

**Михаил  
Яковлевич  
Маров**

## **СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ВЕНЕРЕ**

Развитию физики планет за последние годы способствовали, с одной стороны, практические потребности в связи с развитием техники космических полетов, а с другой — совершенствование методов наземных наблюдений и появление таких мощных современных инструментов исследований, как автоматические космические станции — зонды. В результате планетология обогатилась новыми фундаментальными данными, которые привели к существенному прогрессу в представлениях о физических особенностях планет.

Венера — ближайшая к Земле планета, обращающаяся вокруг Солнца почти по круговой орбите, заключенной внутри земной, на расстоянии 0,723 а. е. (108,1 млн. км) от Солнца. По своим размерам, массе, средней плотности она очень похожа на Землю. Действительно, радиус Венеры, недавно уточненный по результатам радиолокационных измерений, всего лишь на 320 км меньше среднего земного, масса составляет около 80 % от массы нашей планеты, а средняя плотность почти такая же, как у Земли. Венера получает примерно вдвое больше солнечной энергии, но отражение от постоянно окутывающего ее плотного облачного слоя также приблизительно вдвое выше. Поэтому приток энергии к Венере и Земле почти одинаков.

Однако сходство двух планет чисто внешнее. За последнее десятилетие выявлены отличия принципиального характера, которые заставили отказаться от упрощенных представлений о том, что Венера и Земля — «близнецы».

Атмосфера на Венере была открыта М. В. Ломоносовым в 1761 г. Однако потребовалось свыше двухсот лет, прежде чем удалось существенно прояснить вопрос о структуре венерианской атмосферы и ее

свойствах, об ожидаемых физических условиях на планете.

Приблизительно до 40—50-х годов нашего столетия существовало убеждение, что Венера обладает природными условиями, необходимыми для существования развитых форм жизни. И даже когда новые экспериментальные факты стали все с большей определенностью свидетельствовать о существенном отличии физико-химических условий на этой планете от земных, родились разнообразные гипотезы, пытавшиеся «примирить» результаты наблюдений с представлениями о сравнительно умеренном климате на поверхности Венеры. Наряду с этим существовали гипотезы о каменноугольном периоде на Венере, о водном океане, сплошь покрывающем ее поверхность, а также об обилии углеводов в атмосфере, которые могли бы образовываться в недрах планеты при высоких температуре и давлении, и, в частности, об океане нефти на поверхности Венеры.

В чем же причина такого разнообразия представлений о природе этой планеты? На протяжении сотен лет Венера упорно хранила свои тайны под мощным слоем сплошных облаков, скрывающих ее поверхность. Они практически не позволяют выделить какие-либо отчетливые детали на диске планеты даже при использовании современных оптических телескопов, хотя в отдельные периоды и наблюдались образования, подобные разрывам в облаках. Многочисленные визуальные и фотографические наблюдения, а позднее и спектральные исследования в видимой, инфракрасной и ультрафиолетовой областях спектра, давшие много ценной информации о планете, не привели к сколько-нибудь успешным попыткам проследить видимое движение характерных деталей (пятен, полос) на ее диске.

и долгое время нельзя было ответить на вопрос о параметрах собственного вращения Венеры. Оптические и первые радиолокационные измерения давали значения периода собственного вращения Венеры, различающиеся более чем в сто раз. Лишь к середине 60-х годов удалось установить, что этот период в 243 раза больше длительности земных суток, причем направление вращения

сезонные изменения на планете практически отсутствуют.

К сожалению, до настоящего времени крайне ограничены сведения о фигуре и топографии Венеры. Исходя из имеющихся данных радиолокационного зондирования можно ожидать, что отличие фигуры планеты от сферической невелико. Вблизи экваториальной плоскости обнаружены перепа-



Рис. 1. Вымпелы с изображением барельефа В. И. Ленина и Государственного герба СССР, доставленные на планету автоматической станцией «Венера-7»

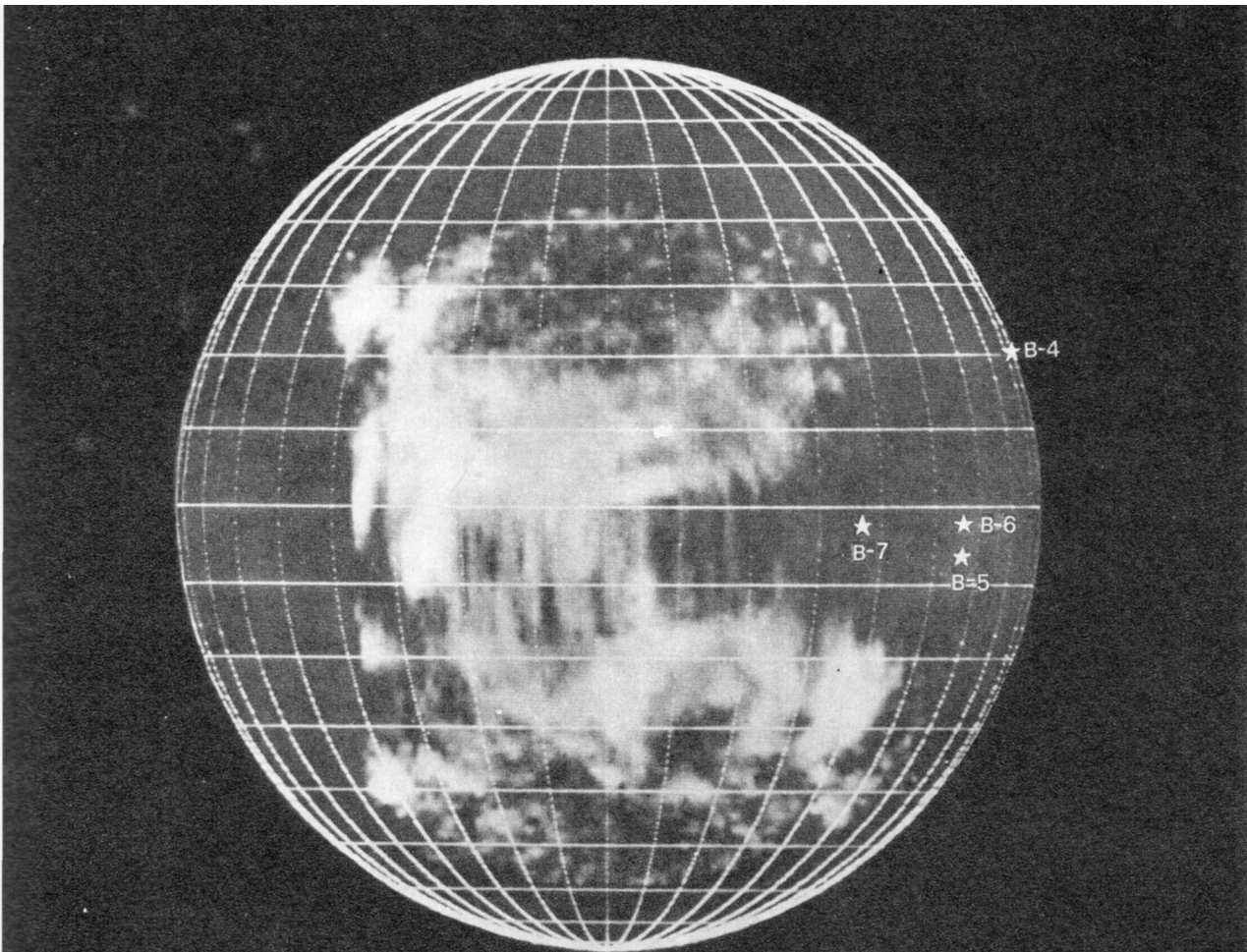
Рис. 2. Отражательные характеристики поверхности Венеры в радиодиапазоне (Хайстек, США). Чем сильнее отражение сигналов, тем светлее область. Причиной различного отражения радиоволн могут быть свойства материала поверхности или особенности рельефа планеты. Показаны области, где осуществили спуск автоматические станции «Венера»

обратное, т. е. по часовой стрелке, если смотреть с Северного полюса мира, а не против, как у Земли и других планет. При каждом сближении с Землей Венера повернута к нам почти точно одной и той же стороной, т. е. наблюдается как бы ее резонансное вращение относительно Земли. Были попытки объяснить возможность такой синхронизации орбитальным движением Земли за счет действия приливных сил.

