max} . Величина λ_{\max} определяется законом Вина.

Отсюда следует, что для Солнца — температура его фотосферы составляет около 6000 К — длина волны,

на которой интенсивность излучения максимальна, равна

$$\lambda_{\max} = \frac{2897}{6000} = 0,48 \text{ мкм,}$$

т. е. основная энергия излучения *) приходится на окно прозрачности атмосферы и достигает поверхности планеты в виде света.

Температура поверхности Венеры в 10—20 раз ниже температуры фотосферы Солнца, и поэтому длина волны, соответствующая максимуму ее собственного излучения $\lambda_{\max} = 5\text{—}10$ мкм, и основная энергия излучения приходится на инфракрасный участок спектра, т. е. на область вне окна прозрачности атмосферы. Таким образом, атмосфера пропускает с незначительным ослаблением излучение Солнца к планете, но значительно уменьшает собственное ее излучение. В результате тепловой баланс изменяется в сторону более высоких температур. На Земле этот эффект, названный «парниковым»**), увеличивает температуру поверхности примерно на 50 К. К. Саган предположил, что парниковый эффект должен быть и на Венере.

Непрозрачность атмосферы Земли в инфракрасной части спектра обусловлена в основном поглощением молекулами водяного пара и углекислого газа. Водяной пар имеется и в атмосфере Венеры, а содержание углекислого газа в ней намного больше, чем в атмосфере Земли. Поэтому парниковый эффект на Венере

*) На спектральный интервал 0,4—0,7 мкм приходится около 50% энергии солнечного излучения.

**) Название «парниковый» этот эффект получил от всем известного огородного парника, так как считалось, что повышение температуры в парнике обусловлено именно прозрачностью стекла для солнечных лучей и непрозрачностью для собственного излучения грунта в инфракрасной части спектра. Однако Р. Вуд опроверг такое представление о работе парника. Он поставил опыт с двумя выставленными на Солнце коробками. Одну из которых он покрыл стеклом, а вторую — пластинкой из камешной соли, прозрачной как для видимого света, так и для инфракрасного излучения. Вопреки ожиданиям температура в обеих коробках оказалась одинаковой. Это показало, что повышение температуры в парниках обусловлено просто прекращением циркуляции воздуха между грунтом и атмосферой, а эффект селективной непрозрачности стекла здесь очень мал. Однако название «парниковый» эффект сохранилось за селективным механизмом нагрева.

должен быть гораздо сильнее, чем на Земле, и при имеющихся количествах CO_2 и H_2O в атмосфере Венеры может объяснить высокую температуру ее поверхности.

Интересно отметить, что если определяющим фактором в парниковом эффекте является содержание углекислого газа в атмосфере планеты, то этот эффект будет усиливаться и температура будет расти до полного выделения всего CO_2 из поверхностных пород в атмосферу. Действительно, возрастание температуры из-за парникового эффекта сдвинет влево реакцию wollastonитового равновесия и увеличит выделение углекислого газа в атмосферу. Повышение содержания CO_2 усилит парниковый эффект, что приведет к следующему повышению температуры. Далее весь цикл вновь повторится и будет продолжаться до полного перехода CO_2 из поверхностных пород в атмосферу. По-видимому, планета Венера прошла такой цикл.

Ионосфера

После изобретения в 1895 г. радио нашим генеральным соотечественником А. С. Поповым и применения его для беспроволочной связи начались работы по увеличению дальности радиосвязи. Для этого повышались мощности излучателей и совершенствовалась приемно-регистрирующая аппаратура. Однако в однородном пространстве радиоволны, так же как свет и другие электромагнитные волны, распространяются прямолинейно, лишь слегка огибающая препятствия вследствие дифракции. Поэтому в начальный период развития радиотехники считалось, что из-за кривизны земной поверхности радиоволны не могут служить для передачи сигналов на большие расстояния. Однако, в 1901 г. Г. Маркони установил радиосвязь между Европой и Америкой на расстоянии 3700 км. Для объяснения этого неожиданного факта А. Кеннелли и О. Хэвисайд высказали гипотезу, что распространение радиоволн на такие большие расстояния происходит за счет отражения от электроводного слоя, находящегося в верхней атмосфере Земли и отражающего радиоволны. Так была открыта ионосфера — ионизованная область земной атмосферы. За время, прошедшее

с этого открытия, ионосфера была детально исследована с помощью наземного радиозондирования и особенно с ракет и искусственных спутников Земли.

