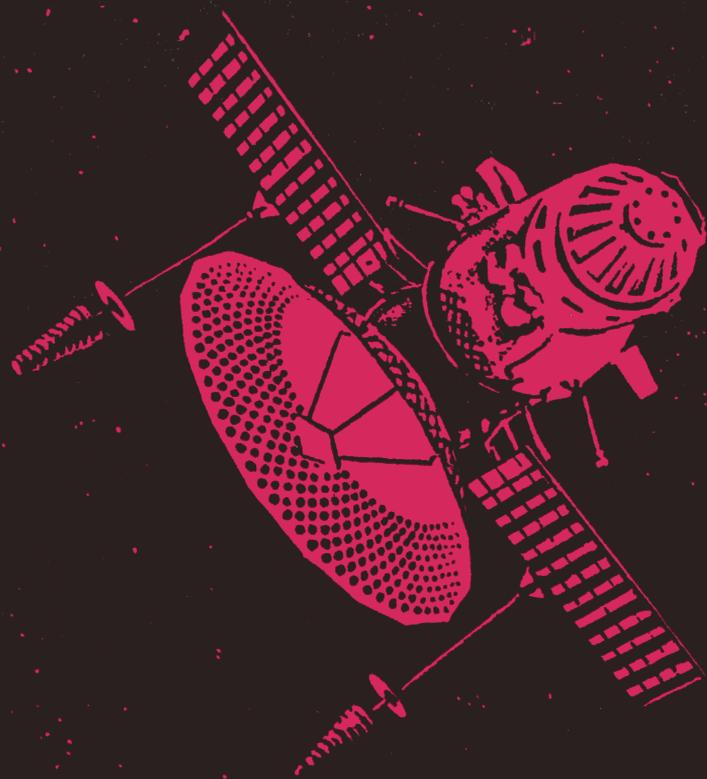


СЕРИЯ • КОСМОНАВТИКА • АСТРОНОМИЯ • 1971



В.А.БРОНШТЭН

ПЛАНЕТА ВЕНЕРА



В. А. Бронштэн,

кандидат
физико-
математических
наук

планета венера

издательство «знание» москва 1971

Бронштэн В. А.
Б 88 Планета Венера.

М., Знание», 1971, 48 стр. (Новос в жизни, науке, технике. Серия «Космонавтика, астрономия»).

Одна из самых ближайших к Земле планет Солнечной системы — планета Венера до сих пор таит в себе много загадок. Мощный слой облаков не дает возможности наблюдателю рассмотреть поверхность Венеры, определить ее физические и химические параметры.

Обширная программа исследований космического пространства и небесных тел, проводимая за последнее время с помощью автоматических межпланетных станций в сочетании с широким кругом астрономических и радиоастрономических исследований, значительно расширила круг наших знаний о Венере.

В публикуемой брошюре автор подробно останавливается на различных этапах исследования Венеры, приводит данные последних измерений, полученных с помощью АМС, а также с помощью радиоастрономических и радиолокационных исследований.

2-6-1

526

За последнее время астрономы стали уделять все большее внимание ближайшей к Земле планете Солнечной системы — Венере. Ее исследованиям посвящено огромное количество работ как наблюдательных, так и теоретических. За последние 10 лет к этой планете было запущено девять космических станций, из них семь — советских (это вдвое больше, чем было запущено к Марсу за тот же период).

Результаты такого «наступления на Венеру» не заставили себя ждать. За эти годы мы узнали о Венере больше, чем за 350 предшествовавших лет изучения ее с помощью телескопов и других астрономических приборов.

А ведь изучать Венеру нелегко. Плотная атмосфера и мощный облачный покров полностью скрывают от нас ее поверхность, не оставляя даже малейших просветов, сквозь которые мог бы проникнуть наш взор. Применение к исследованиям Венеры новых методов: радиоастрономии и радиолокации создало и новые проблемы (например, вопрос о причинах высокой температуры планеты), разрешение которых потребовало большого труда теоретиков. Некоторые из загадок Венеры, несмотря на все успехи ученых, не разрешены до сих пор. Что же явилось причиной такого внимания к Венере — планете, исследование которой в течение многих лет даже не считалось серьезным делом в астрономических кругах и отдавалось «на откуп» любителям астрономии?

Близость Венеры к Земле создала предпосылки для исследования ее космическими аппаратами. Запуск космических станций к Венере был наиболее легко осуществимым после запусков к Луне, требовал меньших энергий, скоростей и сроков перелета по сравнению с полетами к другим планетам. Для правиль-

ного планирования полетов к Венере, для выбора и расчета приборов станций надо было узнать о Венере как можно больше наземными методами.

Но и это была не главная причина роста интереса к природе Венеры. Ведь она по своим размерам, расстоянию от Солнца и другим признакам больше всего походит на Землю. Изучение других планет — сестер Земли — может иметь громадное значение для познания самой Земли: ее внутреннего строения, происхождения ее магнитного поля, атмосферы, наконец, законов происхождения и развития Земли в целом. Вот почему исследование природы Венеры получило столь мощный стимул за последние годы.

Мы постараемся рассказать в этой брошюре, что же узнали астрономы за три с половиной столетия исследований Венеры, что мы сейчас знаем о ее природе.

Венера—вторая планета Солнечной системы по ее расстоянию от Солнца. Ближе ее к Солнцу расположен только Меркурий, следующей за орбитой Венеры идет орбита Земли.

Венера обращается вокруг Солнца на расстоянии 108 млн. км и совершает полный оборот вокруг него за 225 суток. Орбита Венеры — почти точный круг; она обладает наименьшим в Солнечной системе эксцентриситетом, и потому расстояние этой планеты от Солнца почти не меняется: оно может быть лишь на 700 тыс. км меньше или больше среднего.

С другой стороны, наша Земля движется вокруг Солнца по орбите со средним расстоянием от него 149,6 млн. км и может то приближаться до 147 млн. км, то удаляться до 152 млн. км. Период обращения Земли вокруг Солнца, как известно, равен 365,24 суток.

Сравнение этих чисел сразу показывает, что кратчайшее расстояние от Земли до Венеры может составлять 38 млн. км. Для этого нужно, чтобы Солнце, Венера и Земля расположились на одной линии (такое расположение Венеры относительно Солнца и Земли называется нижним соединением), и притом Земля была бы в самой близкой к Солнцу точке своей орбиты (в перигелии), а Венера — в самой далекой (в афелии).

Сочетание этих трех условий наступает крайне редко. Нетрудно рассчитать, через сколько времени наступают нижние соединения. Для этого нужно, чтобы Венера, имеющая большую линейную и угловую скорость движения по орбите, чем Земля, обогнала бы нашу планету ровно на один оборот. За сутки Венера проходит $\frac{1}{225}$ часть своей орбиты, Земля — $\frac{1}{365}$. Таким образом, за сутки Венера обгоняет Землю на $\frac{1}{225} - \frac{1}{365} = \frac{1}{584}$ часть окружности.

Ясно, что время, необходимое Венере,

чтобы обогнуть Землю на один оборот, равно 584 суткам. Это и есть период между двумя нижними соединениями, или так называемый синодический период Венеры. Он равен 1,599 земного года и, таким образом, нижние соединения наступают в различных точках орбит обеих планет. Соотношение между синодическим периодом Венеры и годом почти точно равно $16 : 10$, или $8 : 5$. Это значит, что если одно из нижних соединений случится в январе, когда Земля бывает в перигелии, то следующее январское нижнее соединение наступит через 5 синодических периодов Венеры, или через 8 лет. За такой же период Венера сделает ровно 13 оборотов вокруг Солнца и все условия ее видимости повторятся. Таким образом, существует 8-летний цикл условий видимости Венеры.

Как же видна Венера на нашем небе? Уже давно эта планета привлекала внимание людей своим ярким блеском, превосходившим блеск любой звезды или планеты, а также характерным расположением на небе: либо она видна по вечерам на западе в лучах вечерней зари, либо по утрам на востоке в лучах утренней зари. Никогда Венера не бывает видна ночью в южной стороне неба, но нередко она скрывается от нас на довольно продолжительные промежутки времени.

Нетрудно разобраться в причинах такого странного «поведения» Венеры. Рассмотрим орбиты Венеры и Земли (рис. 1). Орбита Венеры целиком лежит внутри земной орбиты, и мы, находясь в точке Z , никогда не увидим Венеру на угловом расстоянии от Солнца, превосходящем угол $СЗВ_2$ (или равный ему угол $СЗВ_3$). Этот угол равен 48° , а положения B_2 и B_3 , в которых Венера отходит от Солнца на такой угол, называются наибольшими элонгациями планеты. При этом положение B_2 называется восточной элонгацией. (в это вре-

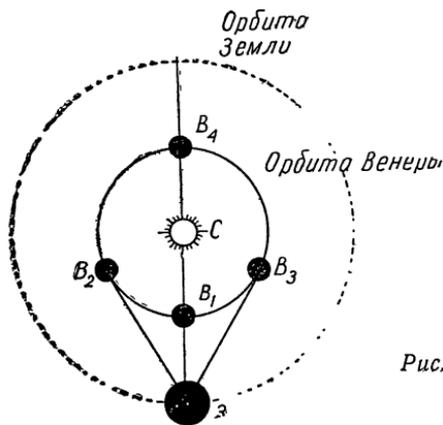


Рис. 1. Конфигурация Венеры относительно Земли

мя планета видна по вечерам), а B_3 — западной элонгацией (когда Венера видна по утрам).

На рис. 1 показаны и два других характерных положения Венеры относительно Солнца и Земли: B_1 — уже знакомое нам нижнее соединение и B_4 — верхнее соединение, когда планета находится за Солнцем, на наибольшем расстоянии от Земли (оно может достигать 260 млн. км).

Легко понять, что во время соединений Венера находится в том же направлении, что и Солнце, и скрывается в его лучах. Наблюдения планеты в это время затруднительны, так как она находится на небе днем и увидеть ее можно только в телескоп. Самое благоприятное время видимости Венеры — наибольшие элонгации, но и они не все одинаково удобны для наблюдений. Чтобы Венера во время элонгации была видна высоко и подолгу, необходимо, чтобы восточная элонгация наступила зимой или весной, а западная — зимой или осенью. При таких условиях суточный путь Венеры на небосводе лежит выше солнечного, и планета видна хорошо. Самое неблагоприятное время года для наблюдений Венеры в элонгации — лето. В это время суточный путь самого Солнца проходит так высоко, что Венера не может оказаться заметно выше Солнца. Лишь в августе условия ее видимости улучшаются.

Наиболее благоприятным годом для наблюдений Венеры будет 1972 г., когда ее можно будет подолгу видеть в обеих элонгациях: весной — в восточной (по вечерам), а в конце лета и осенью — в западной (по утрам). Кроме того, удобная для наблюдений Венеры восточная элонгация будет в начале 1977 г., а западная — осенью 1975 г.

От восточной элонгации до нижнего соединения проходит обычно 72 дня и столько же — от соединения до западной элонгации. Через 220 суток наступает верхнее соединение, а еще через 220 суток — новая восточная элонгация, после чего цикл повторяется. Спустя месяц после восточной элонгации и за месяц до западной Венеры достигает наибольшего блеска. В это время планета видна невооруженным глазом даже днем, но чтобы ее отыскать, надо точно знать ее положение на небе.

Различные положения, последовательно занимаемые Венерой относительно Солнца, приводят к смене ее фаз. Фазы Венеры были открыты еще в 1610 г. Галилео Галилеем — первым астрономом, наблюдавшим планету в телескоп. Свое открытие он зашифровал в виде анаграммы (фразы с переставленными буквами). Позже, убедившись в достоверности своих наблюдений, Галилей дал расшифровку анаграммы, которая в переводе на русский язык звучит так: «Мать любви подражает фигурам Цинтии».

Известно, что Венера — богиня любви и красоты у древних римлян, Цинтия — одно из имен Луны. Таким образом, смысл фразы Галилея был таков: «Венера имеет такие же фазы, как и Луна».

Но смена фаз Луны объясняется тем, что Луна — темный шар, освещаемый Солнцем и отражающий его лучи. Открытие Галилея показывало, что и Венера — шар, отражающий лучи Солнца. Более того, Галилей заметил, что когда Венера выглядит узким серпом, ее видимый диаметр больше, чем когда она кажется почти полным диском (рис. 2). Это означало, что вблизи нижнего соединения Венера гораздо ближе к нам, чем близ верхнего соединения. Значит, она движется не вокруг Земли, а вокруг Солнца. Тем самым открытие Галилея

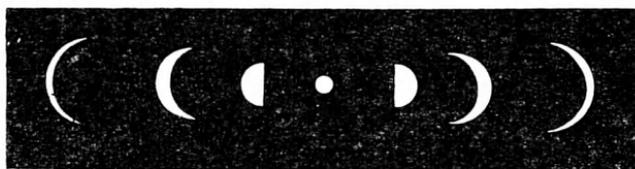


Рис..2. Венера при разных фазах

подтверждало учение Коперника о центральном положении Солнца в нашей планетной системе и о родственной природе планет и Земли. Вместе с другими открытиями, сделанными Галилеем с помощью телескопа, оно сыграло важную роль в утверждении коперниканского, гелиоцентрического мировоззрения и навлекло на Галилея гнев «святейшей» инквизиции.