Комбинация собственного обратного вращения и годового обращения Венеры вокруг Солнца приводит к тому, что за один венецианский год восход и заход Солнца на планете происходит дважды, и продолжительность венецианских солнечных суток составляет 116,8 земных. Ось собственного вращения Венеры почти перпендикулярна к плоскости ее околосолнечной орбиты — угол наклона свыше  $87^\circ$ . Поэтому в отличие от Земли, у которой этот угол около  $67^\circ$

ды высот на поверхности Венеры до 3 км, однако при достигнутой разрешающей способности радиолокационной установки можно было различить характерные детали протяженностью лишь в несколько сот километров и более. Возможно, что неоднородности венецианского рельефа выражены более резко. Во всяком случае изучение отражательных характеристик Венеры в радиодиапазоне, в частности данные о поляризации отраженных планетой радиоволн, позволяют предполагать переменность физических свойств поверхности Венеры и, видимо, сложный характер ее топографии.

Поверхность Венеры можно «видеть» лишь в сравнительно узком диапазоне радиоволн (приблизительно от трех до нескольких десятков сантиметров), для которых ее атмосфера достаточно прозрачна. Видимая верхняя граница венецианских облаков является как бы порогом для визуаль-



ных наблюдений. Вблизи этой границы находится и уровень собственного излучения планеты в инфракрасной области. Регистрируемые на Земле спектральные характеристики излучения — структура полос поглощения, интенсивность и ширина отдельных линий — позволили обнаружить в атмосфере Венеры углекислый и угарный газ, водяной пар, хлористый и фтористый водород, а так же оценить температуру (примерно от  $-30$  до  $-50^{\circ}\text{C}$ ) и давление вблизи облаков (по поляризационным и спектральным измерениям — от 0,05 до 0,2 атм). Однако измерения при помощи оптических наземных инструментов давали лишь относительные содержания отдельных компонентов выше облаков и были бессильны ответить на вопрос о том, каковы параметры атмосферы ниже уровня излучающего слоя.

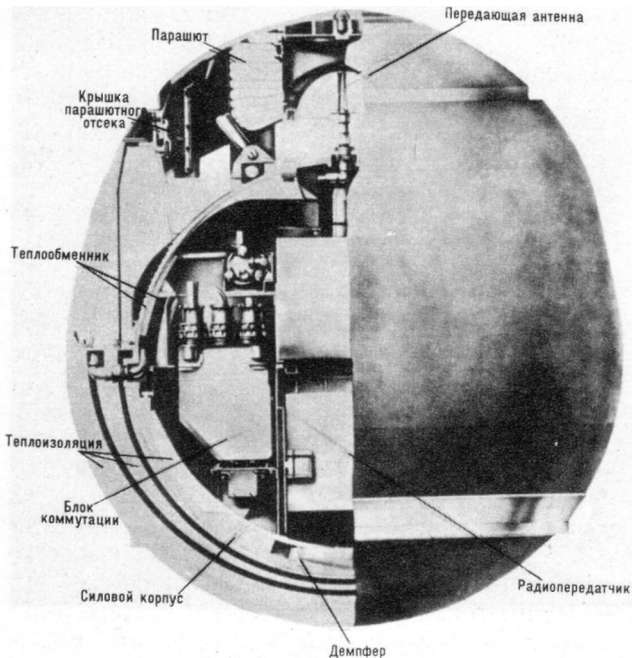
Следует отметить, что наибольшую эффективность дало использование инстру-

ментов с высоким спектральным разрешением (фурье-спектрометров). Результаты этих измерений приводили к представлениям о значительном количестве углекислого газа в атмосфере Венеры. Тем не менее большинство исследователей было склонно считать, что концентрация  $\text{CO}_2$  не превышает 5—10%, а основной составляющей атмосферы Венеры, по аналогии с земной атмосферой является азот.

В конце 50-х годов с развитием техники радиоастрономических наблюдений неожиданно обнаружили высокую радиояркую температуру Венеры. Это температура, характеризующая интенсивность (яркость) излучения планеты в диапазоне радиоволн. Радиояркая температура Венеры оказалась порядка  $300\text{—}400^{\circ}\text{C}$ , т. е. во много раз выше, чем у Земли и Марса. Первым естественным объяснением этого результата было предположение, что до такой темпера-

туры разогрета поверхность Венеры, интенсивно излучающая на сантиметровых волнах, которые почти свободно проникают через атмосферу. Это, казалось, заставляло отказаться от увлекательных и многообещающих гипотез об океанах и пышной растительности на планете.

Вместе с тем были сделаны попытки объяснить высокую радиояркую температуру Венеры, исходя из представлений о «горячей» атмосфере при умеренно нагретой поверхности или нетепловой природе излучения. Seriously дискутировались гипотезы о сверхплотной ионосфере плане-



тность атмосферы ниже их видимой границы, другими словами, как «глубоко» находится поверхность. Ответы на эти и многие другие вопросы могли дать лишь прямые измерения при помощи космических аппаратов.

Естественно поэтому, что проведение зондирования атмосферы ниже видимого слоя облаков явилось основной задачей автоматических станций «Венера». Уникальные данные, полученные в результате успешного осуществления серии этих экспериментов, а также экспериментов, выполненных американскими учеными при проле-

Рис. 3. Спускаемый аппарат станции «Венера-7», совершивший 15 декабря 1970 г. посадку на поверхность Венеры

ты (с концентрацией электронов, в тысячу раз большей по сравнению с ионосферой Земли), о тлеющих электрических разрядах в ее атмосфере, о генерации излучения при движении электронов в магнитном поле и др. Каждая из них, в принципе, была способна объяснить наблюдаемый характер микроволнового спектра Венеры, хотя при более внимательном рассмотрении встречалась с известными трудностями или требовала довольно искусственных допущений. В результате вопрос об источнике высокой радиояркой температуры и, следовательно, о том, какова температура атмосферы у поверхности Венеры, оставался до конца нерешенным. Еще большая неопределенность была в оценках величины давления у поверхности: назывались значения от единиц до нескольких сот атмосфер. Астрономы не располагали сведениями и о том, каков характер изменения температуры в атмосфере под облаками, какова протя-

те вблизи планеты космического аппарата «Маринер-5», открыли новый этап в изучении Венеры и положены в основу современных представлений о природе этой планеты.

### Космические аппараты «Венера»

Первая попытка исследования Венеры: с космического аппарата относится к 1961 г., когда в нашей стране был осуществлен запуск автоматической станции «Венера-1». В 1962 г. вблизи Венеры пролетел американский космический аппарат «Маринер-2». В 1965 г. к соседней планете правились две новые советские автоматические станции «Венера-2» и «Венера-3» «Венера-3» в ноябре 1965 г. впервые осуществила перелет на Венеру по попадающей траектории.

Прямые измерения в атмосфере Венеры были начаты историческим полетом «Венера-4» в 1967 г. и продолжены в 1969 г. на

станциях «Венера-5 и -6». Эксперименты на американском космическом аппарате «Маринер-5» позволили существенно дополнить полученные результаты и расширить область измерений в сторону больших высот, 15 декабря 1970 г. автоматическая станция «Венера-7» впервые совершила посадку на другую планету Солнечной системы и в течение 23 мин проработала на ее поверхности в чрезвычайно тяжелых условиях окружающей среды, передавая на Землю данные измерений.

Траектории полета автоматических станций «Венера-4—7» были выбраны таким образом, чтобы при больших углах входа осуществить исследования атмосферы Венеры на ночной стороне вблизи экваториальной плоскости.

В целом станции «Венера» примерно аналогичны по конструкции. По результатам анализа полета «Венеры-4» в конструкцию спускаемого аппарата (СА) станций «Венера-5 и -6» были внесены некоторые изменения, которые касались прежде всего уменьшения площади купола основного парашюта (с целью более быстрого спуска в плотной атмосфере планеты) и некоторого повышения прочности корпуса СА. Наиболее существенной модификации подвергся СА станции «Венера-7». Поскольку его основной задачей было достижение поверхности планеты и обеспечение работы на поверхности, он спроектирован как посадочная капсула. С учетом результатов предыдущих измерений станций «Венера-4—6» и полученных предельных оценок параметров атмосферы посадочная капсула рассчитывалась на очень высокие температуру и давление окружающей среды (соответственно до 530°C и 180 атм). За счет упрочнения корпуса и создания специальной теплозащиты, обладающей необходимыми теплоизоляционными и одновременно амортизационными свойствами, СА «Венеры-7» стал примерно на 100 кг тяжелее, хотя общий вес станции остался по сравнению с предыдущими станциями «Венера» почти неизменным (около 1180 кг).

Отделение спускаемых аппаратов от орбитального отсека производилось на расстояниях около 20—40 тыс. км от Венеры, и участок аэродинамического торможения в атмосфере начинался при скорости около 11,2 км•сек<sup>-1</sup> под углами приблизительно 60—70° к местному горизонту. Раскрытие парашюта происходило в момент, когда скорость аппаратов уменьшалась примерно до 210 м•сек<sup>-1</sup>, что соответствовало давлению окружающей атмосферы около 0,6 атм.