Было показано, что основным источником ионизации земной атмосферы является ультрафиолетовое и рентгеновское излучение

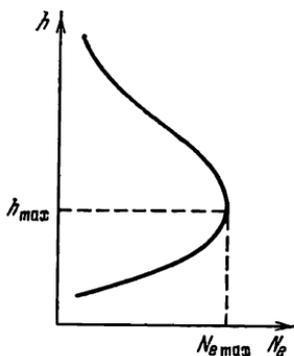


Рис. 27. Схематическое представление распределения по высоте электронной концентрации в ионосфере Земли.

Солнца, энергия квантов которого $h\nu$ больше потенциала ионизации U_i молекул и атомов, входящих в состав атмосферы. Поэтому наличие у Земли ионосферы не исключительное, а закономерное явление. Так как ионизация определяется энергией квантов, то ультрафиолетовое и рентгеновское излучение Солнца вызовет ионизацию атмосферы любой планеты Солнечной системы независимо от ее расстояния от Солнца. Расстояние планеты от Солнца определит лишь число квантов, способных вызвать ионизацию и, следовательно, электронную концентрацию в ионосфере. Распределение электронной концентрации в ионосфере Земли по высоте имеет вид, показанный схематически на рис. 27 с максимумом $N_{e_{max}}$ на некоторой высоте h_{max} . Такое распределение тоже не случайно, а обусловлено общими законами физики планетных атмосфер. Выше мы показали, что плотность атмосферы уменьшается с высотой. Поэтому на больших высотах, куда солнечное ультрафиолетовое и рентгеновское излучение проникает без существенного ослабления, ионизация оказывается практически полной, а уменьшение N_e с увеличением высоты происходит просто из-за уменьшения числа частиц в атмосфере. На меньшие высоты, т. е. в более глубокие слои атмосферы, солнечное ультрафиолетовое и рентгеновское излучение проникает уже существенно ослабленным и поэтому начинает уменьшать степень ионизации, что также ведет к снижению электронной концентрации.

Аналогичные процессы должны происходить и в атмосфере Венеры. Исследование ионосферы Венеры

также проводилось методом радиопросвечивания излучением источника, установленного на космическом аппарате. Электронная концентрация в поносфере N_e связана с показателем преломления n соотношением

$$n = 1 - \frac{2\pi e^2 N_e}{m\omega^2},$$

где ω — частота принимаемого радиоплучения, m и e — масса и заряд электрона соответственно.

Измеряя показатель преломления n для разных положений космического аппарата на «затменной» траектории и, следовательно, для разных высот просвечиваемой области над поверхностью планеты, можно определить высотный профиль электронной концентрации. Результаты таких измерений приведены на рис. 28, на котором показаны типичные профили

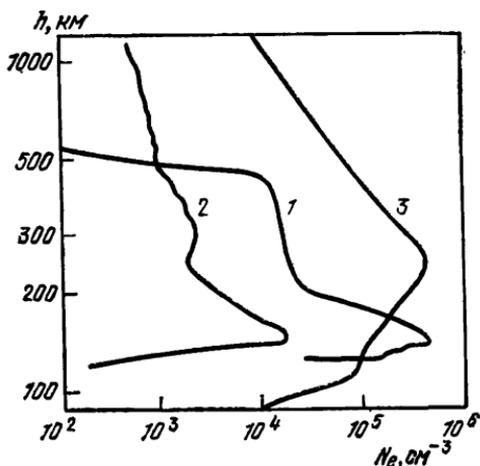


Рис. 28. Высотные профили электронной концентрации в ионосфере Венеры.

1 — дневная ионосфера Венеры, 2 — ее ночная ионосфера, 3 — ионосфера Земли.

дневной и ночной ионосферы Венеры. Для сравнения на том же рисунке приведен аналогичный профиль для Земли. Видно, что строение ионосфер обеих планет имеет ряд сходных деталей, в частности, формы профилей электронной концентрации указывают на многослойную структуру ионосферы: в профиле днев-

ной поносферы Венеры ниже главного максимума, подобного земному слою F , выявляется второй максимум, подобный земному слою E . Многослойная структура показывает, что источников ионизации атмосферы несколько.