Уже в XVII веке начались тщательные наблюдения Венеры и измерения ее видимого диаметра. Техника измерений постепенно совершенствовалась, и к концу XIX века было выведено наиболее вероятное значение видимого диаметра планеты на расстоянии в одну астрономическую единицу: $16'',82$. Этой величине соответствует линейный диаметр $12\,200$ км, что лишь ненамного меньше диаметра Земли ($12\,750$ км).

Видимый диаметр Венеры может меняться от $67''$ в самом близком положении (в нижнем соединении) до $10''$ в верхнем соединении.

Приведенный выше диаметр Венеры, определенный из оптических наблюдений, не характеризует, однако, размеры самой планеты. Уже давно было замечено, что на диске Венеры не видно никаких деталей, по которым можно было бы составить ее карту. Впоследствии стало ясно, что мы наблюдаем не поверхность планеты, а окружающий ее слой облаков. Таким образом,

12 200 км — диаметр облачного слоя, а не твердого шара планеты.

Определить истинный диаметр Венеры удалось лишь в самые последние годы (1965—1968 гг.) методом радиолокации. Подробно об этом методе будет рассказано ниже, а пока мы приведем наиболее надежное значение радиуса Венеры, полученное таким методом: 6053 км. Таким образом, диаметр Венеры равен 12 106 км. Этому значению соответствует площадь поверхности планеты, равная 90,4% земной и объем, равный 85,9% земного.

Масса Венеры была уточнена в 1962 г. при пролете мимо планеты американской космической станции «Маринер-2». Она составляет 81,5% массы Земли. Отсюда нетрудно подсчитать, что средняя плотность Венеры равна $5,23 \text{ г/см}^3$ (у Земли $5,55 \text{ г/см}^3$), ускорение силы тяжести на поверхности — 887 см/сек^2 (90% земного), вторая космическая скорость, достаточная для преодоления тяготения планеты — $10,36 \text{ км/сек}$ (у Земли $11,18 \text{ км/сек}$).

Мы видим, что по своим геометрическим и динамическим характеристикам Венера мало отличается от Земли. Находясь примерно в 1,4 раза ближе к Солнцу, она получает от него вдвое больше света и тепла, чем Земля. Это означает, что на Венере должно быть значительно теплее, чем на Земле. Казалось бы, этим и должно ограничиться отличие Венеры от нашей планеты.

Но мир Венеры оказался совсем иным, непохожим на мир Земли.

**ИССЛЕДОВАНИЯ
ВЕНЕРЫ
КЛАССИЧЕСКИМИ
МЕТОДАМИ
АСТРОНОМИИ**

Первые наблюдатели Венеры (Ж.-Д. Кассини, Ф. Бианчини и др.) напрасно пытались уловить на диске планеты какие-то постоянные детали, построить по ним карту планеты и определить период ее вращения. Несмотря на то что каждый из них приводил какое-то значение периода, ни один из этих «периодов» не подтвердился. А таких попыток было ни много ни мало 85 на протяжении 300 лет. Уже развилась астрофизика, на помощь визуальным наблюдениям пришли фотография и спектральный анализ, а упрямая планета по-прежнему хранила секрет своего вращения.

Спустя 150 лет после первых телескопических наблюдений Галилея произошло событие, отчасти раскрывшее причину этих неудач. Речь идет об открытии атмосферы Венеры.

Обычно во время нижних соединений Венера проходит несколько выше или ниже Солнца, поскольку ее орбита наклонена к плоскости земной орбиты на 3° .

Лишь изредка, два раза в столетие, происходят так называемые прохождения Венеры по диску Солнца. Одно из таких прохождений ожидалось 6 июня 1761 г. Астрономы в различных странах готовились к наблюдениям этого явления, рассчитывая использовать его для уточнения расстояния от Земли до Солнца — астрономической единицы.

Дело в том, что уже тогда успехи небесной механики позволяли довольно точно определять отношения расстояний различных планет от Солнца и друг от друга, но длина астрономической единицы — основного масштаба Солнечной системы — практически была неизвестна. Достаточно было пронаблюдать прохождение Венеры по диску Солнца из двух удаленных точек земного шара, расстояние между которыми было бы известно, и по разности наблюденных моментов вхождения и схождения Венеры с диска Солнца можно было рассчитать сначала ее параллакс, а затем и параллакс Солнца¹. Длина же астрономической единицы равна, как нетрудно убедиться, радиусу Земли, поделенному на тангенс параллакса Солнца.

В числе ученых, готовившихся к наблюдению, был и знаменитый русский ученый Михаил Васильевич Ломоносов. Он снарядил две экспедиции в Сибирь — в Иркутск и Селенгинск — и организовал наблюдения в Петербурге. Сам Ломоносов тоже приготовился наблюдать это явление, но с другими целями: для изучения могущих быть при этом физических явлений. Его надежды полностью оправдались.

В момент вступления черного диска Венеры на восточный край солнечного диска последний показался Ломоносову размытым и неясным. Ученый решил подождать схождения Венеры, которое должно было произойти через 6 часов. И вот этот момент настал. Диск Венеры достиг края солнечного диска. Казалось, вот-вот он сольется с темным фоном неба. Но произошло нечто иное. Край Солнца начал выгибаться, образовав вокруг Венеры ослепительной яркой ободок. Уже треть диска Венеры сошла с диска Солнца, а ободок все еще был виден. Но вдруг он разорвался посередине, исчез и лишь тогда диск Венеры слился с фоном неба.

Это явление (получившее название «явления Ломоносова») наблюдал не только он, но и многие другие наблюдатели. Однако именно Ломоносов дал ему правильное объяснение, опубликовав свою работу «Явление Венеры на Солнце, наблюденное в С.-Петербургской импе-

¹ Параллаксом называется угол, под которым из центра светила виден экваториальный радиус Земли (для тел Солнечной системы).

раторской Академии наук мая 26 дня 1761 года» в июле того же 1761 г. на русском и немецком языках.

Причиной «явления Ломоносова» было преломление солнечного света в атмосфере, окружающей Венеру. Именно поэтому солнечный край показался Ломоносову и другим наблюдателям, смещенным в сторону, противоположную центру диска планеты (рис. 3).

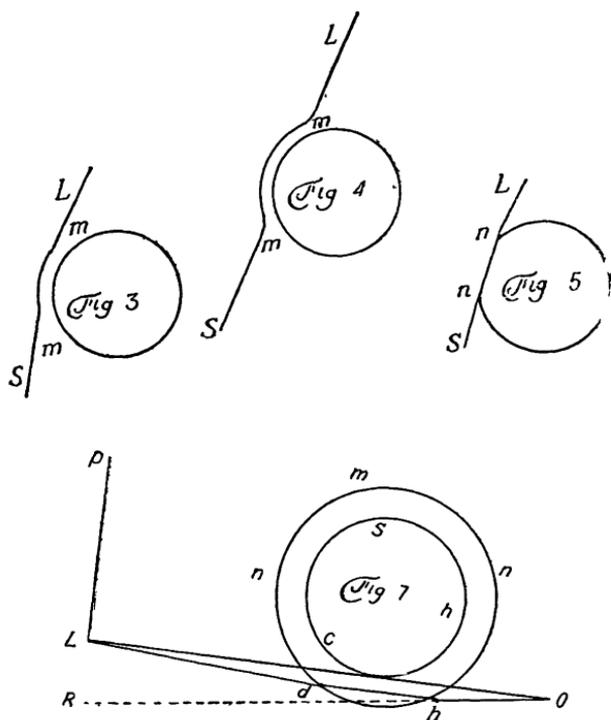


Рис. 8. «Явление Ломоносова». Вверху — подлинные рисунки М. В. Ломоносова, внизу — составленная им схема хода солнечных лучей сквозь атмосферу Венеры

К сожалению, работа Ломоносова прошла незамеченной, и спустя 30 лет, уже в 90-х годах XVIII века, немецкий астроном И. Шретер и английский астроном В. Гершель вторично «открыли» атмосферу Венеры. Основой для их заключений о наличии у планеты атмосферы явилось удлинение рожек серпа Венеры при малых фазах, которое можно приписать рефракции и рассеянию света в ее атмосфере. Это явление подверглось впоследствии тщательным исследованиям, в том числе и в последнее время. Работы немецкого астронома В. Рабе, чехословацкого ученого Ф. Линка и советского астронома В. В. Шаронова показали, что в удлинении рогов серпа Венеры основную роль играет рассеяние света в

надоблачном слое атмосферы Венеры. По мнению американского ученого Дж. Эдсона, это рассеяние происходит в тонком слое облаков типа перистых, лежащих на несколько километров выше основного облачного покрова.

Подробное исследование «явления Ломоносова» выполнил в 1952 г. В. В. Шаронов. Он изучил все наблюдения этого явления при прохождении Венеры по диску Солнца в 1761, 1769, 1874 и 1882 гг. и показал, что рефракция в надоблачном слое атмосферы Венеры не превышает $22''$. Напомним, что рефракция в земной атмосфере достигает у поверхности $34'$, или почти $2000''$, т. е. в 100 раз превосходит венерианскую. Поскольку угол рефракции пропорционален оптической массе газа, проходящей лучом, а размеры обеих планет почти равны, можно отсюда сделать вывод, что давление на верхнем уровне облаков Венеры составляет примерно $0,01$ ат, или около 10 миллибар. Как мы увидим дальше, эта оценка не противоречит другим данным.

В результате работ советских ученых, в первую очередь В. В. Шаронова, приоритет М. В. Ломоносова в открытии атмосферы Венеры теперь признан во всем мире. Но из чего состоит эта атмосфера? Из каких частиц состоит облачный слой?

Астрономы еще в 60-х годах прошлого столетия пытались применить к изучению атмосферы Венеры спектральный анализ. Им казалось, что в спектре Венеры усилены полосы кислорода и водяного пара. В свете современных данных становится ясно, что желание найти сходство строения атмосфер Венеры и Земли оказалось сильнее научной объективности.

В XX веке поиски возобновились. А. А. Белопольский в Пулкове, В. М. Слайфер во Флагстаффе (США) пытались найти признаки полос кислорода и водяного пара на своих многочисленных спектрограммах, но безрезультатно. В 1921 г. в поиски включились американские астрономы К. Сент-Джон и С. Никольсон, использовавшие для этого крупнейшие в то время в мире телескопы обсерватории Маунт Вильсон. Но и их усилия были напрасны.

Лишь в 1932 г. астрономам той же обсерватории У. Адамсу и Т. Дэнхему, применившим новый сорт пластинок, чувствительных к ближним инфракрасным лучам (до 9000 \AA), удалось обнаружить в спектре Венеры три сильных полосы поглощения на длинах волн 7820 , 7883 и 8689 \AA (рис. 4). Все они оказались принадлежащими углекислому газу (CO_2). Их мощность указывала на то, что количество этого газа в атмосфере Венеры во много раз превосходит его содержание в атмосфере Земли.

Сделаем небольшой расчет. В земной атмосфере содержится 0,03% углекислого газа. Если бы воздух можно было сжать сверху так, чтобы он всюду имел постоянную плотность и давление, равные их значениям на уровне моря, то высота такой однородной атмосферы составила бы 8 км. Далее, если бы можно было отделить все газы воздуха друг от друга, то столб азота в однородной атмосфере имел бы высоту 6,25 км, столб кислорода — 1,7 км, столб аргона — 80 м и т. д. В науке высота таких условных столбиков называется вертикальной толщиной данного газа и обозначается в единицах *км-ат*, *м-ат* или *см-ат* (километр-атмосфера, метр-атмосфера, сантиметр-атмосфера). Нетрудно подсчитать, что вертикальная толщина углекислого газа в земной атмосфере составляет $8000 \cdot 0,0003 = 2,4 \text{ м-ат}$.

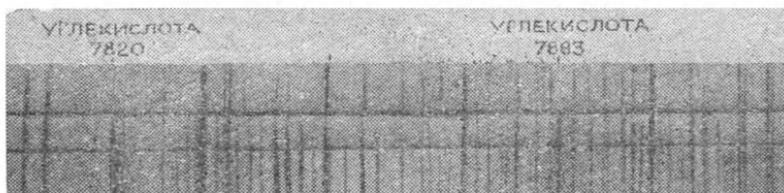


Рис. 4. Внизу — спектр Венеры с полосами поглощения углекислого газа, сверху — спектр Солнца (полосы отсутствуют)

В атмосфере Венеры, как показывало сравнение полос CO_2 в ее спектре с лабораторными интенсивностями тех же полос, вертикальная толщина углекислого газа была по крайней мере в 1300 раз больше и достигала, по оценке Адамса и Дэнхема, 3,2 км-ат. Но ведь спектральным исследованиям была доступна не вся атмосфера Венеры, а только та ее часть, которая расположена выше слоя облаков. Значит, общее содержание CO_2 в атмосфере Венеры должно быть еще больше!

Попытки обнаружить в атмосфере Венеры другие газы долгое время не давали успеха. Оценки верхних пределов содержания таких газов, как кислород, окись углерода (CO), закись азота (N_2O), не превышали 1 м-ат. Азот и аргон не имели линий или полос поглощения в видимой и ближней инфракрасной области спектра.