Спускаемый аппарат станции «Венера-7» имеет несколько продолговатую конфигурацию и содержит внутри герметичный контейнер сферической формы с аппаратурой, состоящей из радиотелеметрической системы, приборов для измерения параметров атмосферы, автоматики систем управления и терморегулирования и источников питания. Снаружи капсула закрыта термозащитой и теплоизоляцией, предохраняющими ее, соответственно, от аэродинамического нагрева при входе в атмосферу и при работе в атмосфере на участке парашютного спуска и на поверхности. В верхней части капсулы, под отстреливаемой крышкой, размещен парашютный контейнер. Использовалась однокаскадная парашютная система с вытяжным парашютом. Термостойкий материал основного парашюта был рассчитан на то, чтобы также, как и сам аппарат, противостоять температурам до 530°C.

Станции «Венера-4 и -6» были оборудованы сравнительно простыми газоанализаторами для определения химического состава атмосферы. Эти приборы измеряли содержание углекислого газа, азота (вместе с инертными газами), кислорода и водяного пара. Принцип работы газоанализаторов основывался главным образом на использовании довольно простого манометрического метода. Для получения пороговых оценок применялись также электролитический и термохимический методы. Измерение температуры и давления атмосферы проводилось простыми и надежными способами измерения теплофизических параметров плотного газа при помощи термометров сопротивления и манометров мембранного (анероидного) типа. Независимо измерялась также плотность атмосферы, для чего на борту станций устанавливались специаль-

ные плотномеры ионизационного и камертонного типов.

Сложность создания и работы бортовой аппаратуры первых станций «Венера» определялась неопределенностью в оценках параметров атмосферы и необходимостью в связи с этим рассчитывать на большой диапа-

лорода в атмосфере Венеры практически нет, а содержание водяного пара вблизи облачного слоя менее одного процента.

Современные представления о химическом составе атмосферы Венеры основываются на результатах прямых измерений и наземной спектроскопии (см. табл. 1).

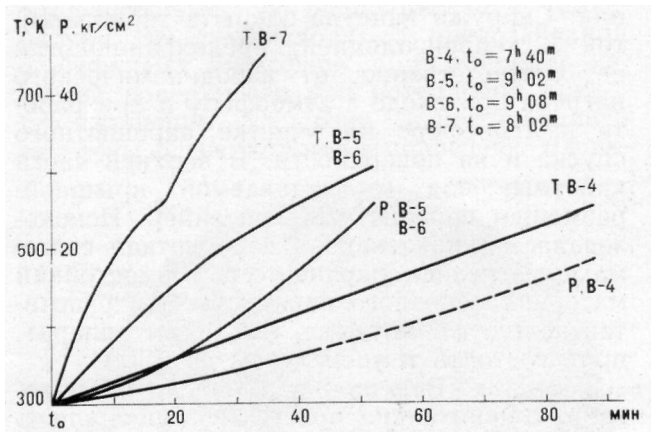


Рис. 4. Результаты измерений температуры и давления атмосферы Венеры на советских автоматических станциях. Изменение температуры и давления показано в зависимости от времени спуска, которое было различным из-за разной площади купола парашюта: медленнее всех опускалась «Венера-4» (свыше полутора часов до высоты 28 км над поверхностью), а «Венере-7», начавшей спуск с той же высоты, что и «Венера-4», чтобы достичь поверхности, потребовалось 35 мин

Рис. 5. Вход автоматических станций «Венера» в атмосферу планеты и спуск на парашютах. Показаны участки зондирования атмосферы каждой станцией на фоне высотных профилей атмосферных параметров, построенных по результатам проведенных измерений. Соотношения масштабов условные

зон измерений, а в дальнейшем — необходимостью обеспечить работоспособность приборов в сложных условиях венерианской атмосферы вплоть до поверхности.

### Структура атмосферы Венеры

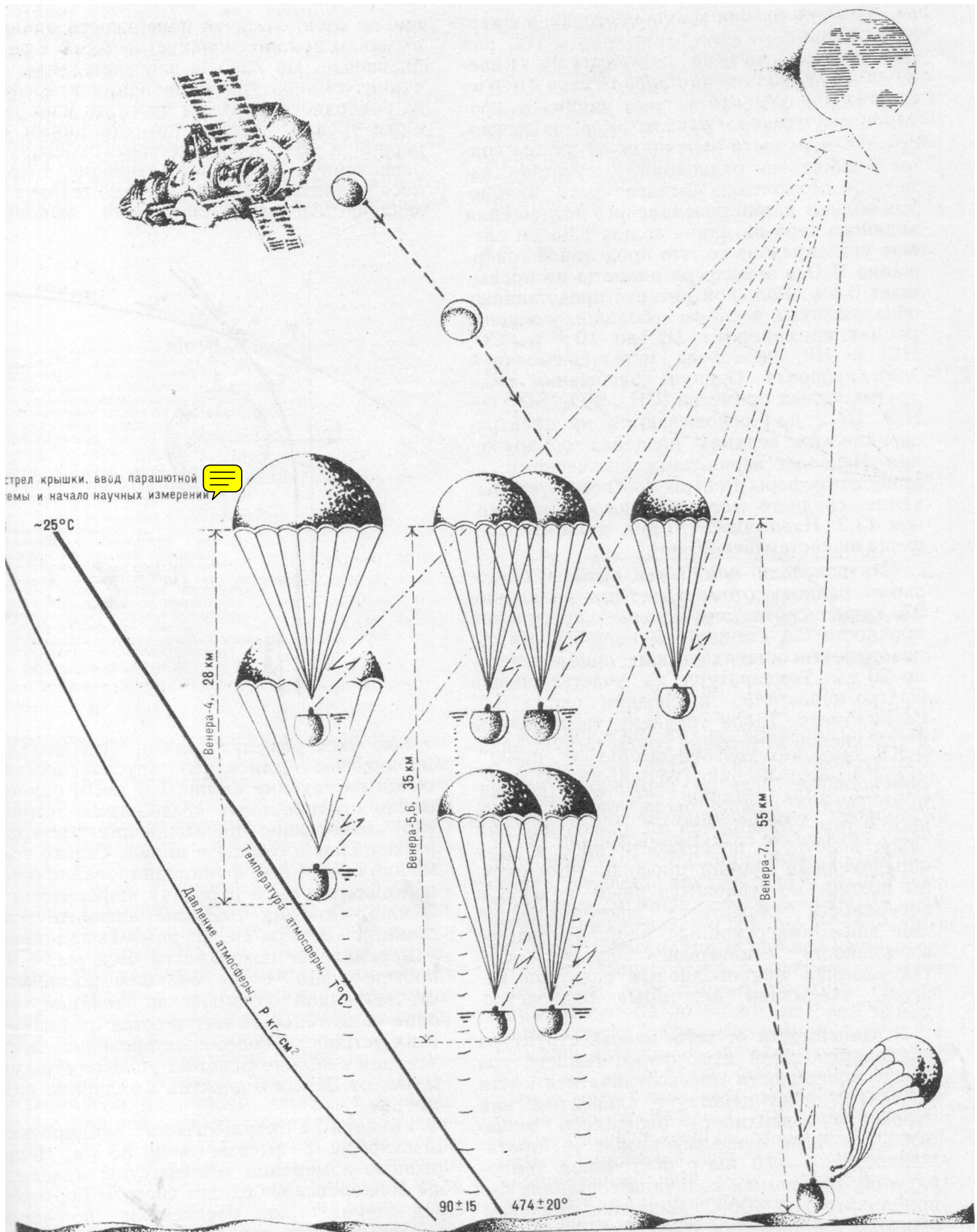
На рисунке суммированы первичные результаты измерений параметров атмосферы Венеры в зависимости от времени (время московское), которые служат основным источником данных о ее физической структуре. Как видим, станции «Венера» начали передавать информацию об окружающей среде, когда температура составляла 25°C, а давление примерно 0,6 атм, и провели зондирование на участках плавного спуска на парашютах в ночной атмосфере планеты вплоть до уровня, где температура поднялась до 325°C, а давление увеличилось до 27 атм. Такое изменение параметров произошло в интервале высот около 40 км.