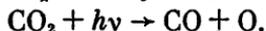
Так же как и ионосфера Земли, ионосфера Венеры изменяется от дня к ночи. Однако на Венере эти вариации значительно больше, причем изменяется и величина электронной концентрации, и ее высотный профиль. Дневная ионосфера Венеры гораздо менее протяжена, чем ее ночная ионосфера и чем ионосфера Земли. Верхняя граница дневной ионосферы Венеры довольно резка. Эти особенности обусловлены солнечным ветром, который из-за отсутствия магнитного поля Венеры взаимодействует непосредственно с ионосферой, «прижимая» последнюю к планете.

Максимумы электронной концентрации в ионосфере Венеры расположены примерно на 100 км ниже, чем в ионосфере Земли. Это свидетельствует о том, что ионизирующее излучение меньше ослабляется в верхней атмосфере Венеры и проникают поэтому на большую глубину. Обращают внимание большие суточные вариации величины электронной концентрации в максимуме $N_{e_{max}}$. От дня к ночи $N_{e_{max}}$ уменьшается примерно в пять раз. Однако удивительны не столь большие изменения, а то, что на ночной стороне Венеры ионосфера вообще существует. Действительно, продолжительность ночи на планете составляет 59 земных суток. Поэтому, если источником ионизации являлось бы только излучение Солнца, то за столь длинную ночь ионосфера полностью бы исчезла. Для поддержания ионизации следует предположить наличие какого-то другого ионизирующего агента. Кэлиор, И. Патель, А. Нейгц, Т. Кравенс и Т. Гомбоси показали, что высотный профиль ночной ионосферы согласуется с представлением об ионизации атмосферы потоком электронов с энергией около 100 эВ с плотностью $10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Вопрос о происхождении этого потока остается открытым.

Кроме вышеописанного процесса ионизации, интенсивное солнечное излучение вызывает в верхней атмосфере планеты ряд других фотохимических процессов, которые в конечном итоге определяют химический состав и физическое состояние атмосферы в этой

области. Об одном из таких процессов — фотолизе (расщеплении) под действием света двуокиси серы с последующим образованием серной кислоты мы уже говорили на стр. 78.

Ультрафиолетовое солнечное излучение должно приводить также к фотолизу CO_2 :

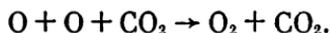


Согласно расчетам Т. Донау, за время существования солнечной системы (4.5 миллиарда лет) в результате этой реакции весь углекислый газ атмосферы Венеры должен был бы диссоциироваться и создать атмосферу, обогащенную CO и O_2 . На самом деле этого не наблюдается. Более того, содержание этих газов в атмосфере Венеры примерно в 10 тыс. раз меньше, чем CO_2 .

Следовательно, в атмосфере Венеры существует какой-то механизм окисления CO в CO_2 . Обычная обратная реакция рекомбинации CO и O по схеме



малоэффективна из-за малой скорости этой реакции. Атомы кислорода примерно в 40 раз быстрее ассоциируются по схеме



Предложен ряд других механизмов рекомбинации CO_2 , но они также встречаются с трудностями. Этот интересный вопрос еще ждет своего решения.

В определенных условиях фотохимическая реакция может идти в обратную сторону с излучением кванта электромагнитной энергии. Такие условия могут возникнуть, например, при экзотермической химической реакции, когда избыточная энергия реакции идет на возбуждение одного или нескольких продуктов реакции, причем атому или молекуле каждого газа присуща своя строго определенная частота излучения. Это дает возможность по спектральному составу излучения определить химический состав газа.

В земной атмосфере такое излучение известно как свечение неба. В атмосфере Венеры такое свечение наблюдалось Н. А. Козыревым. Вероятным источником его является кислород.

Наконец, солнечное излучение испытывает резонансное взаимодействие с атомами и молекулами