Ученые начали исследовать свойства облачного покрова Венеры. Прежде всего удалось определить его температуру. Для этого применили термоэлемент, помещаемый в фокусе телескопа-рефлектора (рефрактор не годится, так как его линзы поглощают инфракрасные лучи). Термоэлемент, как известно, представляет собой спай двух тонких проволок из разных металлов (например, из меди и висмута), включенный в цепь, способную

проводить ток. Когда лучистый поток падает на спай, между ним и вторым спаем (не подвергающимся действию потока) возникает разность потенциалов и по цепи пойдет ток, который можно измерить.

Излучение любой планеты состоит из двух частей: отраженного излучения Солнца и собственного, испускаемого самой планетой. К счастью, благодаря резкому различию температур Солнца и планет, отраженное излучение сосредоточено в основном в видимой части спектра, а собственное — в инфракрасной. Их разделяют, применяя различные фильтры, и по величине потока излучения планеты определяют ее температуру.

Измерения температуры облачного покрова Венеры, начатые в 1923 г. Э. Петтитом и С. Никольсоном на обсерватории Маунт-Вильсон, были затем многократно повторены многими астрономами. Наиболее уверенные результаты получили в 1955 г. У. Синтон и Дж. Стронг. Температура облачного слоя Венеры оказалась равной примерно $233\text{—}240^\circ\text{К}$ (около -40°С). Близ полюсов планеты, однако, температура снижалась до $205\text{—}213^\circ\text{К}$. Дальнейшие исследования подтвердили эти результаты.

В том, что температура облачного слоя Венеры оказалась низкой, не было ничего удивительного. Ведь и у нас в стратосфере царят столь же низкие температуры. Но термоэлектрический метод ничего не мог рассказать нам о температуре поверхности планеты: инфракрасные лучи, испускаемые поверхностью, не проникали сквозь нижнюю атмосферу и облачный слой.

Из каких же частиц состоят облака Венеры? Для ответа на этот вопрос ученые применяли разнообразные методы фотометрии (измерения интенсивности света, отражаемого облачным слоем) и поляриметрии (измерения его поляризации). Многочисленные фотометрические наблюдения Венеры были проведены в Советском Союзе Н. П. Барабашовым, В. В. Шароновым, В. И. Езерским и другими учеными. Единственный надежный результат, вытекавший из сравнения этих наблюдений с теорией рассеяния света плотными атмосферами планет, развитой В. В. Соболевым, состоял в том, что частицы облачного слоя Венеры имеют, по-видимому, размеры порядка микрона. Поляриметрический метод привел к размерам частиц порядка одного микрона. В то время как французский ученый Б. Лио нашел сходство поляризации облаков Венеры с облаками из капелек воды, американский астроном Дж. Койпер не подтвердил этого заключения. Многочисленные фотометрические и поляриметрические исследования облачного слоя Венеры выявляли интересные факты и подробности (например, «зеркальный эффект» в облаках Венеры, обнаруженный Н. П. Барабашовым и В. И. Езерским, или зоны ано-

мальной поляризации, найденные французским астрономом О. Дольфюсом). Но дать ясного представления о природе облачного слоя Венеры эти методы не могли. К концу 50-х годов стало ясно, что классические методы исследования Венеры исчерпали свои возможности.

Какова же была картина природы Венеры к концу «классического» периода изучения планеты?

Планета Венера окружена плотной атмосферой и мощным облачным слоем. Облака Венеры, скорее всего, напоминают земные, т. е. состоят из капелек воды. Венера ближе к Солнцу и должна получать вдвое больше солнечного тепла. Поэтому температура на ее поверхности должна примерно на 60—70 градусов превосходить земную. Теплая влажная атмосфера, содержащая громадные количества углекислого газа, необходимого для развития растений, — почти такие же условия были на Земле в каменноугольный период, около 250 млн. лет назад. Тогда на Земле росли гигантские хвощи, древовидные папоротники, плауны. Позже они вычерпали углекислый газ из атмосферы, насытили ее кислородом, сделав возможным выход животных на сушу. Сами же они погибли, создав для нас запасы каменного угля.

Так, может быть, Венера — как бы прошлое нашей Земли? Может быть, на этой планете существует пышная растительность, а в будущем создадутся условия для жизни, не уступающей нашей? Увы, исследования последних лет не оставили камня на камне от этой радужной, но абсолютно неверной картины.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ РАДИОАСТРОНОМИИ И РАДИОЛОКАЦИИ

В середине 50-х годов новый метод познания Вселенной — радиоастрономия — уже имел на своем счету немалые достижения. Анализируя радиоизлучение внешних оболочек Солнца — короны и хромосферы, — астрономы узнали много нового об их природе. Были открыты, изучены и объяснены отдельные (так называемые дискретные) источники космических радиоволн: радиотуманности и радиогалактики, исследован общий фон космического радиоизлучения. Но к изучению планет этот метод был применен сравнительно поздно, — начиная с 1955 г.

В мае 1956 г. К. Майер, Р. Слонейкер и Т. Мак-Каллаф из Морской исследовательской лаборатории США впервые зарегистрировали с помощью 15-метрового параболического радиотелескопа излучение Венеры на волне 3 см. По мере приближения планеты к Земле интенсивность сигнала увеличивалась, так что в его проис-

хождении никаких сомнений не возникало. А ведь незадолго до этого Дж. Краус из университета штата Огайо объявил о приеме сигналов от Венеры на волне 11 м, носивших характер коротких всплесков, которые он истолковал как результат грозových разрядов в атмосфере Венеры. На самом деле это были помехи земного происхождения, в чем вскоре убедился сам Краус.

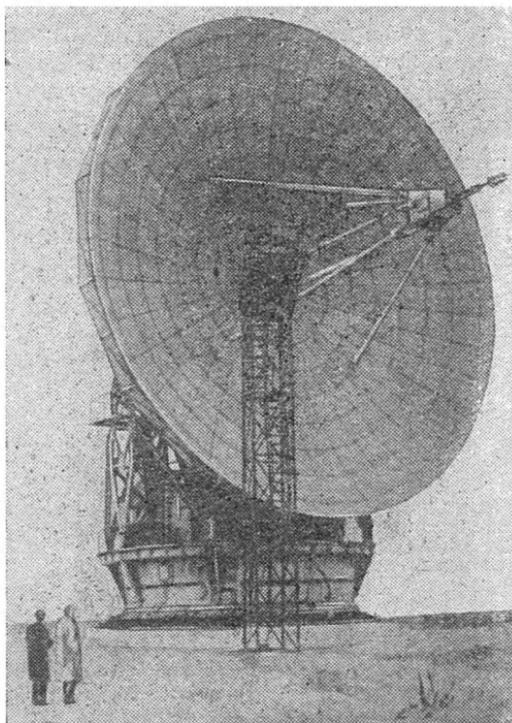


Рис. 5. 22-метровый радиотелескоп Серпуховской станции Физического института им. П. Н. Лебедева

Поясним вкратце, как работает радиотелескоп и почему планеты могут испускать радиоволны. Радиотелескоп (рис. 5) — остро направленная антенна, представляющая собой облучатель, помещенный в фокусе гигантского параболического зеркала. Зеркало отражает все приходящие на его поверхность волны на облучатель, если такие волны идут параллельно оси параболоида зеркала. Сигнал, принятый облучателем, усиливается затем радиоэлектронной аппаратурой и записывается регистрирующим устройством. Как правило, аппаратура настраивается на определенную длину волны, на которой и производятся наблюдения.

Земная атмосфера пропускает радиоволны длиной от 1—2 мм до 15—20 м — это и определяет диапазон радиоволн, используемых в астрономии.

Причины испускания радиоволн небесными телами могут быть различны. Радиоволны возникают (генерируются) при плазменных колебаниях заряженных частиц в верхних слоях атмосфер некоторых планет и в солнечной короне, при торможении быстрых электронов в межзвездных магнитных полях, при мощных электрических разрядах. Но все это — нетепловые источники радиоизлучения. Между тем любое тело, в зависимости от своей температуры, испускает радиоволны наряду с другими видами электромагнитных колебаний. Непосредственной причиной этого теплового излучения является хаотическое тепловое движение молекул и атомов данного тела. Если тело достаточно горячо, оно испускает наряду с радиоволнами (имеющими сравнительно низкую частоту колебаний) и излучения более высокой частоты: инфракрасные лучи и видимый свет. В последнем случае мы имеем дело с раскаленными, самосветящимися телами (Солнце, звезды). Планеты же испускают только инфракрасные лучи и тепловые радиоволны.

Плотность потока радиоизлучения планеты (величина, соответствующая освещенности для видимого света) прямо пропорциональна ее температуре и обратно пропорциональна квадрату длины волны. Поэтому на длинных волнах радиоизлучение планет измерять труднее, и дальше дециметровых волн (20—70 см) обычно не идут. Очень короткие (миллиметровые) волны испытывают заметное поглощение в земной атмосфере, отсюда наиболее удобным для измерений является сантиметровый диапазон.

По измеренному потоку радиоизлучения планеты можно рассчитать ее яркостную температуру. Так называется температура, которую имела бы воображаемая абсолютно черная планета тех же размеров, посылающая с того же расстояния тот же поток радиоизлучения. Так как планеты не являются, вообще говоря, абсолютно черными телами для радиоволн (т. е. не только поглощают, но и отражают их, хотя и очень слабо), то яркостная температура планеты будет несколько ниже ее действительной температуры.

Радиоволны сантиметрового диапазона свободно проходят сквозь земную атмосферу и облака, для них не должны были явиться преградой и непроницаемые для других излучений облака Венеры, равно как и ее плотная атмосфера. Радиоволны явились первыми вестниками, рассказавшими нам о природе поверхности Венеры и нижних слоев ее атмосферы.

Когда Майер и его коллеги измерили яркостную температуру Венеры, они были поражены — температура составляла около 600°K (свыше $+300^{\circ}\text{C}$). Она не на

60—70°С, а на целых 300°С превосходила температуру Земли.

Различные ученые проверили этот результат на разных волнах от 3 до 10 см, но температура по-прежнему была высокой: от 535° до 675° К.

В 1959 г. в исследование теплового радиоизлучения Венеры включились советские радиоастрономы А. Д. Кузьмин и А. Е. Саломонович. Они провели серию измерений на волне 8 мм, т. е. значительно более короткой, чем исследовавшиеся до тех пор. Используя 22-метровый радиотелескоп Серпуховской станции Физического института АН СССР им. Лебедева, самый большой из пригодных для работы в миллиметровом диапазоне, они обнаружили, что яркостная температура Венеры на волне 8 мм гораздо ниже, чем на 3 и 10 см, и составляет в среднем 405° К. Эти измерения были повторены в 1961 и 1962 гг. и дали 382° и 394° К соответственно. Почти столько же получили в 1964—1965 гг. ученые Калифорнийского университета У. Уэлч и Д. Торнтон. Значит, дело не в ошибках измерений, а в реальном различии яркостных температур Венеры на миллиметровых и сантиметровых волнах.

Но истинная температура поверхности Венеры должна быть какая-то одна, она не может зависеть от метода измерений или от длины волны. Для объяснения отмеченного различия яркостных температур были выдвинуты почти одновременно (в 1960—1961 гг.) три гипотезы. Две из них исходили из концепции (модели) горячей поверхности и холодной атмосферы, третья, наоборот, из модели горячей атмосферы и относительно холодной поверхности.

Идея модели «горячая поверхность — холодная атмосфера» была высказана в 1960 г. А. Д. Кузьминым и А. Е. Саломоновичем. Эта модель была положена в основу следующих двух гипотез.

1. На сантиметровых волнах мы регистрируем температуру, близкую к температуре поверхности Венеры, которая нагревается излучением Солнца. Правда, более 60% солнечных лучей отражается облаками Венеры, но остальные 40%, испытав многократное рассеяние в нижних слоях атмосферы планеты, все же достигают ее поверхности. Нагретая поверхность тоже излучает тепло, но уже в виде инфракрасных лучей. Однако на пути уходящего излучения планеты расположены два газа, сильно поглощающих инфракрасные лучи: углекислый газ (которого в атмосфере Венеры так много) и водяной пар. Они «перехватывают» поток инфракрасных лучей, энергия которых уходит на нагрев атмосферы и возбуждение молекул CO_2 и H_2O . За пределы облачного слоя выходит излучение, соответствующее гораздо более низ-

кой температуре — около 235°K . Миллиметровые радиоволны тоже частично поглощаются водяным паром и облаками, поэтому они дают неправильное (заниженное) значение температуры поверхности. Вся атмосфера Венеры в целом действует, подобно гигантскому парнику. Поэтому эта гипотеза, предложенная американским ученым К. Саганом, получила название парниковой гипотезы (рис. 6, а).