Важнейшим результатом измерений при полетах станций «Венера-4—6» явилось непосредственное определение химического состава при помощи бортовых газоанализаторов. Измерения проводились на нескольких уровнях при давлениях 0,6; 2; 5 и 10 атм. Вопреки существовавшим представлениям о преобладающем содержании азота, оказалось, что атмосфера Венеры почти целиком состоит из углекислого газа, а объемное содержание азота (если он вообще присутствует) — не более 2%. Кис-

Спектроскопия дает меньшие верхние пределы для кислорода и водяного пара. В отношении  $O_2$  это согласуется с оценкой «Венер»; что касается  $H_2O$ , то следует учитывать разные уровни в атмосфере, к которым относятся прямые и спектроскопические измерения и, следовательно, возможность конденсации водяного пара. Нижняя спектро-

Таблица 1

Газ	Относит. объемн. содержание	Метод
$CO_2$	$0,97 + 0,04$	«Венера-4—6»
$N_2$	$<2 \cdot 10^{-2}$	»
(включая инертные газы)		
$H_2O$	$10^{-3}—10^{-2}$	»
(при $p=0,6$ атм)		
$H_2O$	$\sim 7 \cdot 10^{-4}$	Спектр.
$O_2$	$<10^{-3}$	«Венера-5, 6»
$O_3$	$<10^{-4}$	Спектр.
$CO$	$4 \cdot 10^{-5}$	»
$HCl$	$6 \cdot 10^{-7}$	»
$HF$	$10^{-6}$	»
$CH_4$	$<10^{-6}$	»
$CH_2Cl$	$<10^{-6}$	»
$CH_3F$	$<10^{-6}$	»
$C_2H_2$	$<10^{-6}$	»
$HCN$	$<10^{-6}$	»
$O_3$	$<10^{-8}$	»
$SO_2$	$<3 \cdot 10^{-4}$	»
$COS$	$<10^{-8}$	»
$C_2O_2$	$<5 \cdot 10^{-7}$	»
$H_2S$	$<2 \cdot 10^{-4}$	»
$NH_3$	$<3 \cdot 10^{-4}$	»

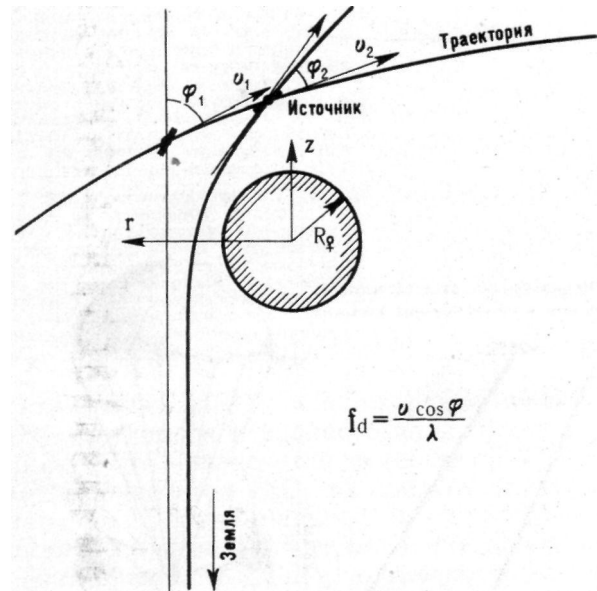


скопическая оценка  $H_2O$ , относящаяся к вершине облачного слоя, примерно в 100 раз меньше того, что дают измерения на «Венерах». Верхнюю оценку содержания  $H_2O$  во всей толще атмосферы дает анализ микроволнового спектра Венеры, т. е. зависимости интенсивности излучения от длины волны в диапазоне радиоволн. Отсутствие заметного ослабления интенсивности излучения вблизи линии резонансного поглощения водяного пара на длине волны 1,35 см служит указанием на то, что предельное содержание  $H_2O$  в атмосфере планеты не превышает 0,5%. Большой интерес представляют обнаруженные в очень небольших концентрациях, примерно от  $10^{-3}$  до  $10^{-6}\%$ ,  $CO$ ,  $HCl$  и  $HF$ , кислорода меньше тысячной доли процента. Оценки содержания ряда других малых примесей ( $CH_4$ ,  $C_2O_2$ ,  $SO_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2S$ ,  $O_3$  и др.) основываются на спектроскопических верхних пределах обнаружения. Наиболее вероятному химическому составу атмосферы Венеры соответствует значение среднего молекулярного веса, равное 43,2. Напомним, что для земной атмосферы он составляет 28,96.

Как показали измерения высоты бортовыми радиовысотомерами, при давлении 27 атм, соответствовавшем предельной прочности СА станций «Венера-5 и -6», до поверхности оставалось еще приблизительно 20 км. Температура на участке спуска быстро нарастала — в среднем около  $8,5^\circ$  на километр. Такой градиент температуры в углекислой атмосфере соответствует адиабатическому закону, когда происходит перемешивание газа по вертикали (конвекция). Трудно, однако, было ответить на вопрос о том, сохраняется ли адиабатический закон вплоть до поверхности либо в силу определенных причин профиль температуры постепенно становится иным и вблизи поверхности образуется изотермический или даже инверсионный слой. На такую возможность, основываясь на результатах анализа микроволновых спектров Венеры, указывали некоторые радиоастрономы.

В зависимости от того, какова структура приповерхностной атмосферы, температура газа у поверхности могла отличаться почти на  $100^\circ C$ ; если действует адиабатический закон, у поверхности ожидалось около  $500^\circ C$ , а если существует область протяженностью 5—10 км с постоянной температурой, то искомая величина составила бы приблизительно  $400^\circ C$ . Давление при этом ожидалось в пределах от 70 до 150 атм. Таким образом, подтверждалось предположе-

ние об очень горячей поверхности планеты, вызывающей интенсивную эмиссию в радиодиапазоне. Но каковы действительные значения температуры и давления атмосферы на поверхности? Чтобы провести измерения ниже уровня, достигнутого станциями «Венера-5 и -6», и осуществить посадку на раскаленную поверхность Венеры, требовалось решить сложные научно-технические задачи. Аппарат, способный выполнить



такой эксперимент, должен был обладать прочностью батискафа, опускающегося в океан на глубину свыше 1,5 км, и одновременно противостоять воздействию температур, значительно превышающих температуры плавления свинца и цинка. Только тогда можно обеспечить функционирование бортовой аппаратуры и передачу информации на Землю. Поэтому создание автоматической станции «Венера-7», впервые выполнившей измерения на поверхности Венеры, — это, прежде всего, новое большое достижение отечественной космической техники, еще одно свидетельство могущества автоматических устройств, способных проводить исследования в крайне тяжелых условиях, на удалении от Земли в десятки миллионов километров.

«Венера-7» осуществила зондирование атмосферы с высоты около 55 км. Непрерывные измерения температуры и величины доплеровского сдвига частоты бортового радиопередатчика обеспечили получение высотных профилей атмосферных параметров в подоблачной атмосфере планеты.



Полет «Венеры-7» дал возможность также получить самые первые оценки характера поверхности Венеры. Качественный анализ условий посадки аппарата проводился по данным об изменении мощности радиосигнала. Поскольку гашение вертикальной скорости аппарата произошло за время, меньшее 0,2 сек, можно предполагать, что грунт в районе посадки является твердым. При попадании в маловязкую

Рис. 6. Геометрия распространения радиолучей в атмосфере Венеры. Радиосигнал, излученный космическим аппаратом (источник), испытывает преломление в атмосфере планеты (рефракцию). По величине рефракции, определяемой по доплеровскому сдвигу частоты источника ( $\Delta f$ ),

рассчитывается плотность и температура атмосферы, если известен ее химический состав

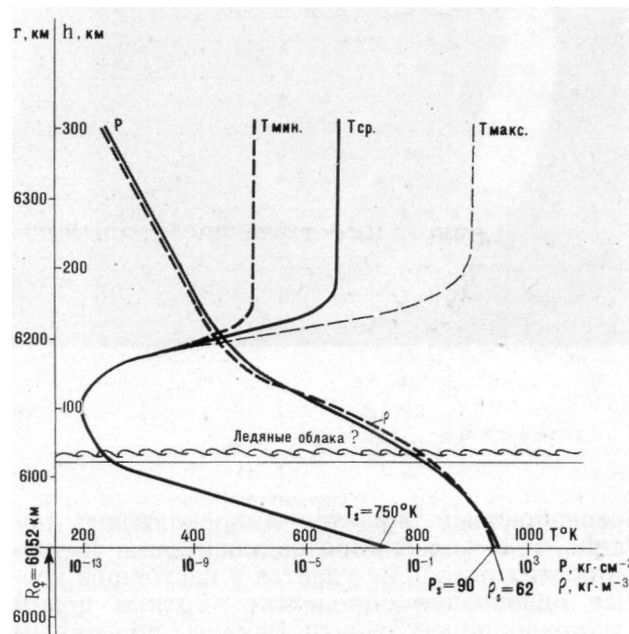
Рис. 7. Современные представления о распределении температуры, давления и плотности атмосферы Венеры по высоте. Уровень расположения и протяженность облаков (в случае, если это ледяные облака) даны условно. Пунктиром показано ожидаемое изменение температуры верхней атмосферы в зависимости от фазы одиннадцатилетнего цикла солнечной активности ( $T$  — температура,

$^{\circ}\text{K}$ ,  $P$  — давление,  $\text{кг}/\text{см}^2$ ,  $\rho$  — плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ).