верхней атмосферы, при котором рассеянное излучение также является частотно-избирательным. Измерения рассеянного излучения, проведенные В. Г. Куртом с сотрудниками на советских АМС серии «Венера» и группами Ч. Барта и А. Стьюарта и другими на американских космических аппаратах «Маринер» и «Пионер — Венера», показали, что самая внешняя часть атмосферы Венеры состоит из водорода и гелия. Венера окружена разреженной водородной короной, концентрация атомов в которой составляет около 100 см^{-3} на расстоянии около 10 000 км и уменьшается до концентрации межпланетной среды (около 1 см^{-3}) на расстоянии около 25 000 км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прочтав эту книгу, читатель убедился в том, что планета Венера существенно отличается от Земли по ряду важнейших характеристик. Поверхность планеты представляется безводной раскаленной пустыней. Атмосфера Венеры состоит в основном из углекислого газа, а давление у поверхности примерно в 100 раз больше, чем на Земле. Облака Венеры состоят из серной кислоты. Жизнь на Венере, по-видимому, невозможна. Вместе с тем следует подчеркнуть, что различие условий на Венере и на Земле является, вероятно, не генетическим, а вызвано разными эволюционными путями развития, обусловленными различием расстояний планет от Солнца. Действительно, размеры, масса, средняя плотность и, по-видимому, состав и топографические особенности обеих планет весьма сходны. Существенно отличаются лишь их атмосферы. Однако, как это ни парадоксально, образование атмосферы Венеры можно понять и объяснить легче, чем образование атмосферы Земли. Действительно, по современным представлениям атмосферы планет земной группы (Земли, Венеры, Марса и Меркурия) образовались за счет выхода вулканических газов после формирования самих планет. В состав вулканических газов входят H_2O , CO_2 , HCl , HF , SO_2 , S , H_2S , Ne , Ar , CO . Все указанные газы обнаружены в составе атмосферы Венеры. Относительное содержание этих газов в вулканических выбросах составляет 80% — H_2O , 15% — CO_2 и 5% всех остальных газов, так что, за исключением водяного пара, состав атмосферы Венеры примерно соответствует вулканическому газам и количеству. С этой точки зрения менее понятно образо-

вапне атмосферы Земли, основными компонентами которой являются азот и кислород.

Много нерешенных проблем осталось и в физике Венеры, ее образовании и развитии. Решением этих проблем занимаются астрономы и физики, радисты и механики, химики и геологи, метеорологи и математики. Автор будет рад, если его труд вызовет у Вас, дорогой читатель, желание включиться в их решение.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Глава I. Венера как планета Солнечной системы	5
Глава II. Поверхность Венеры	18
Температура	18
Вращение	32
Физико-химические свойства и состав поверхности	39
Топография	41
Как выглядит поверхность Венеры	48
Глава III. Атмосфера	53
Давление, температура, плотность, ветер	53
Химический состав	68
Облака	74
Молнии на Венере	81
Почему Венера — горячая планета	83
Ионосфера	85
Заключение	91

Аркадий Дмитриевич Кузьмин

ПЛАНЕТА ВЕНЕРА

Редактор *Н. А. Райская*

Техн. редактор *Н. В. Вершинина*

Корректор *М. Л. Медведская*

ИБ № 11314

Сдано в набор 25.03.81. Подписано к печати 06.08.81. Т-23492. Формат 84×108^{1/32}. Бумага тип. № 3. Обыкновенная гарнитура. Высокая печать. Услови. печ. л. 5,04. Уч.-изд. л. 4,51. Тираж 100 000 экз. Заказ № 525. Цена 15 коп.

Издательство «Наука»

Главная редакция физико-математической литературы

117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

4-я типография издательства «Наука»

630077, Новосибирск, 77, Станиславского, 25

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект. 15

Вышла из печати:

Маров М. Я. Планеты Солнечной системы

Исследования планет Солнечной системы в последнее время развиваются бурными темпами как с помощью наземных средств наблюдения, так и, особенно, с помощью космических аппаратов. Получены многочисленные результаты, очень серьезно изменившие наши прежние представления о девяти больших планетах и их спутниках. Автор, много работавший в этой области, поставил себе целью систематически изложить современные представления о планетах, о господствующих на них физических условиях.

Для широкого круга читателей, обладающих подготовкой в объеме средней школы и интересующихся проблемами современной астрофизики и космических исследований. Книга интересна преподавателям средней школы, лекторам, студентам естественно-научных факультетов.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Выйдет в свет в 1982 году:

Силкин Б. И. В мире множества луи (Спутники планет)/Под ред. Е. Л. Рускол

Книга популярно рассказывает о мире естественных спутников планет (кроме Луны). За последние годы наши знания об этих телах Солнечной системы значительно обогатились главным образом в результате исследований, проводимых с помощью космических аппаратов. Открыты неизвестные ранее спутники и кольца Юпитера, Сатурна и Урана. На спутниках обнаружены действующие вулканы. Мир спутников оказался чрезвычайно разнообразным по своим свойствам. Обо всем этом живо пишет автор, раскрывая вышешнее состояние наших знаний в этой области.

Для широкого круга читателей, интересующихся астрономией.

15 коп.