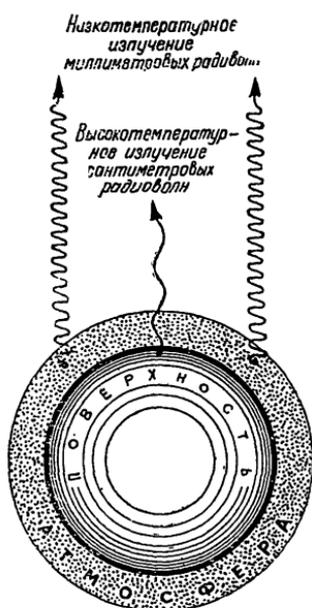


Рис. 6а. Прохождение излучений сквозь атмосферу Венеры (парниковая гипотеза)

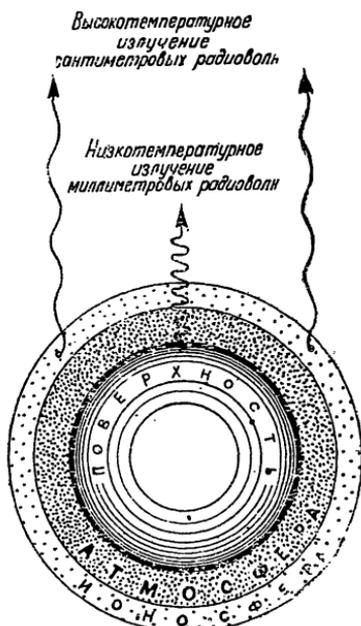


Рис. 6б. Излучение поверхности Венеры и ее горячей атмосферы (ионосферная гипотеза)

2. Сантиметровые волны дают правильное представление о температуре поверхности, но причина ее столь сильного нагрева не парниковый эффект, создаваемый атмосферой, а мощные ветры, переносящие тучи пыли, трение которой о почву и служит источником тепла. Эту гипотезу, получившую название эолосферной, предложил ирландский астроном Э. Эпик.

А вот как выглядела третья гипотеза, исходившая из модели горячей атмосферы:

3. Повышенное радиоизлучение на сантиметровых волнах относится не к поверхности, а к горячей ионосфере Венеры. Подобно земной атмосфере, в атмосфере Венеры может быть слой с повышенной концентрацией заряженных частиц (ионов и электронов) — ионосфера. Ионосфера сама может служить источником сантимет-

ровых радиоволн. Поэтому поверхность Венеры имеет температуру, близкую к той, которую дают измерения на миллиметровых радиоволнах, а сантиметровые волны дают завышенную температуру, искаженную влиянием ионосферы. Эта гипотеза, предложенная Д. Джонсом, получила название ионосферной (рис. 6, б).

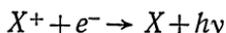
Как же можно было разобраться в трех гипотезах и решить, какая из них правильна? Здесь мы должны вспомнить, как вообще анализируются и проверяются научные (в частности, астрономические) гипотезы. Есть, вообще говоря, два пути проверки гипотез: сравнение с результатами наблюдений и с тем, что дает теория вопроса. К сожалению, многие читатели (и даже авторы популярных книг и брошюр) часто не делают различия между понятиями «гипотеза» и «теория», хотя это совершенно разные понятия. Гипотеза — научное предположение, теория — строгое (обычно, математическое) описание того или иного явления на основе хорошо известных законов природы.

Теория излучения радиоволн твердыми поверхностями планет была разработана советским ученым профессором В. С. Троицким еще в 1954 г. Теория излучения их ионосферой и прохождения радиоволн сквозь ионосферу также давно разработана. Из теории следует, что концентрация заряженных частиц в ионосфере Венеры должна быть, с позиций ионосферной гипотезы, 10^9 см^{-3} , т. е. в 1000 раз больше, чем в слое F ионосферы Земли.

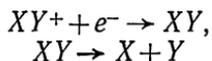
Что могло создать такую мощную ионосферу у Венеры? Солнечное излучение там только в два раза сильнее, чем на Земле. Поток летящих от Солнца заряженных частиц (корпускул) тоже сильнее только вдвое. Но ведь Венера, как показали измерения американской космической станции «Маринер-2», почти лишена магнитного поля. У нее нет поясов радиации, состоящих из «захваченных» магнитным полем солнечных корпускул. Значит, эти корпускулы беспрепятственно достигают верхних слоев атмосферы Венеры и могут вызвать там гораздо более интенсивную ионизацию. И все-таки различие в 1000 раз, даже при самых оптимальных предположениях, не получалось.

Советские ученые А. Д. Данилов и С. П. Яценко предложили другой путь к объяснению необычных свойств предполагаемой ионосферы Венеры. Ионизацию (отрыв электронов от атомов) уравнивает противоположный процесс: рекомбинация (захват электронов ионами с образованием нейтральных атомов). Если рекомбинация будет идти медленнее, чем в земной атмосфере, то даже при не очень высокой скорости ионизации может образоваться высокая концентрация заряженных частиц.

Ученым известны два вида рекомбинации: радиативная, когда электрон соединяется с атомарным ионом, отдавая избыток энергии в виде излучения (радиации):



(X — атом, X^+ — положительный ион, e^- — электрон, $h\nu$ — символ кванта излучения), и диссоциативная рекомбинация, когда электрон соединяется с молекулярным ионом, который затем разделяется на два атома (диссоциирует):



(Y — другой атом в молекуле, XY^\pm — молекулярный ион, XY — молекула).

Различие между этими двумя видами рекомбинации состоит не только в характере, но и в скорости процесса: радиативная рекомбинация протекает по крайней мере в сотни тысяч раз медленнее, чем диссоциативная. И если в земной атмосфере, как показали ракетные данные, на уровне ионосферы количество молекулярных ионов довольно велико (а значит основную роль играет диссоциативная рекомбинация), то в атмосфере Венеры это может быть и не так: если ионы будут преобладать атомарные, рекомбинация их с электронами будет протекать медленно, а значит, концентрация ионов и электронов может быть гораздо выше, чем в атмосфере Земли.

Так обстояло дело с теоретическим аспектом ионосферной гипотезы. Но предстояло еще объяснить некоторые наблюдательные факты. Так, при радиолокации планеты отражалось около 10% излучения на волнах от 10 до 70 см. Между тем плотная атмосфера должна была бы почти полностью поглощать дециметровые радиоволны, особенно на волне 70 см и более, и пропускать более короткие 10-см волны. Коэффициент отражения волн должен был бы отличаться в 1000 раз, а из наблюдений следовало, что он одинаков для всех волн в этом диапазоне.

Анализ радиоизлучения Венеры показал, что яркостная температура спадает не только в сторону миллиметровых, но и в сторону дециметровых волн (рис. 7). Правда, этот «дециметровый завал» не так резко выражен, как спад температур на миллиметровых волнах: от 600—700° К на волнах 3—20 см яркостная температура на волнах 30—70 см падает до 500° К, т. е. примерно на 150°, а не на 300°, как в сторону миллиметровых волн. И все же надо было объяснить такое явление.

Попытка такого объяснения с позиций ионосферной гипотезы была сделана советскими геофизиками

А. Д. Даниловым и С. П. Яценко, предложившими модель «дырчатой» или «скважной» ионосферы, состоявшей как бы из отдельных облаков с высокой концентрацией ионов и электронов, разделенных областями, где их концентрация могла быть не выше земной. Такая модель объясняла результаты радиолокации (дециметровые волны проходят сквозь «окна» ионосферы) и даже «дециметровый завал» температуры.

И все же ионосферная гипотеза не выдержала проверки наблюдениями. В 1964 г. советский радиоастроном

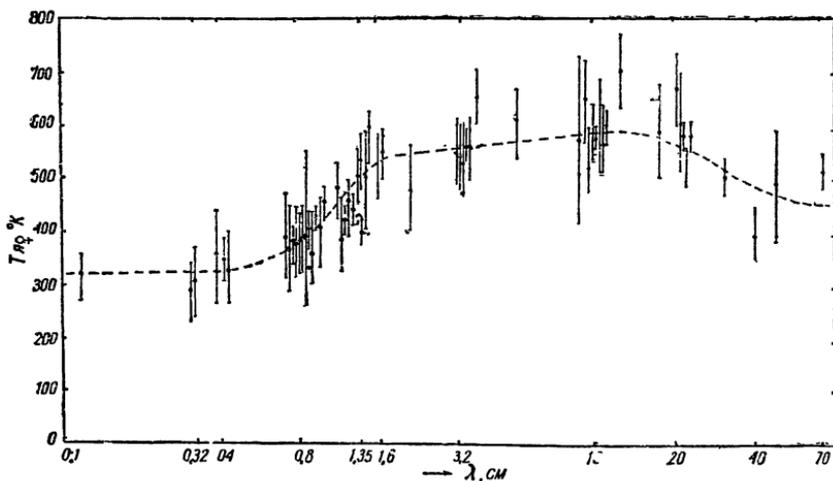


Рис. 7. Спектр радиоионизации Венеры (вертикальные черточки указывают пределы ошибок измерений)

А. Д. Кузьмин совместно с американским ученым Б. Дж. Кларком произвел серию наблюдений радиоионизации Венеры с помощью уникального прибора — радиоинтерферометра обсерватории Оуэнс Валлей. Этот прибор состоит из двух гигантских 26-метровых параболических антенн, расстояние между которыми (база интерферометра) и ориентация ее относительно объекта наблюдения могут изменяться. Изучая интерференционную картину, возникающую при сложении сигналов от обеих антенн в различных их взаимных положениях, а также ее изменения в течение нескольких часов наблюдений, можно было путем довольно сложных вычислений найти распределение «радиояркости» по диску Венеры.

Кузьмин и Кларк получили веское доказательство того, что источником радиоволн является поверхность планеты, а не ионосфера. Им удалось измерить поляризацию радиоионизации Венеры, и притом отдельно в плоскостях, параллельной и перпендикулярной базе ин-

терферометра. Радиоизлучение твердой поверхности должно быть частично поляризовано на краях диска, и если мы обнаружим, что радиояркость около краев диска, ориентированных в направлении поляризации, будет больше, чем у краев, расположенных ей перпендикулярно, то это будет наверняка означать, что источником излучения является поверхность шара планеты, а не диффузно излучающая масса газа или облаков. В последнем случае никакой разности радиояркости при двух ориентировках плоскости принимаемой поляризации не было бы.

Таким образом, Кузьмин и Кларк доказали несправедливость ионосферной гипотезы. Поверхность Венеры оказалась действительно горячей. Этот результат спустя два года был подтвержден советской межпланетной станцией «Венера-4».

Оставалось сделать выбор между парниковой и эолосферной гипотезами. Надо сказать, что эолосферная гипотеза почти ни у кого не встретила поддержки из-за своей искусственности. Но и сторонники парниковой гипотезы встретились с рядом трудностей. Прежде всего, какой газ (или газы) создает парниковый эффект? Углекислый газ, которого на Венере очень много, поглощает излучение в довольно узкой полосе, примерно от 13 до 17 *мкм* (есть и другие полосы поглощения, но они гораздо слабее). Необходимо некоторое количество водяного пара, который, напротив, поглощает почти все инфракрасное излучение, оставляя «окна» в диапазоне от 1 до 3 *мкм* и от 8 до 13 *мкм*.

Расчеты американского ученого А. Баррета в 1960 г. показали, что для согласования с наблюдаемым спектром радиоизлучения необходимо содержание водяного пара в 1—3%, если принять давление у поверхности планеты в 20—10 атмосфер. Но в то время нельзя было допустить ни столь высокого содержания паров воды, ни таких высоких давлений. А главное — водяной пар давал бы полосу поглощения на волне 1,35 *см*, которую тогда еще никто не наблюдал.

В 1962 г. к Венере была послана американская космическая станция «Маринер-2». Она была оснащена двумя радиометрами, работавшими на волнах 1,35 и 1,9 *см* (вторая волна была выбрана для сравнения). Станция прошла в 34 000 *км* от Венеры, но измерить ее радиотемпературу удалось лишь на волне 1,9 *см*.

В 1963 г. Дж. Гибсон и Г. Корбетт произвели первое измерение яркостной температуры на волне 1,35 *см* и получили 520° К — несколько не ниже, чем на соседних волнах. Но в 1965 г. они же получили на этой волне температуру 435° К, а А. Баррет и Д. Стэлин — даже 404° К. Это было то, что ожидалось. Однако У. Уэлч и

Д. Торнтон на той же волне получили 540°K . В 1967 г. Ю. Н. Ветухновская и А. Д. Кузьмин получили на близкой волне $1,31\text{ см}$ температуру 470°K . Трудно было решить, каким определениям отдать предпочтение.

Американский ученый К. Саган сделал предположение о том, что основную роль в создании парникового эффекта играют облака Венеры, состоящие из капелек жидкой воды. В последние годы молодому радиоастроному Г. М. Стрелкову удалось показать, что глубина полосы поглощения на волне $1,35\text{ см}$ сильно зависит от водонасыщенности облаков. При малых значениях водонасыщенности она может стать почти неразличимой (при современной точности измерений) и поэтому отсутствие признаков этой полосы еще ничего не говорит о наличии или отсутствии водяного пара в атмосфере Венеры.

Во всех этих работах не учитывалось одно очень важное обстоятельство, выявленное лишь в 1968 г., — что давление у поверхности Венеры гораздо больше принимавшихся значений $10\text{—}20\text{ ат}$ и составляет скорее всего $70\text{—}100\text{ ат}$. При таком давлении и зарегистрированных советскими автоматическими межпланетными станциями «Венера-4», «Венера-5» и «Венера-6» количествах водяного пара и углекислого газа парниковый эффект смог получить количественное объяснение.