жидкость или толстый слой пыли процесс торможения аппарата и уменьшение уровня сигнала происходили бы существенно медленнее. С учетом данных о прочности аппарата можно получить верхнюю оценку прочности грунта примерно  $80 \text{ кг}/\text{см}^2$ . На Земле в таком диапазоне прочности лежат породы типа вулканических туфов. Есть, однако, основания считать, что фактическая прочность грунта меньше, т. е. он является менее плотным. На это указывают результаты сопоставлений характера изменения радиосигнала с аналогичными характеристиками, полученными при обработке посадки аппарата в наземных условиях.

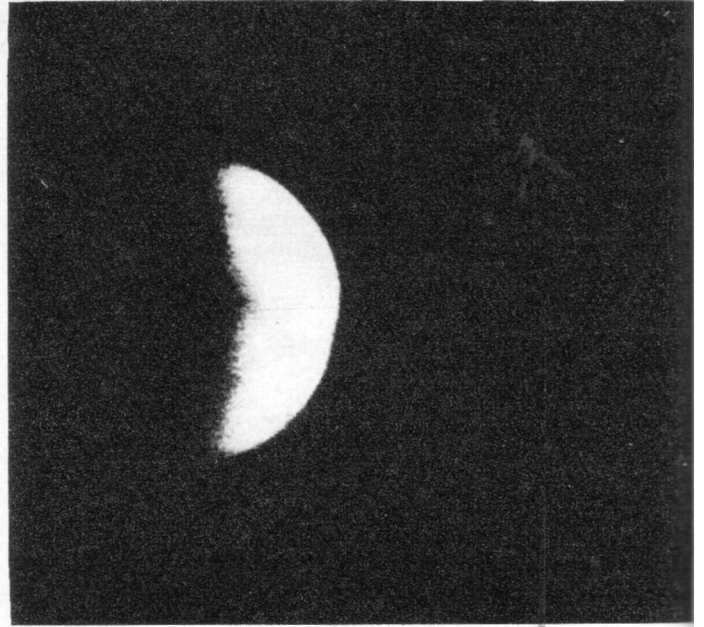
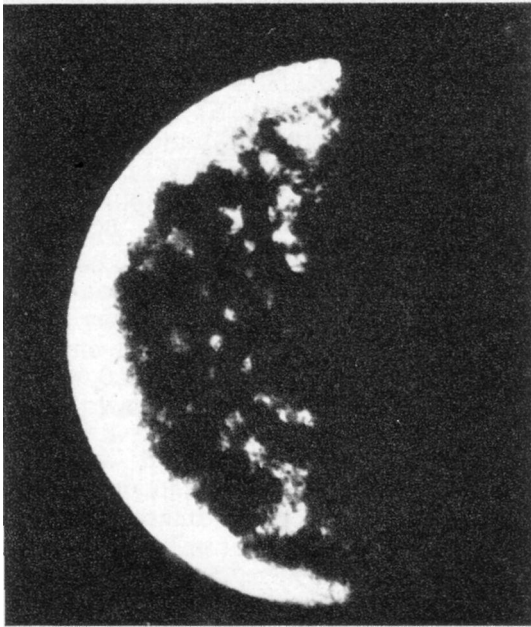
Результаты измерений «Венеры-7» имеют важное научное значение. Надежно установлено, что Венера обладает чрезвычайно мощной, сильно разогретой атмосферой. В месте посадки станции температура атмосферы составляет  $474 \pm 20^{\circ}\text{C}$ , давление  $90 \pm 15 \text{ атм}$ . Это значит, что плотность газа у поверхности планеты в 60 раз выше плотности нашей земной атмосферы и, следовательно, всего лишь в 17 раз меньше плотно-

сти воды. Высота рельефа в месте посадки станции «Венера-7» в пределах 2 км совпадает со средним уровнем поверхности по измерениям «Венеры-5 и -6» и соответствует радиусу планеты 6051 км (при сопоставлении с данными «Маринера-5»). Это значение хорошо согласуется с результатами обработки данных радиолокационных измерений, которые приводят к величине  $6050 \pm 5 \text{ км}$ .



Установлено, что во всей области измерений на автоматических станциях «Венера» атмосфера сохраняется близкой к адиабатической. Это, видимо, свидетельствует также об отсутствии вблизи поверхности слоя, непрозрачного для солнечной радиации. Вместе с тем обращает на себя внимание тот факт, что некоторые особенности в газовом состоянии по измеренным параметрам не согласуются с представлениями об адиабатической устойчивой атмосфере Венеры в определенных интервалах высот. Это имеет, в частности, место в области примерно от 35 до 50 км, которая охватывается также радиорефракционными измерениями «Маринера-5». Интересно, что ниже 40 км наблюдались особенности и в высотном ходе измерений плотности атмосферы по данным «Венер-4—6». Можно думать, что эти особенности вызваны содержанием в атмосфере относительно небольших концентраций примесей, находящихся в жидкой или твердой фазах.

Обращают на себя внимание и такие особенности в венерианской атмосфере, как



2230

У л ь т р

своеобразный характер микроволновых потерь, т. е. ослабления радиосигнала. Источник этих потерь не удастся в настоящее время однозначно определить. Хотя в целом микроволновой спектр Венеры, по данным наземных радиоизмерений, хорошо объясняется моделью атмосферы с поверхностным давлением 80—100 атм, состоящей из  $\text{CO}_2$  при концентрации 0,5%  $\text{H}_2\text{O}$  (что, как мы видели, хорошо согласуется с данными прямых измерений), более тонкая структура микроволнового ослабления, обнаруженная авторами эксперимента на «Маринере-5», также требует допущения о наличии примесей. Последние должны быть либо локализованы на определенных уровнях в атмосфере, либо оставаться в крайне малых концентрациях до поверхности так, чтобы их вклад в микроволновое ослабление (в силу квадратичной зависимости степени поглощения от давления) с глубиной падал.

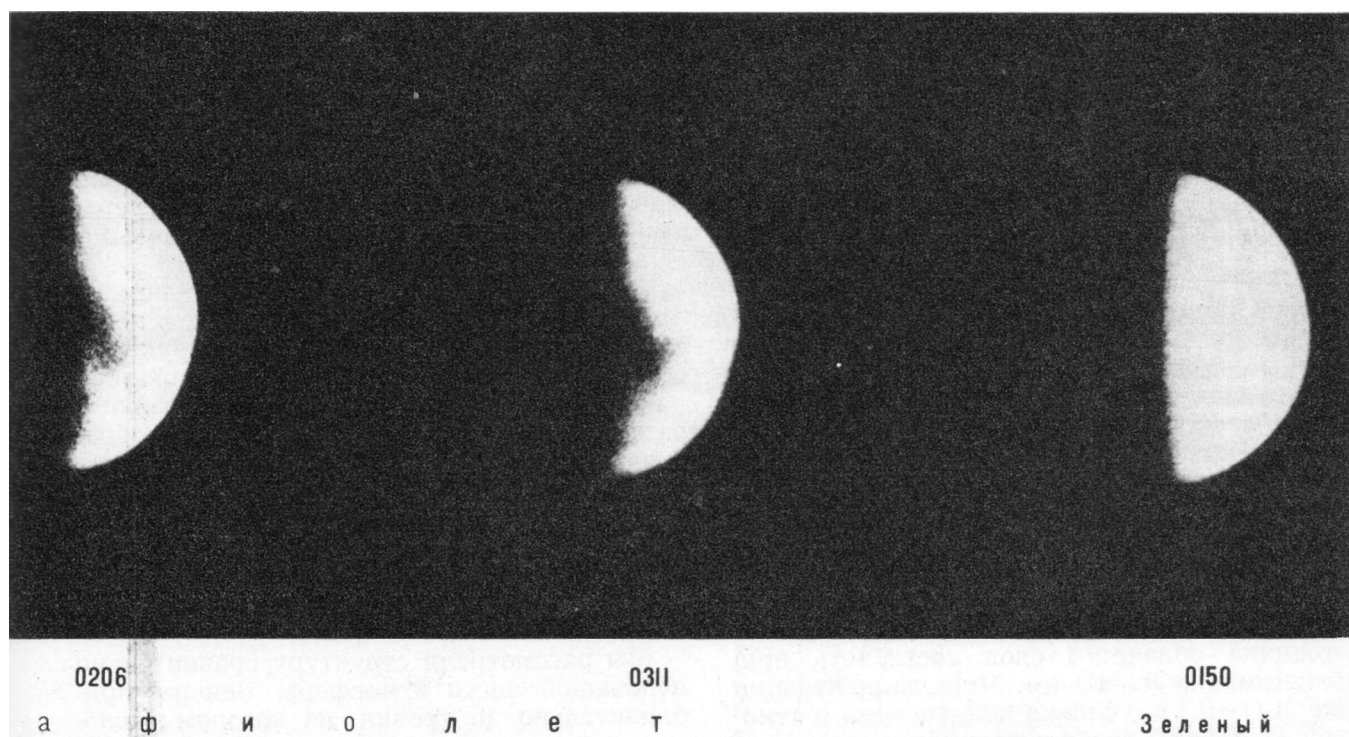
В перемешиваемой атмосфере первая возможность может легко обеспечиваться конденсирующимися веществами. Действительно, при температуре поверхности Венеры около  $500^\circ\text{C}$  разнообразные отдельные элементы и химические соединения могли перейти в атмосферу и существовать в ней в виде паров и конденсатов на разных уровнях. Исходя из возможных равновесных геохимических реакций для системы литосфера — атмосфера, можно, в частности,

допустить образование в атмосфере Венеры ртутно-галогеновых облаков, конденсирующихся в широком интервале температур от  $-20$  до  $+180^\circ\text{C}$ . Указания на возможность существования таких облаков были сделаны на основе анализа ослабления радиосигналов при полете космического аппарата «Маринер-5». Нельзя при этом, естественно, исключить и влияние пыли, которая может вносить заметные потери в ослабление микроволновой эмиссии планеты.

Таким образом, результаты анализа газового состояния, особенности в высотном ходе температуры, плотности и характер микроволновых потерь не позволяют исходить из представлений об адиабатических атмосферных процессах в чисто углекислой среде. Они заставляют предполагать наличие в атмосфере Венеры примесей, распределение которых по высоте с большой вероятностью сопровождается фазовыми переходами и, по-видимому, существенно сказывается на физической структуре, термодинамике и тепловом режиме атмосферы планеты.

#### Облака

С предположением о наличии в атмосфере различных примесей непосредственно связана и проблема венерианских облаков, относительно структуры и природы которых не существует до сих пор единого мнения.



Основным источником доступной информации об облаках служат наблюдаемые с Земли оптические характеристики планеты. Эти характеристики, однако, вместе с данными о высотных профилях температуры и давления не дают возможности прийти к выводу о том, из чего состоят венерианские облака. С учетом же соображений о возможности перехода в атмосферу из литосферы разнообразных химических элементов и соединений и о наличии пыли легко представить себе слоистую структуру облаков на Венере, состоящих из различных компонентов на разных уровнях.

Естественно, что число возможных «кандидатов» не безгранично, и последними исследованиями существенно поколеблен или отвергнут ряд ранее предполагавшихся гипотез, во всяком случае относящихся к составу видимого с Земли облачного слоя. Видимо, с большой вероятностью можно исключить такие компоненты, как  $\text{CO}_2$  (слишком низкая температура конденсации, не достигаемая в атмосфере),  $\text{C}_2\text{O}_2$  (отсутствие характерных минимумов в полосах поглощения на 2,27 и 2,67 мк и сильного поглощения в области от 2,9 до 3,4 мк), углеводороды (отсутствие сильной полосы на 2,4 мк). По спектральным и геохимическим соображениям небезнадежны хлористое железо и его гидраты, а на больших высотах — хлористый аммоний, хотя против них

Рис. 8. Фотография Венеры в видимой области спектра, взятая из Атласа планет, составленного В. де Галатеем и А. Дольфусом (Париж, 1968). В целом она отвечает обычным представлениям о плотном слое облаков, окутывающих Венеру. Однако контрастность фотографии несколько повышена, поэтому более отчетливо видна крайне нерегулярная структура облачности

Рис. 9. Фотографии Венеры в ультрафиолетовых (первые три) и зеленых (последняя) лучах, наглядно показывающие перемещение характерных контрастных деталей на диске, видимых только в ультрафиолете. Анализ подобных серий последовательных снимков приводит к выводу о движении этих деталей в ту же сторону, что и сама планета, но примерно в 60 раз быстрее!

имеются и существенные возражения. Следует иметь в виду уже упоминавшуюся возможность ртутно-галогеновых соединений.

Естественно, что наиболее притягательно, казалось бы, очевидное предположение о водно-ледяных облаках. Если исходить из измеренной на «Венерах» довольно высокой влажности верхней части тропосферы планеты, то облака из  $H_2O$  должны существовать независимо от наличия конденсатов другой природы или пыли. В пользу этого предположения говорят также некоторые данные, касающиеся интерпретации отражательных свойств планеты в сопоставлении с лабораторными спектрами различных соединений, и довольно низкая температура стратосферы Венеры.

При однопроцентной концентрации  $H_2O$  и модели стратосферы, построенной по результатам измерений на космических аппаратах, нижняя граница облаков должна находиться на высоте 59 км, а эффективная толщина облачного слоя составлять приблизительно 8—10 км. При концентрации же  $H_2O = 0,1\%$  условия конденсации в атмосфере Венеры вообще не достигаются. Наиболее сильные возражения против облаков из  $H_2O$  — отсутствие характерного для льда поглощения в ближней инфракрасной области спектра на 1,5 и 2 мк (в случае облаков сравнительно большой оптической толщины); слишком большой измеренный показатель преломления вблизи границы венерианских облаков (в среднем 1,45, а для льда он — 1,31); малая концентрация водяного пара, по спектроскопическим данным, выше облаков (если относить излучающий слой к уровню в атмосфере с температурой минус 30—50°C). Высказывается также заслуживающее внимания предположение об обогащении облаков водным раствором  $HCl$  по сравнению с его относительно низким содержанием в надоблачной атмосфере. Обоснованием служит, в частности, тот факт, что коэффициент преломления водного раствора  $HCl$  возрастает с уменьшением температуры, приближаясь к измеренному значению на верхней границе венерианских облаков.

Интересно заметить, что на диске Венеры, малокоонтрастном в видимом свете, в ультрафиолетовой области хорошо различаются контрастные образования. Они получили название ультрафиолетовых облаков. Обнаружено, что период появления характерных деталей составляет около 4 земных суток. Наблюдаемые неоднородности облаков в ультрафиолете локализованы

примерно на 25 км выше границы облачности в видимом свете. Периодичность повторяемости деталей, видимо, связана со структурой стратосферной циркуляции, имеющей глобальный характер, со скоростями до 100 м/сек. Возможно и другое объяснение — возбуждение продольных волн в стратосфере, так что наблюдаемые перемещения могут быть связаны с групповыми скоростями этих волновых процессов.

По-видимому, лишь прямой эксперимент принесет решающие доказательства в пользу той или иной модели состава и структуры облаков на Венере. На сегодняшний день наибольшего внимания заслуживает гипотеза слоистой структуры облачности, с образованием протяженного слоя облаков из  $H_2O$  вместе с растворами некоторых соединений и пылью, возможно играющей роль ядер конденсации.

### **Верхняя атмосфера**

Мы рассмотрели структуру сравнительно небольшой части атмосферы Венеры приблизительно до уровня, на котором располагается граница видимых с Земли облаков. Эта область включает в себе около 99,8% всей массы газа, содержащегося в газовой оболочке планеты. Оставшиеся доли процента образуют довольно протяженную (хотя и менее протяженную, чем у Земли) верхнюю атмосферу Венеры, структура и физико-химические свойства которой представляют большой самостоятельный интерес.

Представления о структуре атмосферы выше видимой границы облаков основываются на данных измерений «Венеры-4» и «Маринера-5», результатах расчетов характера переноса тепловой радиации в условиях лучистого равновесия, данных фотометрических измерений параметров атмосферы Венеры во время затмения Венерой звезды Регул, а также оценок характера ослабления в верхней атмосфере солнечной ультрафиолетовой радиации. Тем самым оказывается возможным определить высоту расположения температурного минимума, соответствующего мезопаузе в земной атмосфере. Согласно проведенным расчетам, для Венеры этот уровень расположен на высоте приблизительно 100 км при температуре около 190°K, в то время как для Земли — на высоте около 85 км при температуре 160—170°K.