Но нужно было еще объяснить «дециметровый завал» радиотемпературы Венеры, о котором говорилось выше. И здесь также было выдвинуто несколько объяснений. Можно было считать, что радиоволны большей длины приходят к нам с большей глубины, как это имеет место в случае Луны. Само по себе такое обстоятельство не вызывает сомнения и является следствием условий прохождения радиоволн сквозь твердую среду. Но тогда пришлось бы предположить, что температура наружного слоя Венеры падает с глубиной, а это неизбежно породило бы поток тепла в глубь тела планеты. Казалось бы, в таком предположении нет ничего особенно-го: парниковый эффект нагревает поверхность планеты, и горячая поверхность передает тепло вглубь. Но мы хорошо знаем, что температура Земли (и Луны) растет с глубиной из-за наличия в недрах планеты источников внутреннего тепла, а также за счет гравитационного сжатия вещества недр. Значит, на некоторой глубине у Венеры должен быть слой с минимумом температуры, который получал бы тепло и из недр планеты и с ее горячей поверхности. Нетрудно понять, что такой слой быстро прогрелся бы до температуры поверхности.

Другое возможное объяснение «дециметрового завала» состояло в том, что вещество поверхности так меняет свою излучательную способность с длиной волны, что на волне 20 см достигается максимум. Таким свойством

обладают некоторые вязкие полярные жидкости (например, глицерин), но предположение о наличии таких жидкостей или даже расплавов металлов или силикатов на глубине нескольких метров под поверхностью Венеры совершенно нереально.

Третье объяснение заключалось в поглощении радиоволн дециметрового диапазона «холодной» ионосферой Венеры. Расчеты, выполненные еще в 1964 г. А. Д. Кузьминым для моделей «полупрозрачной» и «дырчатой» ионосферы, показали, что такое предположение вполне вероятно, не противоречит другим наблюдениям и требует довольно низкой электронной концентрации в нижней ионосфере Венеры: 10^4 — 10^5 электронов/см³ при толщине ионосферного слоя в 10 км.

Наконец, четвертое объяснение было предложено в 1968 г. Г. М. Стрелковым, согласно которому наружный покров Венеры состоит из рыхлого верхнего слоя и более плотной подложки. Излучение подложки (в основном на дециметровых волнах) испытывает по пути два отражения: от границы с рыхлым слоем и от верхней границы последнего. На сантиметровых волнах излучает в основном рыхлый слой, излучение которого испытывает лишь одно отражение от верхней границы. Г. М. Стрелкову удалось получить неплохое количественное согласование своей теории с наблюдениями. Он объяснил также расхождение между значениями диэлектрической проницаемости поверхностного слоя Венеры по данным поляризационных и радиолокационных наблюдений, о чем будет сказано ниже.

Параллельно с развитием радиоастрономических исследований большие успехи в изучении Венеры дало применение радиолокации. Этот метод позволил точно определить расстояние до Венеры, а по нему — астрономическую единицу длины (среднее расстояние от Солнца до Земли). Большой вклад в уточнение длины астрономической единицы методом радиолокации Венеры (а также Меркурия) внесен группой советских ученых под руководством академика В. А. Котельникова. Одновременно из тех же наблюдений определились параметры самой Венеры — ее радиус, скорость и направление вращения вокруг оси.

Еще в 1964 г. А. Д. Кузьмин и Б. Дж. Кларк с помощью радиоинтерферометра измерили радиус твердого шара Венеры, получив значение 6057 км. Но средняя ошибка этого определения была слишком велика: ± 55 км. Спустя два года американский радиофизик И. Шапиро с помощью радиолокации получил почти то же самое значение: 6056 км, но уже с ошибкой ± 2 км. Дальнейшие определения советских и американских ученых давали близкие значения: 6050, 6053 и снова

6056 км. В настоящее время наиболее вероятным можно считать среднее из этих значений, т. е. 6053 км.

Примерно также происходило уточнение периода вращения Венеры. Уже в 1962 г. было ясно, что оно — обратное и период его — около 250 суток. Разные исследователи в СССР и США получили различными методами период от 230 до 250 суток. Один из методов был основан на том, что при вращении планеты вокруг оси отраженный ею радиосигнал оказывается «размазанным» по частоте. Ведь один край планеты к нам приближается (и частота отражаемого им сигнала, согласно принципу Доплера, увеличивается), а другой край удаляется (и частота отраженного сигнала уменьшается). По величине «размазывания» можно судить о скорости вращения планеты.

Другой метод связан с наличием на поверхности планеты крупных неровностей, которые дают повышенные отражения сигнала. Их перемещение в ходе вращения планеты приводит к смещению дополнительных отраженных импульсов, по которому и определяют скорость и период вращения.

С каждым годом точность определений росла, и, наконец, оба метода дали вполне согласные результаты: период вращения Венеры равен 243,1 суток, как об этом уже было сказано выше.

Радиолокация Венеры позволила определить и направление оси планеты в пространстве. Оказалось, что ось Венеры почти перпендикулярна плоскости ее орбиты (наклон равен 87°). Но радиолокация может дать нам не только чисто геометрические характеристики Венеры: ее радиус, положение оси, скорость, направление и период вращения. Она может быть использована и для физических исследований планеты.

Выше уже говорилось, что коэффициент отражения радиоволн Венерой оказался примерно одинаковым на волнах 10—70 см и равным 10—15%. В свое время этот факт наряду с другими сыграл роковую роль для ионосферной гипотезы. Но вскоре к нему присоединился новый неожиданный факт: на волне 3 см коэффициент отражения радиоволн вдруг резко падал до 1%.

Поскольку ионосферная гипотеза к этому времени была оставлена, объяснение следовало искать в свойствах поверхности планеты. Согласно теории отражения радиоволн твердыми и жидкими поверхностями, коэффициент отражения (R) тесно связан с диэлектрической проницаемостью вещества поверхности (ϵ):

$$\epsilon = \left(\frac{1 + \sqrt{R}}{1 - \sqrt{R}} \right)^2; R = \left(\frac{\sqrt{\epsilon - 1}}{\sqrt{\epsilon + 1}} \right)^2.$$

Измерения на волнах 10—70 см, а также на волне в 8 м, дали значения $\epsilon=3,7-6,4$. Измерения на волне 3,6 см дали $\epsilon=1,5$.

Прежде всего эти измерения показывали, что на Венере не может быть обширных водоемов (для воды $\epsilon=80$). Полученные на дециметровых и метровых волнах значения ϵ близко совпадали с диэлектрической проницаемостью магнетита, кварцевого и лимонитового песка (3,5—5,0) и энстатита (5,2—6,0), но были меньше, чем у гранита (7,7). Дальше выяснилось, что при сильном разрыхлении (до объемной плотности $0,5 \text{ г/см}^3$) у большинства пород диэлектрическая проницаемость падает до 1,5—1,7, т. е. до тех значений, которые и были обнаружены на волне 3 см.

Хорошо известно, что радиоволны малой длины способны отражаться от самого наружного слоя поверхности планеты, тогда как более длинные волны проникают вглубь и отражаются уже от более глубоких слоев. Поэтому можно предположить, что самый наружный слой поверхности Венеры — пористый и состоит из мелкодробленого песка. Чем глубже, тем более плотные породы мы встретим. Причина разрыхленности наружного покрова Венеры может заключаться в действии ветров, которые хотя и не обеспечивают нагрева поверхности за счет трения переносимой ими пыли, как считал Элик, но вызывают сильную эрозию (выветривание) поверхностных пород.

Еще в 1964 г. Б. Дж. Кларк и А. Д. Кузьмин обнаружили новый «тонкий эффект», требовавший объяснения. Дело в том, что по измеренной ими на радиоинтерферометре дифференциальной поляризации радиоизлучения Венеры тоже можно было определить диэлектрическую проницаемость ее поверхности. И вот Кузьмин и Кларк получили на волне 10 см $\epsilon=2,7$, т. е. несколько меньше, чем по радиолокационным измерениям. Некоторые ученые (в том числе сам Кузьмин) пытались искать причину такого расхождения во влиянии атмосферы Венеры. Идея этих попыток состояла в том, что к поляризованному излучению поверхности Венеры добавляется неполяризованное излучение ее атмосферы, что и приводит к занижению значения ϵ по измерениям поляризации радиоизлучения планеты.

Но необходимости в таких объяснениях не было. Дело в том, что и у Луны (заведомо не имеющей атмосферы) наблюдается точно такой же эффект: диэлектрическая проницаемость по поляризационным наблюдениям оказывается меньше, чем по радиолокационным. Это связано с различными условиями прохождения собственных и отраженных радиоволн в наружном покрове Луны. У Луны плотность и величина ϵ тоже растут с глу-

биной, особенно в самом наружном слое, в несколько сантиметров толщиной. Таким образом, оба отмеченных эффекта получили объяснение с единой точки зрения.

Как уже говорилось выше, в последние годы с помощью радиолокации удалось подметить существование на Венере областей с повышенным коэффициентом отражения радиоволн. Эти области постоянны и вращаются вместе с планетой. В свете того, что было сказано о зависимости R от ϵ , представляется вероятным, что эти области состоят из пород с более высокой диэлектрической проницаемостью (например, из гранитов).

Американские радиоастрономы Р. Голдстейн и С. Зор по своим наблюдениям за 1962—1967 гг. на волне 12,5 см составили радиокарту участка поверхности Венеры (рис. 8). Были обнаружены три области с повышенной отражательной способностью. Самая яркая из них имеет поперечник около 240 км и расположена на широте 25° в Северном полушарии планеты. Ее назвали Бета. В 1000 км к северу от нее находится вторая область — Дельта и менее заметная третья область. Все три области деполяризуют посланный с Земли поляризованный радиолуч, значит они более шероховаты, чем

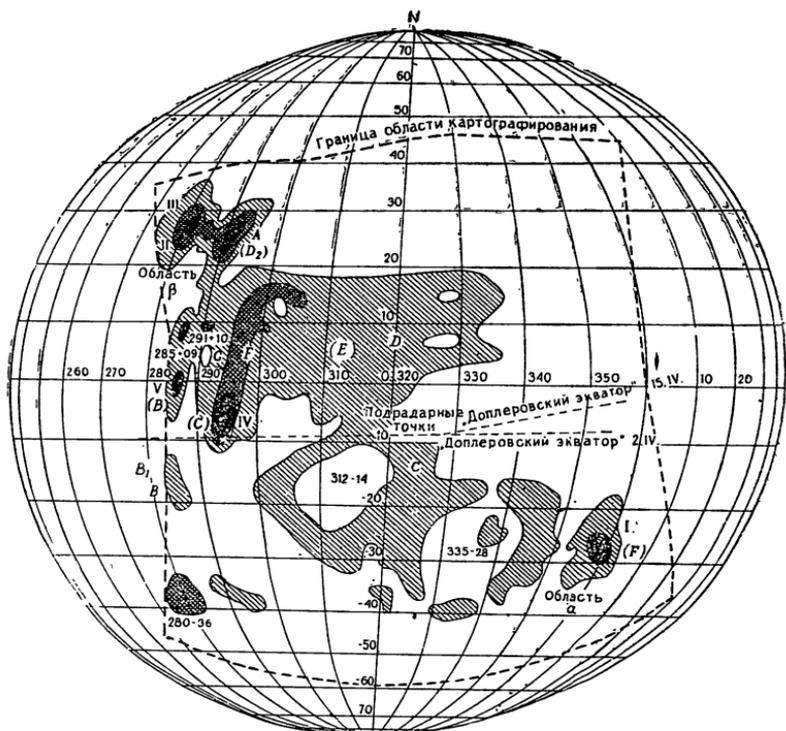


Рис. 8. Радиокарта Венеры (по данным американских ученых)

соседние области. Размеры неровностей превосходят длину волны, т. е. измеряются дециметрами или метрами. Возможно, что это — гористые районы на поверхности Венеры.

Постоянное совершенствование техники и методов радиолокации позволяет надеяться, что в ближайшие годы мы сможем получить детальную карту Венеры.

УСПЕХИ ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ВЕНЕРЫ

Одновременно с наступлением на тайны Венеры методами радиоастрономии и радиолокации шло совершенствование спектральных методов исследования. Оно выразилось прежде всего в расширении охваченного исследованием диапазона длин волн в сторону инфракрасных лучей.

Еще в 30-е годы благодаря применению специальных сортов пластинок удалось заснять спектр Венеры почти до 9000 \AA , т. е. до $0,9 \text{ мкм}$. Земная атмосфера пропускает инфракрасные лучи примерно до 4 мкм , а также в интервале $8\text{—}13 \text{ мкм}$. Но для регистрации этих лучей нужны не фотопластинки, а совсем иные приемники излучения — фотосопротивления и болометры.

В 1947 г. известный американский астроном Дж. Койпер впервые применил сернистосвинцовое фотосопротивление для регистрации спектров планет до $2,5\text{—}3 \text{ мкм}$. Были созданы новые приборы — инфракрасные спектрометры, — в основе которых лежит призменный или дифракционный спектрограф, в котором на месте пластинки находится фотосопротивление. Плавным поворотом призмы или одного из зеркал весь спектр как бы «прогоняется» через фотосопротивление. Помещенное на выходе электрической схемы регистрирующее устройство записывает распределение интенсивности вдоль спектра. Вскоре выяснилось, что чувствительность прибора можно повысить, а спектральный диапазон — расширить, если охлаждать фотосопротивление твердой углекислотой («сухим льдом») или жидким азотом. Кроме фотосопротивлений, в качестве приемников излучения стали применять вентильные фотоэлементы на полупроводниках. Германиевые фотосопротивления позволяют продвинуться в сторону еще больших длин волн — до $9\text{—}15 \text{ мкм}$. Инфракрасная спектрометрия планет и, в частности, Венеры получила большое развитие, в основном в СССР и США. Значительный вклад в совершенствование этого метода сделал советский астроном В. И. Мороз.