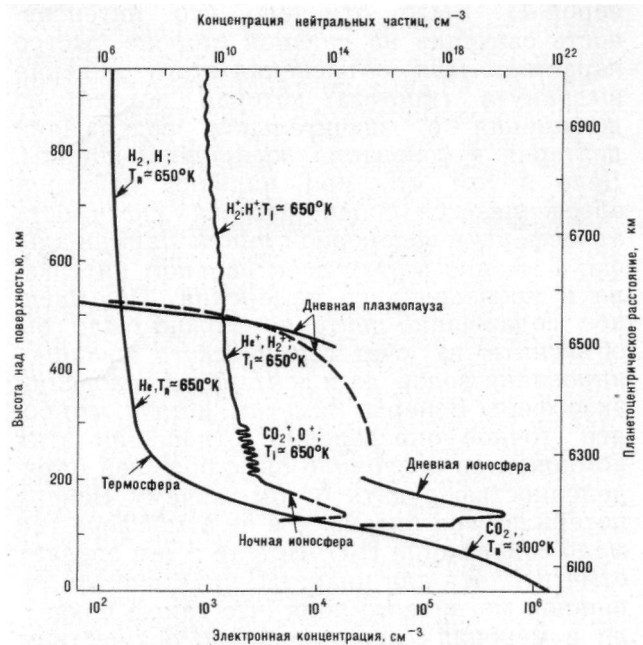
Данные о верхней атмосфере Венеры на еще больших высотах крайне ограничены и к тому же относятся только к условиям

средней солнечной активности, изменение которой по аналогии с земной атмосферой должно, очевидно, приводить к существенным вариациям температуры, состава и плотности.

Наиболее сложные проблемы в физике верхней атмосферы Венеры (а также и Марса) в настоящее время — это проблемы химического состава и энергетики. Результаты измерений интенсивности свечения

Предположение о преобладающей концентрации  $\text{CO}_2$  до высот приблизительно 200—300 км подтверждается также расчетами профилей электронной концентрации в ионосфере Венеры и сравнением их с результатами измерений на «Маринере-5». Эти изменения показывают, что ионосфера Венеры менее плотная, чем на Земле, а слой с максимальной концентрацией электронов располагается ниже, чем это

Рис. 10. Модель верхней атмосферы и ионосферы Венеры. Профили электронной концентрации на ночной и дневной сторонах Венеры построены по результатам измерений американского космического аппарата «Маринер-5». Профиль изменения концентрации нейтральных частиц соответствует модели, описанной в тексте. Рядом с кривыми показаны наиболее вероятные нейтральные и ионные составляющие и температуры атмосферы и ионосферы



верхней атмосферы Венеры ультрафиолетовыми фотометрами «Венеры-4» и «Маринера-5» могут быть интерпретированы таким образом, что температура атмосферы выше 200 км около 400—450°С. А какой здесь состав? Естественно ожидать, что в тех областях, куда свободно проникает солнечная ультрафиолетовая радиация, интенсивно протекают процессы фотодиссоциации  $\text{CO}_2$  с образованием значительных количеств атомарного кислорода. Между тем те же фотометрические измерения в спектральном интервале 1300—1304 Å, где кислород интенсивно рассеивает солнечную радиацию, показали крайне низкое его содержание в верхней атмосфере Венеры, примерно в  $10^5$  раз меньше по сравнению с земной атмосферой на тех же высотах. Это приводит к представлениям о высокой эффективности обратных рекомбинационных механизмов на больших высотах, препятствующих накоплению кислорода за счет разрушения углекислого газа.

имеет место в ионосфере нашей планеты. Очень интересно, что структура венерианской ионосферы на дневной и ночной сторонах различна: с дневной стороны ионосфера резко обрывается выше 400—500 км за счет натекания плазмы «солнечного ветра», при этом, очевидно, возникает ударный фронт, а с ночной стороны образуется сравнительно протяженный «плазменный шлейф» Венеры.

По существующим оценкам эффективность рекомбинации атомарного кислорода заметно уменьшается выше приблизительно 250—300 км. Это, очевидно, должно приводить к появлению слоя сравнительно небольшой протяженности, который, по-видимому, сменяется гелием, если поступление его в атмосферу Венеры вследствие радиоактивного распада урана и тория в недрах планеты примерно соответствует поступлению в атмосферу Земли. Необходимый баланс между убеганием (диссипацией) гелия из атмосферы и его поступлением за счет

радиоактивного распада обеспечивается, если дополнительно предположить унос примерно 10% от количества образующихся на дневной стороне ионов гелия вследствие взаимодействия планеты с плазмой «солнечного ветра». Наконец, еще выше должен преобладать наиболее легкий газ — водород, образующий водородную корону Венеры.

Оживленную дискуссию вызвали особенности в структуре этой водородной короны, зарегистрированной «Маринером-5» и «Венерой-4». Было отмечено, что интенсивность свечения на дневной стороне быстро нарастает. Для объяснения этого явления выдвинута гипотеза, которая исходит из допущения о значительном содержании дейтерия в основании водородной короны. Дело в том что при наличии дейтерия обеспечивается более высокая светимость атмосферы в водородной линии Лайман-альфа, а именно в этом спектральном интервале и производились измерения. Повышенное содержание дейтерия можно было бы объяснить за счет термического фракционирования водорода и дейтерия в основании экзосферы Венеры. Заметим, кстати, что более точное определение отношения этих компонентов позволило бы с большей определенностью судить о том, почему Венера потеряла свои океаны и в ее атмосфере так мало содержание  $H_2O$ . Вместе с тем следует отметить, что для планеты, практически лишенной магнитного поля (что также показали измерения), принципиально осуществим и другой механизм: унос частиц, ионизованных солнечным ультрафиолетом, за счет электрического поля из области, приблизительно совпадающей с границей экзосферы.

Эта область нерегулярного («наведенного») магнитного поля, обнаруженная в окрестности Венеры на дневной стороне, получила название индуцированной магнитосферы.

Таким образом, исходя из измеренных профилей ночной ионосферы и измерений интенсивности свечения атмосферы ультрафиолетовыми фотометрами космических аппаратов, можно ожидать, что верхняя атмосфера Венеры обладает довольно сложной структурой. Видимо, до 200—250 км она сохраняется преимущественно углекислой, вблизи 300 км возможен слой атомарного кислорода, выше преобладает гелий, а с высоты 1000—2000 км — дейтерий и водород, причем приходится допускать, что относительное содержание дейтерия на Венере значительно (по крайней мере в сто раз) больше, чем в экзосфере Земли. Современные представления о физической структуре атмосферы Венеры до высоты приблизительно 1000 км можно суммировать в виде модели, показанной на рисунке.

#### **Природа высокой температуры**

В течение последнего десятилетия, после обнаружения высокой радиояркой температуры Венеры, были предприняты многочисленные попытки понять, как происходит перенос тепла на Венере, и если поверхность планеты действительно горячая — отыскать физический механизм, обеспечивающий столь интенсивный разогрев.

В результате осуществления непосредственных измерений на станциях «Венера» впервые появилась возможность при моделировании теплообмена в атмосфере исходить из фактических значений параметров газа и вести расчеты по измеренным профилям температуры и давления, не прибегая к гипотетическим моделям структуры атмосферы Венеры.

Физико-химические процессы в атмосфере и на поверхности планеты взаимосвязаны. Ее тепловой режим и динамика непосредственно зависят от химического состава атмосферы. Основываясь на расчетах моделей теплового равновесия, можно предполагать, что для Венеры наиболее эффективны процессы лучисто-конвективного теплообмена в толще атмосферного газа по вертикали и циркуляция в меридиональном и широтном направлениях. Вероятно, за счет меридиональной циркуляции происходит выравнивание температур экваториальных и полярных областей, практически не отличающихся друг от друга, как показали недавние результаты радиоастрономиче-

ских измерений. Запас тепла в атмосфере Венеры огромен, он в сотни раз больше количества тепла, которое теряется за венерианскую ночь, поэтому суточные колебания температуры на планете по оценкам не больше 1°.

Почему у поверхности Венеры высокая температура? Легче всего это объяснить действием парникового механизма, который должен проявляться на Венере гораздо эффективнее, чем в атмосфере Земли. Смесь углекислого газа и водяного пара оказывает очень сильное экранирующее действие на уходящую тепловую радиацию. Оно значительно возрастает с ростом температуры и давления в атмосфере. Очевидно, измеренные значения этих параметров у поверхности должны отвечать некоторому равновесному тепловому состоянию атмосферы Венеры. Вместе с тем трудно сказать, «работает» ли парниковый механизм от самой поверхности или же он эффективен только на более высоких уровнях? Чтобы ответить на этот вопрос, надо знать, прозрачна ли атмосфера для солнечного света до поверхности или солнечные лучи задерживаются выше.