Что же дал анализ инфракрасного спектра Венеры?

Прежде всего было обнаружено множество (несколько десятков) полос углекислого газа CO_2 . Казалось бы, этот факт не давал ничего нового, так как полосы CO_2 были еще в 1932 г. обнаружены в фотографической (ближней) инфракрасной области спектра. На самом деле изучение инфракрасных полос CO_2 дало много новых интересных результатов.

Выяснилось, что часть найденных полос принадлежала изотопическим вариантам молекулы CO_2 . «Обычная» молекула CO_2 состоит из одного атома углерода C^{12} и двух атомов кислорода O^{16} . Ее можно обозначить так: $\text{C}^{12}\text{O}^{16}_2$. Но в 1964 г. В. И. Мороз обнаружил полосы, принадлежавшие молекулам $\text{C}^{13}\text{O}^{16}_2$ и $\text{C}^{12}\text{O}^{16}\text{O}^{18}$, т. е. включавшим изотоп углерода C^{13} и изотоп кислорода O^{18} . Относительные содержания этих изотопов, т. е. отношения $\text{C}^{13}/\text{C}^{12}$ и $\text{O}^{18}/\text{O}^{16}$, оказались такими же, как на Земле. Этот факт лишь подчеркивает единство законов, определяющих строение и развитие материи как на Земле так и на других телах Солнечной системы.

В 1961 г. американский астроном У. Синтон обнаружил в спектре Венеры полосу окиси углерода CO на волне 2,35 *мкм*. В 1963 г. В. И. Мороз подтвердил это открытие. Образование CO в атмосфере Венеры легко объясняется фотодиссоциацией CO_2 под действием ультрафиолетовых лучей Солнца: $\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{O}$. Отношение концентраций CO к CO_2 , по В. И. Морозу, составляет 1 : 10 000. Теоретические расчеты показали, что такое отношение вполне вероятно.

Детальное изучение структуры различных полос CO_2 позволило ряду ученых независимо от термоэлектрических измерений определить температуру атмосферы Венеры на уровне формирования этих полос. Она оказалась заключенной в пределах 250—320°K, а наиболее вероятное ее значение 285—295°K, что на 50—60° выше, чем температура облачного слоя по измерениям с термоэлементом. Причину этого расхождения видели сначала в том, что поглощение углекислым газом происходит выше облачного слоя (до падения луча на поверхность облаков и после отражения от нее). Мы знаем, что в верхних слоях земной атмосферы (выше 80 км) температура быстро возрастает с высотой за счет поглощения ультрафиолетовых солнечных лучей кислородом, который под их действием диссоциирует. Молекулы O_2 распадаются на атомы (O). Можно было допустить, что в верхних слоях атмосферы Венеры аналогичную роль поглотителя солнечной энергии играют молекулы CO_2 .

Однако в действительности дело обстоит гораздо сложнее. Облачный слой не имеет резкой поверхности, отражающей солнечные лучи. Прежде чем отразиться к Земле, луч испытывает многократные акты рассеяния на

молекулах и крупных частицах (каплях, твердых кристаллах) внутри самого облачного слоя. Значит, и температура, определенная по интенсивности спектральных линий, входящих в полосы CO_2 , относится к более глубокому уровню, чем поверхность облачного слоя. А это еще раз доказывает, что температура в атмосфере Венеры растет по мере приближения к поверхности.

В 1959 г. группа американских ученых во главе с Дж. Стронгом организовала измерения инфракрасного спектра Венеры со стратостата на высоте 24 км с целью поисков водяного пара. Подняться так высоко было необходимо для того, чтобы избавиться от поглощения водяным паром земной атмосферы. Чтобы быть уверенными, что полосы H_2O принадлежат именно Венере, а не верхним слоям нашей атмосферы (где водяной пар все-таки присутствует, хотя и в небольших количествах), американские ученые снимали контрольные спектры яркой звезды Веги, находившейся на такой же угловой высоте, как и Венера. Разумеется, в атмосфере Веги, имеющей температуру 10 000°, никаких паров воды быть не может, поэтому различие в интенсивности полос H_2O в спектрах Венеры и Веги позволило Стронгу сделать вывод о том, что водяной пар в атмосфере Венеры имеется.

В 1964 г. измерения были повторены с гораздо более совершенной аппаратурой. Телескоп, помещенный в кабине стратостата, автоматически наводился на Венеру, после чего включался фотогид, обеспечивавший постоянство наводки. Для измерения была выбрана полоса H_2O на длине волны 1,14 мкм. Чтобы иметь полную уверенность в том, что регистрируется именно эта полоса, было применено следующее остроумное устройство. В прибор была введена диафрагма, в которой было прорезано 14 узких щелей, по положению соответствовавших 14 наиболее интенсивным линиям полосы H_2O . Эта диафрагма быстро перемещалась взад—вперед с постоянной частотой, создавая модуляцию светового потока, а значит и фототока, регистрировавшегося фотоспротивлением. Электрическая схема прибора пропускала дальше только модулированные колебания. Если бы в данном участке спектра полосы H_2O не было, никакого модулированного тока не получилось бы. Но запись ясно показала, что полоса H_2O присутствует, и позволила определить примерную концентрацию водяного пара в верхних (надоблачных) слоях атмосферы Венеры — менее 10^{-4} (т. е. 0,01%). Следует отметить, что и в земной стратосфере удельная влажность не выше этой величины.

В 1962 г. В. К. Прокофьев и Н. Н. Петрова из Крымской астрофизической обсерватории занялись поисками кислорода в атмосфере Венеры. Эта задача была крайне

затруднена обилием кислорода в нашей земной атмосфере. Чтобы выделить следы венерианского кислорода, советские астрономы применили старый, испытанный метод: они фотографировали спектры Венеры в периоды, когда она приближалась или удалялась с большой скоростью. Наибольшая скорость приближения или удаления Венеры по отношению к Земле равна $13,7 \text{ км/сек}$ (она достигается во время наибольших элонгаций). По принципу Доплера смещение спектральных линий Венеры

равно $\Delta\lambda = \lambda \frac{v}{c}$, где λ — длина волны, v — скорость Венеры по лучу зрения, c — скорость света. Прокофьев и Петрова использовали полосу A молекулярного кислорода с длиной волны $\lambda = 7600 \text{ \AA}$. Подставляя значения λ , v и c в формулу, получим $\Delta\lambda = 0,35 \text{ \AA}$. Таким образом измерять приходилось смещение порядка $0,3 \text{ \AA}$. Но полуширина линий полосы A земного кислорода превосходит эту величину, и влияние венерианского кислорода должно было проявиться в том, что одно из крыльев земной (теллурической) линии содержало бы в нужном месте депрессию (углубление).

Усреднив ряд контуров линий полосы A , используя к тому же моменты как приближения, так и удаления Венеры, Прокофьев и Петрова обнаружили признаки депрессий, связанных с наличием в атмосфере Венеры молекулярного кислорода. Но количество его оказалось очень малым: около 170 см-ат .

Американские ученые Х. Спинрад и Э. Ричардсон, пытавшиеся таким же путем найти венерианские «спутники» теллурических линий кислорода, не смогли их обнаружить. Однако они не применяли усреднения контуров линий, и их результат еще нельзя было считать опровержением открытия кислорода в атмосфере Венеры. В 1968 г. американские астрономы М. Белтон и Д. Хантен вновь тщательно изучили полосу A кислорода при удалении Венеры от Земли и не нашли доплеровских «спутников». По их оценке, относительное содержание кислорода в атмосфере Венеры не превышает $4 \cdot 10^{-5}$. Окончательно этот вопрос не решен.

Большим успехом инфракрасной спектроскопии Венеры было применение французскими астрономами супругами Пьером и Жаниной Конн метода так называемой Фурье-спектроскопии. Идея такого многообещающего метода состоит в том, что луч Венеры в специальном приборе — интерферометре Майкельсона — разделяется на два луча, которые проходят различный путь, а потом сходятся вместе и интерферируют между собой. Если во время эксперимента плавно менять разность

хода лучей (что достигается перемещением одного из зеркал, отражающих луч), то интенсивность результирующего луча будет плавно меняться. Запись изменения интенсивности (интерферограмму) можно путем математической операции, носящей название преобразования Фурье, превратить в запись спектра — спектрофотограмму. Спектр получается потому, что характер интерференции зависит от отношения разности хода лучей к длине волны.

На первый взгляд может показаться, что лучи разных длин волн так смешиваются при записи интерферограммы, что разделить их невозможно: ведь в прибор попадают все участки спектра одновременно. Но это не совсем так, потому что исследователь заранее выделяет нужный ему участок спектра с помощью светофильтров. Преобразование Фурье выполняется с помощью электронно-счетной машины:

Фурье-спектроскопия дает в инфракрасной области небывалую разрешающую способность, т. е. возможность разделять близко расположенные линии, изучать их тонкую структуру и т. д. Первые же результаты, полученные супругами Конн, привели к неожиданному открытию. Помимо множества полос CO_2 , были обнаружены полосы хлороводорода (HCl) и фтороводорода (HF). Хлороводород был представлен двумя изотопическими сочетаниями: Cl^{35} и Cl^{37} . Содержание этих соединений было ничтожно: отношение HCl/CO_2 не превышало 10^{-6} , а HF/CO_2 — 10^{-9} . И все-таки этот метод позволил выявить даже столь малые количества этих веществ.

Работа супругов Конн показала, что углекислый газ является основным газом атмосферы Венеры, а не относительно небольшой примесью, как полагало большинство ученых вслед за американским спектроскопистом Х. Спинрадом, который оценил долю CO_2 в 4%. Основным компонентом атмосферы Венеры считался азот, хотя никаких доводов в пользу этого предположения не было, за исключением аналогии с земной атмосферой.

Как видим, методы наземной спектроскопии не дают однозначного решения вопроса о составе атмосферы Венеры и вкладе отдельных компонентов. Многое зависело от принятой модели атмосферы, характера рассеяния света и других факторов.

Наиболее ясное представление о химическом составе атмосферы Венеры удалось получить благодаря полетам советских автоматических станций «Венера-4», «Венера-5» и «Венера-6».

Первая автоматическая межпланетная станция к Венере была запущена в Советском Союзе 12 февраля 1961 года. Эта станция («Венера») за 97 суток прошла путь до орбиты Венеры и 19—20 мая пролетела примерно в 100 тыс. км от планеты.

Направлять космические станции к Венере можно не в любой момент, а в строго определенные периоды, связанные с взаимным расположением планет на орбите и скоростью, которую ракета-носитель может сообщить станции, поскольку данное расположение Земли и Венеры повторяется через один синодический период (584 суток). Таковы примерно интервалы между сроками запусков межпланетных станций к Венере. От наиболее благоприятного (оптимального) срока допустимы небольшие отклонения до двух недель в каждую сторону, так что длительность благоприятного периода составляет около месяца.

В приводимой ниже таблице указаны сроки отлета и прилета всех запущенных до сих пор космических станций к Венере, длительности перелета и интервалы между запусками (если в данный срок были запущены две станции, интервал отсчитывается от среднего момента).

Станция	Страна	Дата запуска	Дата прилета	Длительность перелета (суток)	Интервал (суток)
«Венера-1»	СССР	1961.II.12	1961.V.20	97	561
«Маринер-2»	США	1962.VIII.27	1962.XII.14	109	1174 =
«Венера-2»	СССР	1965.XI.12	1966.II.27	108	= 2 · 587
«Венера-3»	СССР	1965.XI.16	1966.III.1	106	578
«Венера-4»	СССР	1967.VI.12	1967.X.18	128	
«Маринер-5»	США	1967.VI.14	1967.X.19	127	575
«Венера-5»	СССР	1969.I.5	1969.V.16	131	
«Венера-6»	СССР	1969.I.10	1969.V.17	127	586
«Венера-7»	СССР	1970.VIII.17	1970.XII.15	120	

Из таблицы видно также, что интервалы между запусками действительно близки к синодическому периоду Венеры, хотя и не в точности равны ему. Благоприятный срок запуска в начале апреля 1964 г. использован не был, поэтому от «Маринера-2» до «Венеры-2» прошло два синодических периода.

Первые научные результаты, относящиеся к физическим свойствам самой Венеры, принес полет американской межпланетной станции «Маринер-2» (1962 г.). По движению станции в поле тяготения Венеры была уточнена масса планеты (0,81485 земной). Было установлено, что магнитное поле Венеры очень слабое и не превышает 5 гамм¹ на расстоянии 35 000 км, что в 20—40 раз меньше напряженности магнитного поля Земли на том же расстоянии. Счетчик космических лучей не обнаружил на этом расстоянии роста числа заряженных частиц (такой рост можно было бы связать с радиационными поясами планеты).

«Маринер-2» измерил также температуру Венеры в различных точках ее диска, дав довод в пользу гипотезы горячей поверхности, о чем уже было сказано выше.

1 марта 1966 г. советская станция «Венера-3» впервые достигла Венеры, доставив на ее поверхность вымпелы с гербом Советского Союза.

Новый этап в исследовании Венеры был открыт полетом и плавным спуском в атмосфере Венеры советской автоматической межпланетной станции «Венера-4» (18 октября 1967 г.). На протяжении интервала высот в 26 км приборы станции измеряли давление, плотность и температуру атмосферы Венеры. Были взяты пробы для определения химического состава.

Сутками позже вблизи Венеры пролетела американская космическая станция «Маринер-5». По прохождению ее радиоволн сквозь атмосферу Венеры тоже удалось получить ход давления и температуры с высотой, но «Маринер-5» начал и кончил свои измерения на больших высотах, чем «Венера-4». На некотором интервале данные обеих станций перекрывались, что имело большое значение для их взаимного контроля.

Остановимся подробнее на устройстве и методике изучения атмосферы Венеры обеими станциями.

Станция «Венера-4» была оборудована большим количеством научных приборов, предназначенных для исследования не только самой Венеры и пространства вблизи планеты, но и межпланетной среды, космических лучей, излучения Солнца. В орбитальном отсеке станции размещались счетчики космических лучей, зонды Ленгмюра для исследования «солнечного ветра» — потоков заряженных частиц, испускаемых Солнцем, магнитометр для изучения магнитного поля Венеры и межпланетных магнитных полей, ультрафиолетовый двухканальный фотометр, предназначенный для регистрации ультрафиолетового излучения Солнца и свечения верхних слоев атмосферы Венеры. Спускаемый аппарат почти шарооб-

¹ Гамма — единица напряженности магнитного поля, 10^{-5} эрстеда.

разной формы был снабжен химическими газоанализаторами для изучения состава нижней атмосферы Венеры, несколькими датчиками температуры и давления, радиовысотомером и вспомогательной аппаратурой для регистрации и передачи результатов измерений.

Станция подлетала к Венере с ночной (неосвещенной) стороны. Измерения, выполненные с помощью магнитометра, показали, что магнитное поле планеты не превышает $1/3000$ земного; его напряженность меньше 35 гамм. А поскольку Венера не имеет заметного магнитного поля, у нее не могли образоваться радиационные пояса, имеющиеся у Земли. По-иному проявляется взаимодействие Венеры с потоками солнечной плазмы. Поток плазмы, налетая на Венеру, образует на некотором расстоянии от планеты скачок уплотнения, так называемую отошедшую головную волну. За планетой, с ее ночной стороны, имеется, наоборот, зона разрежения. Обе космические станции приближались к Венере по направлению, составлявшему угол почти в 90° с направлением на Солнце. «Маринер-5» пересек фронт головной волны как бы сбоку, прошел через зону разрежения и вновь попал в корпускулярный поток. «Венера-4» пересекла головную волну несколько ближе к ее лобовой точке и, пройдя через зону разрежения, достигла самой планеты. Любопытно, что когда станция подлетела к Венере на близкое расстояние, планета начала экранировать станцию от космических лучей.

Как показали приборы «Венеры-4», начиная с расстояния в три радиуса планеты (18 тыс. км), стала заметно возрастать интенсивность ультрафиолетового излучения в линии атомарного водорода «Лайман-альфа». На высоте 100 км она уже втрое превосходила уровень фона межпланетного пространства. Это означало, что Венера окружена водородной оболочкой, причем максимальная концентрация атомов водорода достигает 1000 см⁻³.

Измерения электронной концентрации на ночной стороне Венеры показали, что на высотах более 300 км она не превышала 1000 см⁻³, что на 2—3 порядка меньше наибольшей концентрации электронов в земной атмосфере.

«Маринер-5» тоже обнаружил водородную корону Венеры, простиравшуюся до нескольких тысяч километров, но имевшую более низкую температуру, чем на Земле; 700°K вместо 1000°K и более в водородной короне Земли. Причина «похолодания» внешней атмосферы Венеры, находящейся ближе к Солнцу, чем Земля, заключается в том, что в атмосфере Венеры очень мало кислорода, поглощающего ультрафиолетовые лучи Солнца и обеспечивающего нагрев земной атмосферы.

Интересен метод, примененный американскими учеными. Станция «Маринер-5» не подлетала к Венере ближе, чем на 4000 км, и все же смогла изучить слои ее атмосферы до высоты 35 км. Это было сделано методом «радиозатемнения». Радиоволны, посылаемые станцией, проходя через все более плотные слои атмосферы Венеры при захождении станции за планету, испытывали преломление и поглощение. При этом изменялись мощность, частота и фаза принимаемого сигнала. Сравнивая наблюдаемое изменение частоты с тем, которое было бы при отсутствии атмосферы за счет эффекта Доплера (станция удалялась от Земли в это время со скоростью 6,2 км/сек), можно было изучить ход показателя преломления с высотой в диапазоне высот 70—35 км. Кроме того, по времени затухания сигнала при заходе станции за планету и по времени его восстановления при выходе, в сочетании с измерениями сдвига частоты удалось найти так называемую шкалу высот атмосферы Венеры — очень важную характеристику, на смысле которой нам следует остановиться подробнее.

Известно, что плотность ρ и давление P земной атмосферы убывают с высотой по так называемой барометрической формуле:

$$\rho = \rho_0 e^{-h/H}; P = P_0 e^{-h/H}.$$

Здесь P_0 и ρ_0 — значения давления и плотности на нижнем (нулевом) уровне (в частности, на уровне моря), h — высота над этим уровнем, $e = 2,718...$ — основание натуральных логарифмов, H — некоторый параметр, характеризующий скорость убывания давления и плотности с высотой. Очевидно, что если $h = H$, то ρ и P уменьшаются в e раз. Такой интервал называется шкалой высот. Он имеет еще и другой смысл: если взять интеграл по высоте от выражения для плотности, т. е. подсчитать массу столба атмосферы над единичной площадкой, то нетрудно сообразить, что эта масса будет равна $\rho_0 H$, т. е. массе столба однородной атмосферы высотой H с плотностью ρ_0 . Поэтому величину H называют еще высотой однородной атмосферы. Для Земли у поверхности $H = 8$ км.

От каких величин зависит шкала высот? Теория показывает, что она зависит от ускорения силы тяжести g (на данном расстоянии от центра планеты), среднего молекулярного веса атмосферы μ и температуры T . А именно, $H = \frac{RT}{\mu g}$, где R — универсальная газовая постоянная.

Еще в 1959 г. из наблюдений покрытия Венерой яркой звезды Регул американским ученым Д. Мензелу и Ж. Вокулеру и, независимо от них, советскому астроно-

му Д. Я. Мартынову удалось определить шкалу высот атмосферы Венеры на уровне, где блеск Регула ослаблялся ровно вдвое, — на высоте 115 км над поверхностью. Там шкала высот получилась 6,0 — 6,8 км. Зная ускорение силы тяжести g и приняв некоторое значение μ , можно было определить температуру T . Для «уровня затмения» Регула она получилась в пределах 270—305° К (если считать атмосферу Венеры состоящей на 90% из CO_2 , на 9% — из азота и на 1% — из аргона). Другие предположения о составе атмосферы приводили к иным значениям температуры. Получалась некоторая неопределенность.

В эксперименте с «Маринером-5» эту неопределенность удалось разрешить, так как состав, а значит и средний молекулярный вес атмосферы Венеры были известны по данным «Венеры-4». Шкала высот на уровнях 70—90 км от поверхности оказалась равной 5,4 км. Если принять, что атмосфера Венеры на 90% состоит из CO_2 и на 10% из азота, то, поскольку молекулярный вес CO_2 равен 44, а азота — 28, это приводило к среднему молекулярному весу атмосферы Венеры 42,4 и температуре на уровне 70 км 241° К. Если же принять процентное содержание CO_2 равным 75%, температура получалась 228° К. Оба значения температуры на уровне 70 км были близки к температуре облачного слоя, измеренной радиометром.

Приняв тот же средний молекулярный вес для всей атмосферы Венеры, американские ученые по изменению преломляемости радиоволн определили изменение плотности атмосферы Венеры с высотой, затем по плотности и ускорению силы тяжести вычислили ход давления, и, наконец, на сравнения давления и плотности получили кривую температуры. Несмотря на то что эти величины были получены косвенным путем, они дали хорошее согласие с прямыми измерениями «Венеры-4».

По измерениям частоты радиоволн «Маринера-5», проходивших сквозь атмосферу Венеры, американские ученые получили максимальные значения электронной плотности в ионосфере планеты $5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ на дневной стороне (на высоте около 140 км над поверхностью) и 10^4 см^{-3} на ночной, т. е. примерно в 10 раз больше верхнего предела, полученного «Венерой-4». Однако эти данные не противоречат друг другу, так как пик электронной концентрации, найденный «Маринером», относится к высоте 150 км, а измерения «Венеры-4» закончились на высоте 300 км.

«Венера-4» дала очень много ценных научных результатов, часть из которых уже была описана, а о других нам еще не раз придется рассказывать дальше. И все же при изучении материалов полета станции и при срав-

нении ее с радиоастрономическими данными выявилась одна неопределенность, относившаяся к привязке измерений по высоте. Показание высотомера в начале работы станции, равнявшееся 28 км, хорошо совпадало с длиной участка измерений. Это позволило сделать предположение, что измерение параметров атмосферы Венеры производилось до самой поверхности планеты, и полученные в нижней точке значения температуры (544° К) и давления (20±3 атмосфер) относятся к уровню у поверхности.

Но наложение кривых давления и температуры по данным «Венеры-4» и «Маринера-5» показало, что на перекрывающихся интервалах температур и давлений они почти совпадают, если считать, что «Венера-4» прекратила измерения на 25—30 км выше уровня поверхности, определяемого радиолокационными методами.

Траектория полета «Маринера-5» фиксировалась относительно центра Венеры по данным траекторных измерений. Высота полета определялась путем вычитания из расстояния станции от центра планеты радиуса Венеры, определенного радиолокационным методом. Высота «Венеры-4» над поверхностью планеты определялась радиовысотомером. Но показанию радиовысотомера станции «Венера-4» могли соответствовать два значения высоты, различающиеся примерно на 30 км. Такая неоднозначность свойственна высотомерам с периодической модуляцией частоты. Появились предположения, что спускаемый аппарат станции «Венера-4» мог прекратить измерения над поверхностью Венеры вследствие того, что внешнее давление атмосферы, достигнув предельной для прочности аппарата величины, могло вдавить верхнюю крышку приборного отделения, нарушив целостность приборов радиоконкомплекса, в связи с чем на оставшемся участке спуска станции «Венера-4» измерения не проводились.

Чтобы дать ответ на возникшие вопросы, подтвердить и уточнить научные результаты, полученные «Венерой-4», нужно было продолжить исследования непокорной планеты с помощью автоматических межпланетных станций. С этой целью 5 и 10 января 1969 г. в Советском Союзе к планете загадок были запущены две новые автоматические межпланетные станции: «Венера-5» и «Венера-6» (рис. 9). 16 и 17 мая 1969 г. они достигли планеты Венеры и, подобно «Венере-4», совершили плавный спуск в ее атмосферу. Приборы обеих станций работали нормально и заданная программа исследований была выполнена.

Станции «Венера-5» и «Венера-6» по своему устройству напоминали «Венеру-4», хотя некоторые системы и приборы были усовершенствованы, а спускаемый аппа-

рат был рассчитан на более высокие перегрузки, температуры и давления. Был поставлен новый радиовысотометр, улучшены газоанализаторы.

Обе станции подлетали к Венере, как и «Венера-4», со стороны ночного полушария планеты, но пересекли фронт головной волны обтекания Венеры солнечным ветром в 30 тыс. км от центра планеты, а не в 20 тыс. км.

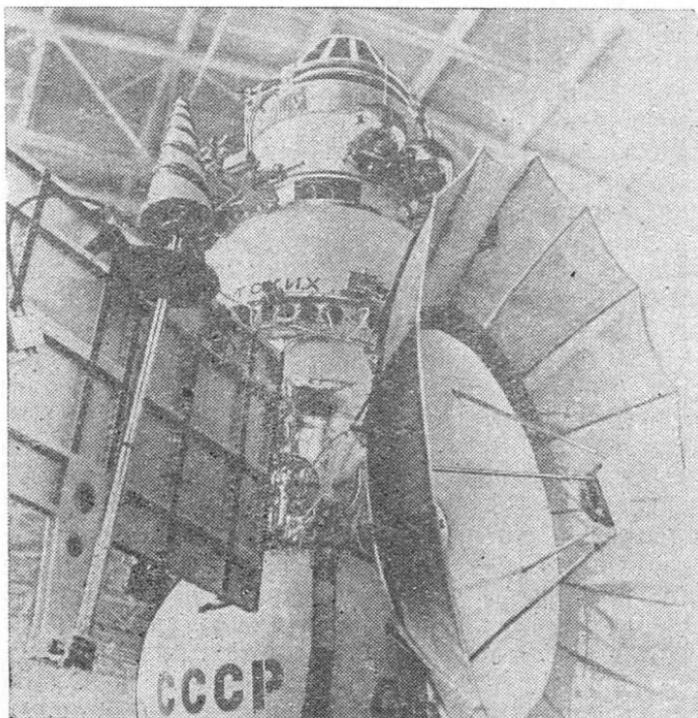


Рис. 9. Советская автоматическая межпланетная станция «Венера-5»

как «Венера-4». Находившиеся на обеих станциях фотоэлектрические фотометры, измерявшие излучение атомарного водорода в лучах ультрафиолетовой линии «Лайман-альфа», уже начиная с расстояния 25 тыс. км от центра планеты обнаружили первые признаки водородной короны, а на расстоянии 10 тыс. км ее плотность оказалась равной 100 атомов/см^3 . Эти результаты подтверждали и дополняли исследования водородной короны, проведенные «Венерой-4».