Оценки характера ослабления солнечной коротковолновой и тепловой радиации за счет молекулярного рассеяния и поглощения отдельными атмосферными компонентами приводят к обнадеживающему предположению о довольно высокой (порядка 20—30%) прозрачности атмосферы для солнечных лучей. В случае же если солнечная радиация не проникает до поверхности, передача энергии основной массе атмосферы могла бы происходить другим путем — за счет механизма так называемой глубокой циркуляции, при которой обеспечивается горизонтальный перенос газа от подсолнечной к антисолнечной точкам и адиабатический разогрев при его опускании в глубину. Аналогичный механизм переноса тепла может действовать между экватором и полюсами. Не исключено, что на Венере действуют и другие источники, например, определенный вклад может вносить внутреннее тепло планеты.

### **О происхождении и эволюции планеты**

Результаты исследований последнего десятилетия принесли убедительные свидетельства того, что Венера является уникальной планетой, принципиально отличной от других планет Солнечной системы, прежде

всего по мощности газовой оболочки, термическому режиму, параметрам собственного вращения. В настоящее время трудно ответить на вопрос о том, что обусловило развитие столь необычных условий на соседней планете, является ли атмосфера Венеры конечным продуктом ранней стадии эволюции, свойственной молодой планете, или такие условия возникли позже, в результате необратимых геохимических процессов, обусловленных близостью Венеры к Солнцу, как это предполагает академик А. П. Виноградов.

Основываясь на гипотезе единого происхождения планет Солнечной системы из гигантской протопланетной туманности, естественно допустить, что первичный состав атмосфер около 4,5 млрд. лет назад был примерно одинаков и соответствовал средней распространенности химических элементов на Солнце. В дальнейшем, однако, наиболее распространенные элементы — водород и гелий — были удержаны лишь холодными гигантскими планетами, образовавшись в основном из этих газов на периферии Солнечной системы. В состав же твердой железо-силикатной фазы наиболее близких к Солнцу планет земной группы вошли менее распространенные и более тяжелые элементы (в виде металлов, окислов, сульфидов), а самые легкие — водород, гелий — были потеряны за счет диссипации молекул этих газов в космическое пространство.

Газовый состав атмосфер планет земной группы формировался прежде всего за счет вулканических извержений, которыми сопровождалась дифференциация вещества планеты на оболочки вследствие разогревания внутренним теплом радиоактивного распада.

В недрах планеты водяной пар и углекислый газ составляют основную долю вулканических газов. С этой точки зрения можно объяснить наличие этих газов в атмосфере Венеры, точно так же как и обнаруженных спектроскопически угарного газа, хлористого и фтористого водорода. Вероятно, несколько миллиардов лет назад примерно аналогичный состав имела и атмосфера Земли. Однако, по-видимому, решающее воздействие на формирование земной атмосферы оказали в дальнейшем процессы фотосинтеза и появление в ее атмосфере свободного кислорода благодаря возникновению биосферы. Это, в свою очередь, обусловило окисление аммиака, также содержащегося в вулканических газах, с выделением в атмосферу больших количеств азота, а углекислый газ, хлористый и фтористый водород

и сернистые соединения вошли в реакции с биосферой, гидросферой и твердым веществом планеты. При умеренной температуре поверхности и атмосферы Земля сохранила свою воду, основная масса которой сосредоточилась в океанах, а углекислый газ был связан в карбонатах осадочных пород.

Можно думать, что большая близость Венеры к Солнцу предопределила иной характер эволюции ее атмосферы. Видимо, одним из основных факторов, приведших к существующим условиям, оказалось постепенное обезвоживание планеты. Потеря планетой воды зависит от двух основных факторов: эффективности процессов диссоциации и переноса молекул водяного пара в области верхней атмосферы, где ослабление солнечной ультрафиолетовой радиации мало. Для Земли это высоты около 80—120 км. Если кислород земной атмосферы задерживает солнечную коротковолновую радиацию выше 100—150 км, то на Венере из-за отсутствия  $O_2$  она может проникать глубже (возможно, такая же ситуация была на Земле около 2—3 млрд. лет назад, до появления фотосинтетического кислорода); к тому же температура над облачным слоем (в мезопазузе), как мы видели, несколько выше, чем на Земле. Оба эти фактора позволяют предполагать, что процессы подвода снизу и фотодиссоциации молекул водяного пара протекают в атмосфере Венеры значительно интенсивнее. Водород легко улетучивается (диссипирует) в межпланетное пространство, образуя водородную корону, а кислород вступает в окислительные реакции с твердой оболочкой и атмосферными газами, способствуя, в частности, сохранению преобладающей концентрации углекислого газа в атмосфере Венеры до больших высот.

При повышении температуры, давления и обезвоживании сильно возрастает выделение в атмосферу из карбонатов углекислого газа. Этот процесс определяется взаимодействием карбонатов с силикатами в поверхностном слое планеты. При ожидаемых значениях температуры и давления у поверхности Венеры в ее атмосферу перешло примерно столько же углекислоты, сколько ее

Таблица 2

Летучие компоненты	Атмосфера Земли	Всего на Земле	Атмосфера Венеры
$CO_2$	$3 \cdot 10^4$	$70 \pm 30$	$90 \pm 15$
$H_2O$	$10^7 - 10^8$	$375 \pm 75$	$10^{-5} - 10^{-2}$
$O_2$	0,23	~0,23	$< 10^3$
$N_2$	0,75	~0,95	$< 2$
Ar	$10^{-2}$	~ $10^{-2}$	?
CO	$10^6 - 10^7$	~ $10^6$	$2 \cdot 2 \cdot 10^{-3}$
Cl	—	5,7	$2 \cdot 10^{-5}$
F	—	$3 \cdot 10^{-4}$	$10^{-6}$

содержится в связанном состоянии на Земле. С этой точки зрения можно понять преимущественно углекислый состав и высокое давление в венерианской атмосфере. Если бы температура на Земле возросла до температуры Венеры, давление в земной атмосфере стало бы еще выше, поскольку к давлению около 100 атм за счет высвобождения углекислоты добавилось бы, вследствие испарения океанов, еще примерно 300 атм, что соответствует среднему давлению земной гидросферы. Сравнительное содержание распространенных летучих компонентов на Земле и Венере (в  $кг/см^2$ ) приведено в табл. 2.

#### Дальнейшие исследования

В наших знаниях о Венере остается еще много нерешенных проблем. На целый ряд вопросов, по-видимому, смогут дать ответ только измерения при помощи космических аппаратов.

Очень большой интерес представляет структура и состав венерианских облаков, оптические свойства и тепловой режим атмосферы, наличие относительно малых примесей и аэрозоля и их влияние на особенности высотного хода атмосферных параметров, тепловые и топографические характеристики поверхности Венеры. Неясна степень прозрачности атмосферы для видимого света, а она определяет наиболее вероятный механизм теплообмена в толще атмосферного газа и динамику атмосферы планеты. Потребуется широкий комплекс прямых измерений для ответа на вопросы о тонкой структуре атмосферы, возможных фазовых переходах, характеристиках переноса солнечной и уходящей тепловой радиации. Совершенно недостаточно данных о физических условиях в верхней атмосфере Венеры, о характере ее обтекания плазмой «солнечного ветра», о том, каков механизм взаимодействия планеты с окружающей космической средой, которое происходит совершенно иначе, чем на границе магнитосферы



Земли. Поэтому необходимо детально исследовать структуру ударного фронта на дневной стороне планеты.

Для лучшего понимания структуры и процессов в нижней атмосфере, термосфере и экзосфере важное значение будут иметь масспектрометрические измерения нейтрального и ионного состава, а также водородной и кислородной эмиссий и спектров свечения ночного неба с высоким разрешением, недоступным при наблюдениях с Земли. На ряд принципиальных вопросов, касающихся природы и эволюции атмосферы и выяснения наиболее вероятного механизма тепло- и массообмена в нижней и верхней атмосфере, поможет дать ответ дальнейшее развитие методов математического моделирования планетных атмосфер с использованием более полных экспериментальных данных.

Можно пока лишь строить предположения о том, что представляет собой поверхность Венеры, каков характер слагающих ее пород. Вероятнее всего это раскаленная, туск-

ло освещенная пустыня, возможно, с достаточно сложным, хотя и сглаженным рельефом. Высокая температура исключает возможность существования у поверхности жизни земного типа, хотя нельзя в принципе исключить наличие простейших живых форм в облаках, где условия благоприятны и почти соответствуют земным.

Этот перечень далеко не исчерпывает проблем Венеры — одной из наиболее волнующих воображение планет Солнечной системы. Нет сомнения в том, что уже ближайшие годы обеспечат новый значительный прогресс в наших знаниях о планетах. Это позволит не только значительно продвинуться вперед в понимании их природы. Ведь изучение планет дает, по существу, единственную возможность проверить многие фундаментальные представления о зарождении и эволюции Солнечной системы, которые до последнего времени целиком основывались на исследованиях одной лишь планеты — Земли.