Станции «Венера-5» и «Венера-6» вошли в атмосферу Венеры со скоростью $11,2 \text{ км/сек}$ под углом около 65° к местному горизонту. За короткое время за счет аэродинамического торможения скорость снижения спускаемых аппаратов была уменьшена примерно до 200 м/сек .

Тогда раскрылись парашюты (тормозной и основной) и начались научные измерения в атмосфере планеты, продолжавшиеся свыше 50 мин. Станции опустились в 2700 км от утреннего терминатора Венеры и примерно в 300 км друг от друга.

Забор проб атмосферы Венеры был произведен станцией «Венера-5» на уровнях с давлением 0,5 и 5 ат, а «Венерой-6» — на уровнях с давлением 1 и 10 ат. Новые данные о химическом составе атмосферы Венеры, полученные коллективом советских ученых под руководством академика А. П. Виноградова, подтверждают и уточняют измерения «Венеры-4». Вот как выглядит уточненный химический состав атмосферы Венеры по данным советских автоматических межпланетных станций:

Газ	Содержание
CO ₂	97±4 %
N ₂	<2%
O ₂	<0,1%
H ₂ O	0,05 %

Содержание водяного пара здесь приведено среднее по всему измеренному участку атмосферы Венеры. Вместе с тем датчик, установленный на станции «Венера-5», производил определение содержания влаги на разной глубине. Полученные данные показывают, что основная часть влаги сосредоточена в облачном и подоблачном слоях, а по мере приближения к поверхности содержание ее уменьшается.

Обратимся теперь к результатам измерений давления и температуры. На тех участках, где проводились измерения, температура менялась примерно от 298° К до 593° К, давление — от 0,5 до 27 ат. Диапазон высот, охваченный измерениями, составил 34—37 км. Измерения были завершены на высоте около 20 км над средним уровнем поверхности Венеры. Однако положения местных уровней поверхности в районах спуска отличаются для обеих станций в среднем на 13 км. Так как давление в 27 ат, зарегистрированное на обеих станциях к концу измерений, соответствует одному и тому же уровню атмосферы, а спуск происходил над различными участками поверхности планеты, можно предполагать, что различие в показаниях радиовысотометров обеих станций объясняется неровностями рельефа поверхности Венеры. В самом деле, на Земле мы наблюдаем разности уровней поверхности, достигающие до 20 км (Гималаи — Марианская впадина в Тихом океане). На Венере нет жидкой воды, не может быть океанов, но неровности рельефа могут быть таких же масштабов, как и на Земле.

Как же происходит изменение давления плотности и

температуры атмосферы Венеры с высотой? Иначе говоря, как выглядит модель атмосферы Венеры?

Составлением моделей атмосферы Венеры занимались многие ученые еще задолго до полета «Венеры-4», впервые осуществившей прямые измерения давления и температуры. Было построено несколько десятков моделей. За основу при их построении брали измерения температуры поверхности, полученные радиоастрономическим методом на сантиметровых волнах, и измерения температуры облачного слоя, полученные радиометрическим методом. Но чтобы определить скорость убывания температуры с высотой, надо было еще знать высоту облачного слоя. Определить ее удалось только после измерения радиуса твердого шара Венеры с помощью радиолокации. И все же высота облачного слоя определялась таким путем с ошибкой не менее ± 10 км. Наиболее вероятное ее значение — 50—65 км. На этом интервале высот температура менялась от 600—700° К до 235° К, так что вертикальный градиент (скорость изменения) температуры составлял примерно 7,3 град/км.

По более точным данным станций «Венера-5» и «Венера-6» вертикальный градиент температуры в атмосфере Венеры составляет 8—8,6 град/км, иначе говоря, с подъемом на один километр температура там падает на 8 градусов (рис. 10).

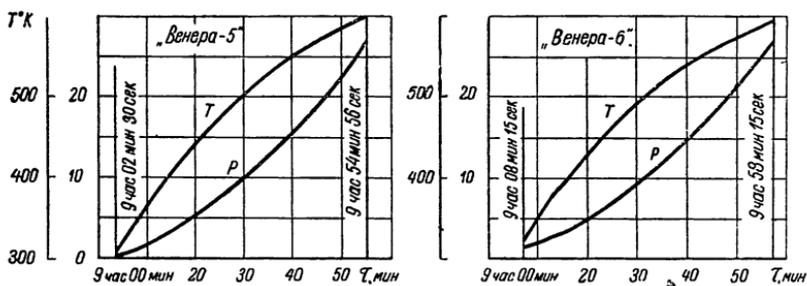


Рис. 10. Ход температуры и давления в атмосфере Венеры по данным советских АМС «Венера-5» и «Венера-6»

Градиент температуры можно рассчитать и теоретически, предположив, что в атмосфере Венеры господствует адиабатическое равновесие, т. е. отсутствуют источники и стоки тепла. Тогда адиабатический градиент температуры выражается простой формулой: $\Gamma_a = \frac{Ag}{C_p}$, где $A = 2,388 \cdot 10^{-8}$ кал/эрг есть тепловой эквивалент работы; C_p — теплоемкость газа при постоянном давлении, g — ускорение силы тяжести.

Подставив численные значения величин, найдем для

атмосферы Венеры $\Gamma = 8,9$ град/км. Таким образом, наблюдаемый температурный градиент мало отличается от адиабатического. Интересно, что в атмосфере Земли (точнее, в ее тропосфере) градиент равен в среднем $5,8$ град/км, хотя адиабатический градиент $\Gamma_a = 9,8$ град/км, иначе говоря, реальный градиент составляет 60% адиабатического. Такое различие объясняется влажностью атмосферы, поскольку водяной пар обладает способностью поглощать и выделять энергию как в виде излучения, так и при процессах конденсации и испарения.

Каковы же условия у самой поверхности Венеры? Советские ученые В. С. Авдуевский, М. Я. Маров и М. К. Рождественский рассчитали, что если температура до поверхности меняется по адиабатическому закону, то на среднем уровне поверхности, определенном как среднее арифметическое из показаний радиовысотометров обеих станций, температура и давление будут 770°K и 100 ат с возможными отклонениями $\pm 60^\circ \text{K}$ по температуре и ± 40 ат по давлению. Но есть основания полагать, что из-за интенсивного поглощения излучения в нижних слоях атмосферы Венеры газом и пылью градиент температуры будет постепенно стремиться к нулю у поверхности. Тогда температура у поверхности планеты составит $685 \pm 10^\circ \text{K}$; а давление 110 ± 50 ат.

Такие чудовищные температуры и давления ставят известные трудности на пути к непосредственному изучению самого нижнего слоя атмосферы Венеры. Ведь давление в 100 ат такое же, как и в океане на глубине в 1000 м. Только специальные снаряды — батискафы — способны выдерживать такие давления. Пока не приходится и думать о высадке космонавтов на поверхность Венеры: люди, даже в скафандрах, будут просто раздавлены этим чудовищным давлением. К тому же температура у поверхности Венеры превышает точку плавления олова и свинца.

Вот почему особое значение для дальнейших исследований Венеры приобретают эксперименты с полностью автоматизированными станциями, способными делать не только физические измерения на других планетах, но и брать пробы почвы и доставлять их на Землю.

15 декабря 1970 г. новая советская автоматическая станция «Венера-7», запущенная 17 августа 1970 г., благополучно завершила 120-суточный перелет и вошла в атмосферу планеты. В течение 35 минут спустя происходил прием сигналов от приборов станции.

Результаты измерений станции «Венера-7», обработка которых еще не закончена, в основном подтверждают и уточняют данные измерений наших трех предыдущих станций.

Высокая плотность атмосферы Венеры приводит к сильному преломлению в ней как радиоволн, так и световых волн. Ниже 35 км над поверхностью на Венере существуют условия «сверхрефракции» — кривизна лучей света там оказывается больше кривизны самой планеты. Горизонт в обычном смысле там не существует, и наблюдателю будет казаться, что он находится на дне гигантской чаши, на которую проектируются в сильно искаженном виде даже весьма удаленные предметы. Однако сильное поглощение света в горячей атмосфере не позволит там видеть на большие расстояния.

Большой интерес представляют соображения академика А. П. Виноградова о путях эволюции венерианской атмосферы. Находясь ближе к Солнцу и имея крайне медленное вращение, Венера должна была нагреваться свыше $+50^{\circ}\text{C}$. При такой температуре происходило интенсивное испарение, а пары воды, создавая парниковый эффект, еще больше поднимали температуру. При возрастании температуры карбонаты кальция и магния в коре планеты, реагируя с силикатами, выделяли в атмосферу углекислоту, что еще более усиливало парниковый эффект. Произошло «саморазогревание», сопровождавшееся выделением почти всей углекислоты из коры планеты в ее атмосферу. Между тем в ионосфере планеты благодаря фотохимическим реакциям происходило непрерывное разложение воды, которое приводило к окислению железа, марганца, серы и других веществ коры планеты. Выделявшийся свободный водород образовал водородную корону, которая сравнима или даже превосходит земную. Но водород постепенно ускользает, диссипирует. Это приводит к усыханию поверхности Венеры, которую можно представить себе как жаркую каменистую пустыню, окрашенную окислами железа в красноватый цвет. Мощные ветры сглаживают неровности рельефа, вздымают тучи пыли, вызывают денудацию пород.

Вот как рисуется нам теперь природа этой все еще загадочной планеты.

ЛИТЕРАТУРА

- В. В. Шаронов. Планета Венера. М., «Наука», 1965.
- У. Келлог и К. Саган. Атмосферы Марса и Венеры. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит. 1962.
- Радиолокация Венеры. Сб. статей. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
- Новое о Марсе и Венере. Сб. статей. Пер. с англ. М., «Мир», 1968.
- А. Д. Кузьмин. Радиофизические исследования Венеры. М., ВИНТИ, 1967.
- В. И. Мороз. Физика планет. М., «Наука», 1967.
- В: А. Бронштэн. Беседы о космосе и гипотезах. М., «Наука», 1968.
- Два чуда космической техники. Специальный выпуск. М., «Известия», 1967.
- Межпланетный репортаж Венера—Земля. М., «Известия», 1969.
- В. Н. Конашенко, К. Я. Кондратьев. Новое о Венере и Марсе. Л., Гидрометеиздат, 1970.
- Д. Я. Мартынов. Планеты. Решенные и нерешенные проблемы. М., «Наука», 1970.

СОДЕРЖАНИЕ

ВЕНЕРА — ПЛАНЕТА ЗАГАДОК (ВМЕСТО ВВЕДЕНИЯ)	3
ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВЕНЕРЕ	5
ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕНЕРЫ КЛАССИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ АСТРОНОМИИ	9
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ РАДИОАСТРОНО- МИИ И РАДИОЛОКАЦИИ	15
УСПЕХИ ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ВЕНЕРЫ	29
ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕНЕРЫ С ПОМОЩЬЮ АВ- ТОМАТИЧЕСКИХ МЕЖПЛАНЕТНЫХ СТАН- ЦИЙ	34
ЛИТЕРАТУРА	45

ВИТАЛИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ БРОНШТЭН

ПЛАНЕТА ВЕНЕРА

Редактор *Р. Базурин*
Обложка *М. Дорохова*
Художественный редактор *В. Конюхов*
Технический редактор *А. Ковалевская*
Корректор *И. Поршнева*

А 01409. Сдано в набор 16/XI 1970 г. Подписано к печати 6/1 1971 г. Формат бумаги 60×90/16. Бумага типографская № 2. Бум. л. 1,5. Печ. л. 3,0. Уч.-изд. л. 2,63. Тираж 11 300 экз. Издательство «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4. Заказ 2721. Типография изд-ва «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.
Цена 9 коп.

«Физика»

ВОЗМОЖНО, ВАС ЗАИНТЕРЕСУЕТ И ЭТА НАША НОВАЯ СЕРИЯ, ВЫПУСК КОТОРОЙ ИЗДАТЕЛЬСТВО НАЧАЛО С ЭТОГО ГОДА. ПОДПИСАТЬСЯ НА НЕЕ МОЖНО СО ВТОРОГО КВАРТАЛА ДО КОНЦА ГОДА В СЕРИИ «ФИЗИКА», В ЧАСТНОСТИ, ВЫЙДУТ СЛЕДУЮЩИЕ РАБОТЫ

Абрикосов А. А. Теория полуметаллов.

Баженов А. И. Физики-лауреаты.

Капица П. Л. Выдающиеся ученые XX века.

Кикоин И. К. Задачи для начинающих физиков.

Кузнецов В. И. Синтез ядер.

Рыдник В. И. и Нестер Б. П. Прямые методы преобразования энергии.

Понтекорво Б. М. Энрико Ферми.

Смирнов Б. М. и Елецкий А. В. Лазеры в науке и технике.

Физики о физике. Сборник.

Эрнест Розерфорд. Сборник.

Подписка на серию «Физика» принимается всеми отделениями связи. Стоимость подписки со второго квартала — 81 коп. Индекс серии — 70102 (Приложение к каталогу «Союзпечати»).

ВЫПИСЫВАЙТЕ И ЧИТАЙТЕ БРОШЮРЫ СЕРИИ «ФИЗИКА»!



9 коп.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»
МОСКВА 1971

Индекс
70101